

NO₂ – Immissionen in Münster

Einfluss von Meteorologie und Straßenverkehr, Minderungsmaßnahmen

Diplomarbeit

Institut für Landschaftsökologie

Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Fachbereich Geowissenschaften

Vorgelegt von

Nina Kampling

Gutachter: Prof. Dr. Otto Klemm

Münster, Oktober 2009

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Zusammenfassung	VIII
Abstract	X
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Zielsetzung	1
1.2 Grundlagen.....	2
1.2.1 Stickoxide.....	2
1.2.2 Rechtliche Grundlagen.....	5
1.2.3 Umweltzonen.....	7
1.2.4 Grenzschichtmeteorologie.....	9
1.2.5 Angaben zum Stadtgebiet von Münster	10
2 Methoden.....	11
2.1 Messstandorte in Münster	11
2.2 Messverfahren an den Messcontainern.....	14
2.3 Allgemeine Angaben zu den Daten	15
2.4 Auswertungsmethoden.....	16
2.4.1 Qualitätssicherung.....	16
2.4.2 Verwendete Programme.....	17
3 Ergebnisse und Diskussion.....	18
3.1 NO ₂ -Immissionen in Münster 2006 und 2007	18
3.1.1 NO ₂ -Immissionen im Jahresgang.....	19
3.1.2 NO ₂ - und NO _x -Immissionen im Wochenverlauf	23
3.1.3 Tagesgänge der NO ₂ -Immissionen	26
3.1.4 Bewertung der Jahres-, Wochen- und Tagesgänge	30
3.2 Abschätzung des Einflusses vom Straßenverkehr auf die NO ₂ -Immissionen	32
3.3 Abschätzung des Einflusses meteorologischer Parameter auf die NO ₂ -Immissionen	37

3.3.1	Meteorologie in Münster 2006 und 2007	37
3.3.2	Einflussfaktor Wind.....	44
3.3.3	Einflussfaktor atmosphärische Schichtung.....	50
3.3.4	Einfluss anderer meteorologischer Parameter	53
4	Mögliche Minderungsmaßnahmen.....	55
4.1	Allgemeine Maßnahmen.....	55
4.2	„Modifizierte Umweltzone“	56
4.3	Städtebauliche bzw. –planerische Maßnahmen	59
4.4	Verkehrseinschränkungen und Verkehrsverbote.....	61
5	Fazit und Ausblick.....	63
6	Literaturverzeichnis.....	64
7	Anhang	68
8	Danksagung	i
9	Erklärung.....	ii

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Standorte der LUQS-Messstationen in Münster und der Station Hüffergarten; (Universität Münster, ILÖK) (http://www.openstreetmap.org)	12
Maßstab: 1 : 25.000	
Abb. 2: LUQS-Messstation im Stadtteil Münster-Geist (Foto: Nina Kampling). 15	
Abb. 3: Monats-Mediane 2006 und 2007 der Stationen Münster-Geist (MSGE), Steinfurter Straße (VMSS, nur 2006), Münster-Friesenring (VMUE) und Weseler Straße (VMSW, nur 2007); die gepunktete Linie markiert den Grenzwert ab 2010	20
Abb. 4: Monatsmediane der NO ₂ -Konzentrationen an der Station MSGE 2006 und 2007.....	22
Abb. 5: Median-Wochentage NO _x (als NO ₂) und Median-Wochentage NO ₂ 2006 der Stationen MSGE, VMSS und VMUE.....	23
Abb. 6: Median-Wochentage NO _x (als NO ₂) und Median-Wochentage NO ₂ 2007 der Stationen MSGE, VMSW und VMUE.....	24
Abb. 7: Mediantagesgänge 2006 der Stationen MSGE, VMSS und VMUE werktags (unten), samstags (Mitte) und sonntags (oben)	26
Abb. 8: Relative Mediantagesgänge der Stationen VMSS, VMUE und MSGE, werktags	28
Abb. 9: Relative Mediantagesgänge der NO ₂ -Immissionen 2006 an MSGE, VMUE und VMSS, samstags	29
Abb. 10: Relative Mediantagesgänge der NO ₂ -Immissionen 2006 an MSGE (hellgraue Linie), VMUE (graue Linie) und VMSS (schwarze Linie), Sonn- und Feiertage.....	30
Abb. 11: Fahrzeuge pro Stunde, gemittelt aus 2 Werktagen (Weseler Straße, 2008) und Mediantagesgänge von NO und NO ₂ aus 2007 (werktags, VMSW)	33
Abb. 12: Fahrzeuge pro Stunde an einem Sonntag 2008 (Weseler Straße), Mediantagesgänge 2007 von NO und NO ₂ (sonntags, VMSW).....	34
Abb. 13: Korrelation der Stickstoffdioxidkonzentrationen mit der Anzahl der Fahrzeuge an Weseler Straße 2007	35
Abb. 14: Mittlere monatliche Temperatur und monatliche Niederschlagssummen 2006 und 2007 (Station Hüffergarten) und	

mittleres monatliches Klima (1961 – 1990) in Münster (Station Münster Zoo, DWD).....	38
Abb. 15: Häufigkeiten der Windrichtung in 2007.....	40
Abb. 16: Verteilung der Windrichtungen 2006 (unten) und 2007 (oben) als Tagesmittelwerte (Basis 10-Minutenwerte).....	41
Abb. 17: Mittlere Windgeschwindigkeit 2007 zu den jeweiligen Windrichtungen.....	42
Abb. 18: Verteilung der Windgeschwindigkeiten 2006 (unten) und 2007 (oben) als Tagesmittelwerte (Basis 10-Minutenwerte)	43
Abb. 19: NO ₂ -Immissionen zu den Windrichtungen an der Station VMSW (2007) gemittelt aus Halbstundenwerten (vorläufige Grafik)	44
Abb. 20: Mediantagesgänge an der Station VMSW 2007 bei Ost- und Westwind (werktags)	45
Abb. 21: NO ₂ -Immissionen zu den Windrichtungen an der Station VMSW (2007) gemittelt aus Halbstundenwerten und klassifiziert nach Windgeschwindigkeiten,	46
Abb. 22: NOx-Immissionen zu den Windrichtungen an der Station VMSW (2007) aus Stundenmitteln, klassifiziert nach Windgeschwindigkeiten	47
Abb. 23: Einfluss der Bebauung auf die Immissionssituation in einer Straßenschluchten (verändert nach OKE, 1987)	49
Abb. 24: Mediantagesgang der Richardson-Zahl und relativer Mediantagesgang VMSW (werktags, 2007).....	51
Abb. 25: Mediantagesgang von Ri und relativer Mediantagesgang von NO ₂ (MSGE) an Sonn- und Feiertagen 2006	52
Abb. 26: Skizze der Ostwind-Situation an der Weseler Straße (verändert nach BEZIRKSREGIERUNG KÖLN ABTEILUNG GEOBASIS.NRW (2009), Maßstab ca. 1 : 5.000)	59
Abb. 27: Weseler Straße mit Frischluftschneise aus Richtung Aasee (verändert nach BEZIRKSREGIERUNG KÖLN ABTEILUNG GEOBASIS.NRW (2009), Maßstab ca. 1 : 5.000)	60
Abb. 28: Jahresmittelwerte der NO ₂ -Konzentrationen im Jahr 2007 (tatsächlicher Wert) und nach angegebenen autofreien Wochentagen (modellierte Werte)	62

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Anteil der Emissionsquellen für NO _x , Bezugsjahre 2004 und 2006 (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009)	4
Tab. 2: Einstufung der Fahrzeuge nach Schadstoffgruppen plus Kennzeichnungsverordnung (UMWELTBUNDESAMT, 2007, verändert).....	7
Tab. 3: Angaben zu den LUQS-Stationen in Münster (LANUV NRW) und der Station Hüffergarten.....	13
Tab. 4: Lage- und Streuungsmaße von NO ₂ an den LUQS-Stationen.....	18
Tab. 5: Einteilung des Stabilitätsgrades (nach FOKEN, 2006)	50
Tab. 6: Pearson-Korrelation zwischen der NO ₂ -Konzentration und den meteorologischen Parametern an den LUQS-Stationen in 2007, differenziert nach Werktag (WT) und Sonn- und Feiertage (SF), Basis: Stundenmittel.....	54
Tab. 7: Jahresmittelwerte nach Herabsetzung auf das jeweilige Perzentil der Halbstundenwerte für NO ₂	56
Tab. 8: Lage- und Streuungsmaße der NO ₂ -Konzentrationen an der Station VMSW bei Ost- und Westwindverhältnissen (werktags)	57
Tab. 9: Mittelwerte der NO ₂ -Immissionen bei Ost- und Westwindverhältnissen der Samstage und Sonntage an VMSW	58

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Abb.	Abbildung
BlmschG	Bundesimmisionsschutzgesetz
BlmschV	Bundesimmisionsschutzverordnung
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
DWD	Deutscher Wetter Dienstag
EU	Europäische Union
h	Stunde
hPa	Hektopaskal
HNO ₃	Salpetersäure
HO ₂	Wasserstoffperoxyradikal
K	Kelvin
Kap.	Kapitel
km	Kilometer
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz
LRP	Air quality plan
LQP	Air quality plan
LUQS	Air quality monitoring system
m	Meter
m ³	Cubic meter
MEZ	Middle European Time
µg	Microgram = 10 ⁻⁶ g
MSG	LUQS-Station Münster-Geist
nm	Nanometer
N ₂	Stickstoff
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickstoffoxide
NN	Normal Null
NRW	Nordrhein-Westfalen
O ₂	Sauerstoff

O ₃	Ozon
OH	Hydroxylradikal
PM ₁₀	Partikel (Particulate Matter), Durchmesser ≤ 10 nm
RO ₂	organisches Peroxyradikal
s	Sekunde
t	Tonne
Tab.	Tabelle
UBA	Umweltbundesamt
vgl.	vergleiche
VMSS	LUQS-Station Münster-Steinfurter Straße
VMSW	LUQS-Station Münster-Weseler Straße
VMUE	LUQS-Station Münster-Friesenring

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden die Stickstoffdioxidimmissionen in der Stadt Münster untersucht und der Einfluss der Faktoren abgeschätzt, die sich signifikant auf die Höhe der Stickstoffdioxidkonzentrationen auswirken.

Zunächst wurde die Immissionssituation im Bezug auf Stickstoffdioxid (NO_2) in den Jahren 2006 und 2007 dargestellt. Die Datengrundlage für die Werte des Stickstoffdioxids (NO_2) und Stickstoffmonoxids (NO) wurde vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) für diese Arbeit zu Verfügung gestellt. An drei verkehrsbeeinflussten Standorten außerhalb der Innenstadt von Münster und einer Hintergrundstation im Stadtteil Münster-Geist wurden die NO_2 -Konzentrationen verglichen. An der Steinfurter Straße wurde im Jahr 2006 ein Jahresmittelwert von $47,2 \mu\text{g} / \text{m}^3$ festgestellt und an der Weseler Straße sogar ein Mittelwert von $64,8 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im Jahr 2007. Ab dem 01.01.2010 gilt nach dem Gesetz ein Grenzwert von $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im Jahresmittel, der damit in den beiden Jahren überschritten wurde. An allen Stationen ist ein Wochengang mit höheren NO_2 -Werten an den Werktagen und geringeren Werten am Wochenende, speziell am Sonntag, zu verzeichnen. Auch ein Tagesgang mit zwei Peaks zu den Hauptverkehrszeiten um 8:00 Uhr morgens und 18:00 Uhr am Abend ist an den Werktagen an allen Stationen festgestellt worden. Im Hintergrund ist der Abendpeak jedoch etwas zeitverzögert gegen 20:00 Uhr eingetreten. Der Verkehr hat somit einen deutlichen Einfluss auf den Verlauf der NO_2 -Konzentrationen, der sogar bis in den Hintergrund hinein erkennbar ist. Eine Korrelation der Fahrzeuganzahl mit den NO_2 -Immissionen an der Weseler Straße hat eine klare Abhängigkeit ergeben (Korrelationskoeffizient nach Pearson: $r = 0,95$).

Für die Weseler Straße konnten bei Ostwindlage wesentlich geringere Konzentrationen im Vergleich zu anderen Windrichtungen im gesamten Jahr festgestellt werden. Zurückzuführen ist diese Situation auf den Straßenverlauf am Standort der Messstation. Der Ostwind weht über die Molkestraße in die Weseler Straße und führt dort zu einer Kanalisierung entlang des Straßenverlaufs nach Süden. Die Werte sind im Mittel aber trotzdem noch zu hoch. Bei Winden aus West-Nordwest wurden dagegen besonders hohe NO_2 -Immissionen gemessen. Ursächlich ist die vierstöckige Bebauung, die hier eine

Barriere darstellt. Ein bedeutender Einfluss anderer meteorologischer Parameter konnte nicht festgestellt werden.

Berechnungen zu möglichen Minderungsstrategien führten zu dem Ergebnis, dass eine ausreichende Reduktion der NO₂-Immissionen an der Weseler Straße nur durch eine starke Verkehrsreduzierung an der Weseler Straße bzw. durch eine mehrtägige Sperrung der Weseler Straße erfolgen kann. Eine weitere Maßnahme ist, zusätzlich zur Verkehrsreduzierung, eine bauliche Veränderung der Bebauungsstruktur.

Abstract

This work inquires the nitrogen dioxide immissions of the westphalian city Münster and examines the influence of different factors that have a significant effect on the nitrogen dioxide concentrations. First of all the situation of the nitrogen dioxide immissions of the years 2006 and 2007 are represented. The basic data for the nitrogen dioxide (NO_2) and nitrogen monoxide (NO) Measurements, were given by the State Agency of Nature, Environment and Consumer Protection in North Rhine-Westphalia (LANUV NRW).

The NO_2 -concentrations of three traffic influenced stations outside the city centre of Münster and one background station located in the district 'Münster-Geist' were compared. In 2006 a year's average of $47.2 \mu\text{g} / \text{m}^3$ could be located at the 'Steinfurter Straße'. In 2007 the station at the 'Weseler Straße' even measured an average of $64.8 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Beginning at the 1st January 2010 the statutory limit value of $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ of the year's average has to keep. Thus both values mentioned above would have been over the limit. While the comparison of the NO_2 values of a whole week, every single station showed a higher NO_2 value on working days and lower values at the weekend, especially on Sundays. At every station there could also be detected a diurnal variation, which shows two peaks while the rush hours at 8:00 am and 6:00 pm on working days. At the background station the evening peak has a little time delay; it happens at 8:00 pm. Thus you can say that the traffic has a clear effect on the course of the NO_2 concentrations, which is even visible at the background. A correlation of the amount of cars with the NO_2 -immissions at the 'Weseler Straße' has resulted in clearly dependence ($r = 0.95$).

Another interesting fact could be discovered at the 'Weseler Straße'. While the wind came from an east direction the NO_2 concentrations were essential lower in comparison to other wind directions of the whole year. This situation leads back to the special condition of the road at the location of the survey station: The east wind blows over the 'Moltkestraße' into the 'Weseler Straße'. There it leads to canalization along the street in southern direction. But the average values still remained too high. While the wind blows from west-northwestern direction the NO_2 immissions were especially high. The main reason for this

situation is the four-floored buildings that represent a barrier. Another significant influence of other meteorological parameters could not be noticed. Calculation of possible decrease strategies came to the result, that an adequate reduction of the NO₂ immissions at the 'Weseler Straße' could only take place if there would be a great traffic decrease so to say a barricade of the 'Weseler Straße' for several days a week. On more possible measure, near a decrease of the traffic, would be an architectural change of the buildings structure.

1 Einleitung

1.1 Einführung und Zielsetzung

Nach den gesetzlichen Vorgaben gilt ab dem 01.01.2010 für die Konzentrationen von Stickstoffdioxid in der Luft ein Grenzwert von $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im Jahresmittel (BIMSCHV, 2002). In der Stadt Münster wurde dieser Grenzwert in den Jahren 2006 und 2007 deutlich überschritten (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Um den Richtwert zukünftig einhalten zu können, musste die Stadt Münster in Kooperation mit der Bezirksregierung Münster und dem Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) einen Luftqualitätsplan (LQP) erstellen. Mit dem Luftqualitätsplan soll der Grenzwert bis zu dem genannten Stichtag eingehalten und dauerhaft unterschritten werden. Um dieses Ziel zu erreichen, werden entsprechende Maßnahmen entwickelt, die zu einer Senkung der Schadstoffimmissionen führen sollen. Erfahrungsgemäß ist dazu ein ganzer Katalog von Maßnahmen nötig (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2009).

Das bisher bekannteste Instrument der Luftqualitätsplanung ist die Umweltzone. Diese betrifft den Kraftfahrzeugverkehr, der als Hauptverursacher für Stickoxidemissionen gilt (UMWELTBUNDESAMT, 2009). In Münster wird zum 01.01.2010 eine Umweltzone eingerichtet, die aber voraussichtlich nicht die notwendige Minderung erzielen wird (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009).

In dieser Arbeit sollen die Einflüsse sowohl des Straßenverkehrs als auch der Meteorologie auf die Stickstoffdioxidimmissionen in Münster untersucht werden. Zunächst wird die gesamte Belastungssituation mit Stickstoffdioxid in den Jahren 2006 und 2007 betrachtet und analysiert. Danach wird abgeschätzt, wie stark die einzelnen Faktoren auf die Immissionssituation einwirken. Es werden Korrelationsanalysen zwischen den Stickstoffdioxidkonzentrationen an verkehrsintensiven und verkehrsberuhigten Standorten und verschiedener meteorologischer Parameter bzw. dem Verkehr durchgeführt.

Ziel ist es, Zusammenhänge zwischen hohen Konzentrationen und bestimmten meteorologischen Verhältnissen darzustellen.

Resultierend daraus sollen Minderungsstrategien entwickelt werden, die zu der Einhaltung des Grenzwertes führen können.

1.2 Grundlagen

1.2.1 Stickoxide

Mit dem Begriff Stickoxide fasst man statistisch die Oxide Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zusammen (FEZER, 1995). Stickoxidemissionen entstehen vorwiegend bei Verbrennungsprozessen. Bei Verbrennungen mit hohen Temperaturen, kann sich der Luftsauerstoff (O_2) auch mit dem mitgelieferten Stickstoff (N_2) der Luft zu Stickstoffmonoxid (NO) verbinden (FEZER, 1995). Stickoxide werden zu etwa 90 % als NO emittiert (SEINFELD & PANDIS, 2006). Innerhalb kurzer Zeit oxidiert das NO zu NO_2 , welches durch UV-Strahlung sein zweites Sauerstoffatom auch wieder abgeben kann.

Die Photolyse von NO_2 findet bei einer Wellenlänge von <420 nm statt (Gleichung 1.1). Dabei wird es zu NO und atomarem Sauerstoff (O) reduziert.



Das hierbei entstandene Sauerstoffatom ist sehr reaktiv und führt in Kombination mit dem molekularen Luftsauerstoff (O_2) zur Bildung von Ozon (O_3) (Gleichung 1.2).



Das M steht hier für einen unspezifischen Reaktionspartner. In Außenluft ist dieser meist Molekularer Stickstoff (N_2) oder molekularer Sauerstoff (O_2) (GUDERIAN, 2000). Er dient als Katalysator, der die überschüssige Energie abführt.

Gleichung 1.2 gilt als die wichtigste Quelle für das troposphärische Ozon (SEINFELD & PANDIS, 2006). Stickoxide sind verantwortlich für die Bildung des Ozons in der Troposphäre. Ohne die Stickoxide würde dort keine Ozonbildung stattfinden. Wurde das Ozon gebildet, reagiert es darauf wieder sehr schnell mit dem NO aus Gleichung 1.1, um erneut NO_2 zu bilden (Gleichung 1.3).



Diese drei Reaktionen finden innerhalb von Minuten statt und bilden somit einen photostationären Zustand (SEINFELD & PANDIS, 2006).

Diese Reaktionen können aber allein nicht zu einer Nettoproduktion von Ozon führen. Möglich ist dieses nur, wenn NO zu NO_2 reagiert, ohne O_3 zu verbrauchen. Wichtige Reaktionspartner sind hier das Wasserstoffperoxyradikal (HO_2) und das organische Peroxyradikal (RO_2).



Diese Reaktionen können bei ausreichenden Mengen von NO_x und VOCs (Volatile organic compounds, flüchtige organische Kohlenwasserstoffe) zu einer stark erhöhten Ozonkonzentration führen (GRAEDEL & CRUTZEN, 1994).

Die Verweilzeit von NO_2 in der Atmosphäre ist abhängig von der Reaktionsfähigkeit in der Atmosphäre und am Boden (LAHMANN, 1990). Die Spanne reicht von 1 – 2 Tage (SEINFELD & PANDIS, 2006) bis zu etwa 5 – 7 Tage (LAHMANN, 1990). Mit dem OH-Radikal reagiert das NO_2 zu Salpetersäure (HNO_3). Bei hohen Konzentrationen an OH-Radikalen führt die Reaktion mit NO_2 zu starker Bildung von HNO_3 (SEINFELD & PANDIS, 2006) und senkt somit die NO_2 -Konzentrationen. HNO_3 ist gut wasserlöslich und wird schnell ausgewaschen. Eine weitere Senke ist die trockene Deposition des gebildeten HNO_3 .

Als Hauptemittent für Stickoxide gilt, insbesondere an viel befahrenen Straßen, der Kraftfahrzeugverkehr. Weitere Emittenten sind die Industrie und Kleinfeuerungsanlagen wie der Hausbrand.

In der Bundesrepublik Deutschland wird der Anteil des Kraftfahrzeugverkehrs im Jahr 2006 mit etwa 50 % angegeben (UMWELTBUNDESAMT, 2009 a). In Münster stammen sogar 75 % der emittierten Stickoxide aus dem Verkehr (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Die Tabelle 1 zeigt die Anteile der Emissionsquellen für NO_x in Münster. Die gesamten Emissionen sind dem Luftqualitätsplan der Stadt Münster entnommen und betrugen 2.881 t / a.

Tab. 1: Anteil der Emissionsquellen für NO_x, Bezugsjahre 2004 und 2006 (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009)

Quellen	Emissionen [%]
Industrieanlagen	9
Kleinfuerungsanlagen	16
Verkehr	75

Der Kraftverkehr emittiert Schadstoffe direkt in den Aufenthaltsbereich des Menschen. An viel befahrenen Straßen können diese sofort auf den Menschen wirken. Stickstoffdioxid (NO₂) ist ein Reizgas und wird schon bei Konzentrationen von 200 bis 400 µg / m³ als stechend-stickiger Geruch wahrgenommen (LAHMANN, 1990). Eine Erhöhung der NO₂-Konzentration kann durch die Aufnahme über die Atemwege zu Reizzungen dieser führen (FINLAYSON-PITTS & PITTS, 2000). Die Folge sind Lungenfunktionsstörungen und eine Schwächung des Immunsystems. Somit führen hohe Stickstoffdioxidkonzentrationen auch zu einer erhöhten Häufigkeit von Infektionen der Atemwege. Schon bei einer Zunahme von 10 µg / m³ kann mit einem Anstieg der Häufigkeiten von Bronchitis in der Bevölkerung um ca. 10 % gerechnet werden (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2009). Auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen nehmen mit einem Anstieg der NO₂-Konzentrationen zu.

Bisher konnten jedoch keine Schwellenwerte für Stickstoffdioxid-Konzentrationen ermittelt werden, unter denen eine Gesundheitsgefährdung ausgeschlossen werden kann. In einer Studie an Frauen über die langfristige Wirkung von Feinstaub in NRW wurde aber festgestellt, dass schon eine relativ geringe Reduzierung der NO₂-Konzentrationen dazu beitragen kann, den Gesundheitsschutz zu verbessern (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, 2005). Bei einer Erhöhung der Konzentrationen um 15 µg / m³ steigt dagegen das relative Risiko, an einer Herz-Kreislauf-Erkrankung zu sterben, um die Hälfte.

Durch die Bildung der Salpetersäure (HNO₃) aus der Reaktion des NO₂ mit dem OH-Radikal tragen Stickoxide außerdem zur Bildung von saurem Regen bei (SEINFELD & PANDIS, 2006). Durch den Stickstoffeintrag in Böden und

Gewässer wirken sie eutrophierend. Außerdem sind sie an der Bildung von Feinstaub beteiligt (LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN, 2005).

1.2.2 Rechtliche Grundlagen

Die EU-Rahmenrichtlinie (Umweltbundesamt, 2008 a), auch „Luftqualitäts-Rahmenrichtlinie“ genannt, vom 27. September 1996 setzte die Grundlage über die Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität für die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. Mit der 1. Tochterrichtlinie (Umweltbundesamt, 2008 b) setzte die EU erstmals Grenzwerte für die Konzentrationen von Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft. Im Jahr 2002 wurden diese Richtlinien durch die Novellierung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG) und der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV, 2002) in nationales Recht überführt.

Im Mai 2008 wurde die Richtlinie 2008/50/EG vom Europäischen Parlament und dem Europäischen Rat ergänzend zu den bisherigen Richtlinien beschlossen (Umweltbundesamt, 2008 c). Diese gilt es aber noch in nationales Recht umzusetzen. Die Richtlinie enthält unter anderem neue Begriffsbestimmungen, schärfere Grenzwerte, eine Erweiterung der Möglichkeiten zur Verkehrsbeschränkung und die Neuregelung der Luftqualitätsüberwachung.

Nach den gesetzlichen Vorgaben zur Reinhaltung der Luft gelten seit dem 1. Januar 2005 für Feinstaub und ab dem 1. Januar 2010 für Stickstoffdioxid in der EU einheitliche Grenzwerte, die von den Mitgliedsstaaten einzuhalten sind. Für die Überwachung der Luftqualität betreiben die Umweltämter der Bundesländer Messnetze (Umweltbundesamt, 2008). Werden bei den Luftqualitätsmessungen Überschreitungen der Grenzwerte festgestellt, müssen diese der EU-Kommission spätestens im Jahr nach der Feststellung mitgeteilt werden. Zuständig hierfür sind in der Regel die obersten Landesfachbehörden, welche in NRW das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) darstellt. Innerhalb eines Jahres muss daraufhin ein Luftqualitätsplan (vorher Luftreinhalteplan) mit

Minderungsmaßnahmen aufgestellt werden, die geeignet sind die Luftbelastung dauerhaft und effektiv zu verringern (§ 47 Abs. 1 BImSchG) (BIMSCHG, 2009). Die planaufstellende Behörde ist in NRW die jeweilige Bezirksregierung, in Münster somit die Bezirksregierung Münster. Die Maßnahmen müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllen. Dabei ist festgelegt, dass diese den Schutz von Luft, Boden und Wasser berücksichtigen und nicht gegen die Vorschriften verstößen, die die Gesundheit und Sicherheit von Arbeitnehmern am Arbeitsplatz regeln. Außerdem dürfen die Maßnahmen nicht die Umwelt der anderen Mitgliedsstaaten der EU beeinträchtigen (§ 45 Abs. 2 BImSchG) (BIMSCHG, 2009).

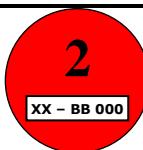
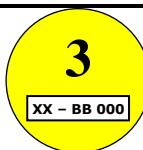
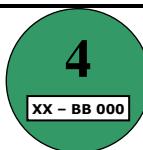
Das Ziel ist es, die Grenzwerte dauerhaft einzuhalten, und im Idealfall dauerhaft zu unterschreiten. Die Maßnahmen richten sich dabei gegen die Emittenten. Sie sind bezogen auf den Verursacheranteil und unterliegen dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit (§ 47 Abs. 4 S. 1 BImSchG) (BIMSCHG, 2009). Zur Planaufstellung einbezogen werden alle potenziell betroffenen Einrichtungen und Behörden, sowie die Öffentlichkeit beteiligt. Die Wirksamkeit der Maßnahmen wird vom LANUV und den beteiligten Institutionen kontrolliert. Sind diese nicht ausreichend müssen sie daraufhin überarbeitet und angepasst werden.

1.2.3 Umweltzonen

Die Umweltzone ist eine Maßnahme im Rahmen der Luftqualitätsplanung. Viele deutsche Städte nutzen mittlerweile das Instrument der Umweltzone (UMWELTBUNDESAMT, 2009), jedoch als Teil eines Bündels von möglichen Instrumenten. Sie stellt ein Gebiet mit festgesetzten Grenzen dar, in dem ein Fahrverbot für Fahrzeuge mit besonders hohem Schadstoffausstoß gilt. Von dieser Maßnahme betroffen sind vor allem Dieselfahrzeuge aufgrund ihrer hohen Feinstaubemissionen, schwere Nutzfahrzeuge und „alte Benziner“ ohne geregelten Katalysator (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2006).

Um in die jeweilige Umweltzone fahren zu dürfen, besteht eine Kennzeichnungspflicht. Alle Fahrzeuge werden in eine von 4 Schadstoffgruppen eingeteilt und durch den Gruppen entsprechende Plaketten gekennzeichnet (Tab. 2).

Tab. 2: Einstufung der Fahrzeuge nach Schadstoffgruppen plus Kennzeichnungsverordnung (UMWELTBUNDESAMT, 2007, verändert)

Schadstoffgruppe	1	2	3	4
Plakette	keine Plakette			
Anforderung für Dieselfahrzeuge	Euro 1 oder schlechter	Euro 2 oder Euro 1 + Partikelfilter	Euro 3 oder Euro 2 + Partikelfilter	Euro 4 oder Euro 3 + Partikelfilter
Anforderung für Benziner	ohne geregelten Katalysator	--	--	Euro 1 mit geregeltem Katalysator oder besser

Dieselfahrzeuge mit Euronorm 1 (Euro 1) oder schlechter, sowie Benziner ohne geregelten Katalysator können keine Plakette erlangen. Benzinbetriebene Fahrzeuge mit geregeltem Katalysator werden ab Euro 1 aufgrund der Emissionswerte der Schadstoffgruppe 4 zugeordnet, sie erhalten damit freie Fahrt in jede Umweltzone. Dieselfahrzeuge dagegen werden noch weiter unterschieden: Fahrzeuge mit Euro 2 oder Euro 1, inklusive Partikelfilter, fallen

in die Schadstoffgruppe 2, Fahrzeuge mit Euro 3 oder Euro 2, inklusive Partikelfilter, zählen zur Schadstoffgruppe 3 und erst Dieselfahrzeuge ab Euro 4 bzw. Euro 3 mit Partikelfilter gelangen in die Schadstoffgruppe 4.

In vielen Städten dürfen zur Einführung der Umweltzone vorerst alle Fahrzeuge mit einer Plakette einfahren. Das Fahrverbot wird jedoch nach und nach auf die Schadstoffgruppen 2 und 3 ausgeweitet, sodass ab einem festgelegten Zeitpunkt nur noch Fahrzeuge der Schadstoffgruppe 4 die Zone befahren dürfen (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2006). Es gibt aber auch generelle Ausnahmen vom Fahrverbot, die von Zone zu Zone variieren können. Fahrzeuge wie z. B. Krankenwagen, Feuerwehr, Polizei, aber auch landwirtschaftliche Fahrzeuge unterliegen nicht der Plakettenpflicht. Die Einfahrt in die Umweltzone wird gekennzeichnet durch entsprechende Schilder. Kontrolliert werden die einfahrenden Fahrzeuge durch die örtliche Polizei (BEZIRKSREGIERUNG KÖLN, 2006).

In Münster wird zum 01.01.2010 eine Umweltzone eingerichtet, welche lediglich von Fahrzeugen der Schadstoffgruppen 3 und 4 befahren werden darf (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Die Einrichtung einer Umweltzone als einzelne Maßnahme ist bisher jedoch nicht ausreichend um eine effiziente Minderung der Schadstoffbelastung zu erreichen (LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN, 2009).

1.2.4 Grenzschichtmeteorologie

In der unteren Schicht der Atmosphäre, der Troposphäre, spielt sich das für den Menschen bedeutende Wetter ab. Die Troposphäre erstreckt sich zwischen 17 km hoch am Äquator und 7 bis 10 km an den Polen (KUTTLER et al., 2005). In unseren Breiten ist sie etwa 11 km hoch. Den oberen Teil bildet die freie Troposphäre, den unteren Teil die planetare Grenzschicht. Diese grenzt an die Erdoberfläche und kann sich von wenigen 100 m Höhe in bis zu 3000 m Höhe ausdehnen (STULL, 1997). Am Boden reagiert sie innerhalb von etwa einer Stunde auf Veränderungen.

Die Mächtigkeit ist abhängig von der Tageszeit und auch von der Jahreszeit. Die vertikale Struktur wird durch den turbulenten Wärme-, Feuchte- und Impulsaustausch zwischen der Oberfläche und der Atmosphäre bestimmt (GUDERIAN, 2000) und ist gekennzeichnet durch den vertikalen Temperaturgradienten. Der adiabatische Temperaturgradient nimmt Werte zwischen -0,5 bis -1 K / 100 m an und bestimmt die vertikale Durchmischung (KUTTLER, 2009).

Bei einer Temperaturinversion, also einer Zunahme der Temperatur mit der Höhe, ist der vertikale Luftmassenaustausch gehemmt oder wird sogar unterdrückt (HÄCKEL, 2008). Man spricht hier von einer stabilen Schichtung. In der Nacht kühlt sich der Boden schneller ab, als die darüber liegenden Luftsichten und es kommt zu einer bodennahen Temperaturinversion. So kann es zu einer Akkumulation emittierter Schadstoffe kommen. Tagsüber wird die Oberfläche durch die Sonneneinstrahlung aufgeheizt und es entstehen thermische Zirkulationen. Die vertikale Durchmischung der Atmosphäre wird dadurch angetrieben und Schadstoffe können abtransportiert oder Konzentrationen dieser verdünnt werden. Wird der Boden stark aufgeheizt, ist die vertikale Temperaturabnahme dementsprechend groß und der Luftmassenaustausch besonders stark ausgeprägt (labile Schichtung). Ist die Abnahme der Temperatur mit der Höhe eher schwach, spricht man von einer neutralen Schichtung (KUTTLER et al., 2005). Im Winter, mit einhergehender geringer Sonneneinstrahlung, reicht die Kraft der Sonne nicht mehr aus, um die Erdoberfläche aufzuheizen. Die Inversion kann somit nicht beseitigt werden.

Eine Akkumulation kann dann sogar über mehrere Tage andauern (GUDERIAN, 2000).

Die planetare Grenzschicht wird entscheidend durch die Wetterlage beeinflusst. Bei Tiefdrucklage setzt sich die freie Troposphäre aufgrund kräftiger Luftbewegungen weit nach unten durch und sorgt für eine gute Durchmischung der Atmosphäre. Innerhalb eines Hochdruckgebietes verhalten sich die Luftmassen dagegen ruhig oder stagnieren (GUDERIAN, 2000).

1.2.5 Angaben zum Stadtgebiet von Münster

Das Stadtgebiet von Münster befindet sich in Nordrhein-Westfalen, im Nordwesten von Deutschland, $7^{\circ}37'43,3''$ östliche Länge und $51^{\circ}57'46,6''$ nördliche Breite. Es erstreckt sich insgesamt über 30.292 ha in der Westfälischen Bucht und zeichnet sich überwiegend durch eine ebene und geringe Reliefstruktur aus. Der niedrigste Punkt liegt an der Ems mit 44 m über NN, der höchste in Nienberge, 97 m über NN. Die Einwohnerzahl von Münster belief sich im Jahr 2007 auf 280.199 Einwohner (STADT MÜNSTER, 2008).

Das Klima ist überwiegend atlantisch geprägt. Milde Luftmassen werden vom Nordost-Atlantik herangeführt, daher ist die Hauptwindrichtung Südwest (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Östliche Windrichtungen mit kontinentalen Luftmassen während Hochdrucklagen kommen in den Übergangsjahreszeiten vor. In den Sommermonaten ist das Azorenhoch verantwortlich für die sonnigen Perioden. Im Jahresmittel beträgt die Temperatur in Münster $9,2^{\circ}\text{C}$ und die jährliche Niederschlagssumme beläuft sich auf 744 mm (STADT MÜNSTER, 2008).

2 Methoden

Die für die Auswertung zu Grunde liegenden Daten aus 2006 und 2007 für Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) wurden vom Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Die aktuellen Daten sind auf der Internetseite des LANUV einsehbar (LANUV NRW, 2009). Die Daten der vergangenen Jahre sind in der LUQS-Datenbank abgelegt.

Die meteorologischen Daten entstammen der Station „Hüffergarten“ auf dem Dach des Instituts für Landschaftsökologie der Universität Münster.

2.1 Messstandorte in Münster

In den Jahren 2006 und 2007 wurden an insgesamt 4 Standorten in Münster Messungen zur Luftqualität vorgenommen. Das LANUV (früher Landesumweltamt NRW) überwacht kontinuierlich an etwa 70 Messstationen in Nordrhein-Westfalen die aktuelle Luftqualität mittels eines Luftqualitätsüberwachungssystems (LUQS). Bei den LUQS-Messstationen in Münster handelt es sich um eine Hintergrundstation in Münster-Geist und drei Verkehrsstationen innerhalb von Münster. Eine Übersicht ist der Abbildung 1 zu entnehmen. Angaben zu den einzelnen Stationen sind in der Tabelle 3 angegeben. Die Informationen zu den Standorten wurden vom LANUV zur Verfügung gestellt und sind auch der Internetseite zu entnehmen (LANUV NRW, 2009).



Abb. 1: Standorte der LUQS-Messstationen in Münster und der Station Hüffergarten; (Universität Münster, ILÖK) (<http://www.openstreetmap.org>) Maßstab: 1 : 25.000

Der Messcontainer der Station Münster-Geist (MSGE) steht in dem Stadtteil Münster-Geist an einem Schulgelände, in unmittelbarer Nähe eines Kleingartenvereins. Ansonsten befinden sich im näheren Umfeld ausschließlich Wohngebäude. Etwa 200 m südlich verläuft die Bundesstraße B 51. In 700 m Entfernung, Richtung Osten, befindet sich die Bundesstraße B 54 und 500 m westlich der Station verläuft die Bundesstraße B 219.

Tab. 3: Angaben zu den LUQS-Stationen in Münster (LANUV NRW) und der Station Hüffergarten

Stationsname	Kürzel	Längen-/ Breitengrad	Höhe über NN [m]	Stationstyp	Mess-zeitraum
Münster-Geist	MSGE	7°36'44" E 51°56'16" N	63	Hintergrund	01.01.2006 - 31.12.2007
Münster, Steinfurter Str.	VMSS	7°36'51" E 51°58'10" N	60	Verkehr/ Hot-Spot	01.01.2006 - 28.12.2006
Münster, Weseler Str.	VMSW	7°37'14" E 51°57'21" N	59	Verkehr/ Hot-Spot	23.11.2006 - 31.12.2007
Münster, Friesenring	VMUE	7°37'9" E 51°58'34" N	60	Verkehr	01.01.2006 - 31.12.2007
Münster, Hüffergarten	-	7°36'27" E 51°57'37" N	78	Meteorologie	01.01.2006 - 31.12.2007

Die Steinfurter Straße befindet sich nordwestlich des Stadtzentrums. Hierbei handelt es sich um eine vierspurige Hauptverkehrsstraße. Die Messstation Münster-Steinfurter Straße (VMSS) stand in dem Messzeitraum auf einem Parkstreifen, auf Höhe der Hausnummer 15. An beiden Straßenseiten stehen vier- bis fünfstöckige Wohngebäude, und auch das gesamte Umfeld besteht aus Wohngebäuden. Die Straße wird viel von Pendler- und Regionalverkehr genutzt, da dort die Bundesstraßen B 51 und B 219 aufeinander treffen. Am 28.12.2006 wurde der Betrieb der Station eingestellt, daher wurden Messwerte dieser Station nur aus dem Jahr 2006 verwendet.

Mit einer Nord-Süd-Ausrichtung befindet sich die Weseler Straße südlich der Innenstadt von Münster. Die Station Münster-Weseler Straße (VMSW) wurde erst am 23.11.2006 in Betrieb genommen. Während des Messzeitraums stand der Messcontainer auf dem Gehweg der Bundesstraße B 219, in etwa 2,5 m Entfernung zur Fahrbahn. Zwischen dem Container und der Fahrbahn befand sich noch ein Fahrradweg. An dem Standort ist die Fahrbahn vierspurig, stadteinwärts befindet sich auch noch eine Rechtsabbiegerspur. Wie an der Steinfurter Straße stehen an beiden Straßenseiten vierstöckige Wohngebäude und auch das Umfeld besteht aus Wohnbebauung. Seit dem 12.01.2009 steht der Messcontainer ca. 150 m weiter südlich.

Der Messcontainer am Friesenring, Ecke Jahnstraße (Münster-Friesenring, VMUE), befand sich während des Messzeitraums etwa 1,5 km nördlich des Stadtzentrums an einer vierspurigen Ringstraße. Dieser wurde nur von der Straßenseite frei angeströmt, da sie in unmittelbarer Nähe zu einem Polizeigebäude stand und von hohem Baumbewuchs umgeben war. Etwa 400 m westlich der Station verläuft die B 219 von Nord nach Süd. Im Umfeld der Station sind sonst nur Wohngebäude zu finden. Seit dem 02.01.2008 ist auch diese Station außer Betrieb.

Die meteorologische Station (Hüffergarten) der Universität Münster steht auf dem Gründach des Instituts für Landschaftsökologie an der Robert-Koch-Straße 28 in einer Höhe von 78 m über NN.

2.2 Messverfahren an den Messcontainern

Die Angaben zu den Messverfahren sind der Internetseite des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen entnommen (LANUV NRW, 2009 a).

Die Konzentrationen von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂) in der Außenluft werden an den kontinuierlich messenden LUQS-Stationen in 3,5 m Höhe über dem Grund gemessen. Dazu wird über einen Schlauch die Luft angesaugt und durch Leitungen in die Messstation geführt. Abbildung 2 zeigt den Messcontainer der Station Münster-Geist.



Abb. 2: LUQS-Messstation im Stadtteil Münster-Geist (Foto: Nina Kampling)

NO und NO₂ werden zusammen in einem Messgerät gemessen. In einer Kammer findet die Reaktion des angesaugten Stickstoffmonoxids mit Ozon statt. Dabei wird eine charakteristische Strahlung emittiert und mittels eines Detektors erfasst. In einer zweiten Kammer wird zeitgleich das angesaugte Stickstoffdioxid mithilfe eines Katalysators zu Stickstoffmonoxid reduziert, welches darauf mit Ozon reagiert. Auch hier wird die emittierte Strahlung erfasst. Das ermittelte Messsignal entspricht der Summe beider Stickoxide. Zur Ermittlung des NO₂ wird das zeitgleich gemessene Stickstoffmonoxidsignal abgezogen.

Diese Erfassung erfolgt im Fünfsekundentakt. Aus den Einzelwerten werden, noch in der Station, Halbstundenmittelwerte gebildet. Diese werden an das LANUV weitergeleitet und dort verarbeitet und gespeichert.

2.3 Allgemeine Angaben zu den Daten

Die Rohwerte für NO und NO₂ stammen aus der LUQS-Datenbank. Es handelt sich hierbei um Halbstundenmittelwerte Mitteleuropäischer Zeit (MEZ) der Stickstoffmonoxid- und Stickstoffdioxidkonzentrationen.

Die Stickoxide (NO, NO₂ und NO_x) sind nicht in Mischungsverhältnissen (ppb) angegeben, da auch die europaweit geltenden Grenzwerte für Stickstoffdioxid die Konzentrationsangaben in $\mu\text{g} / \text{m}^3$ enthalten. So sind sie besser

vergleichbar. Das Volumen bezieht sich hier auf den Normalzustand von 293 K und einem Druck von 1013 hPa (UMWELTBUNDESAMT, 2008 b).

Die meteorologischen Daten von der Station „Hüffergarten“ sind für die verschiedenen Parameter als 10-Minutenwerte angegeben.

Die verwendeten Verkehrsdaten wurden im Rahmen eines Studienprojektes im Jahr 2008 erhoben. Dafür wurden an insgesamt zwei Werktagen, einem Samstag und einem Sonntag Verkehrszählungen an der Weseler Straße durchgeführt und als Stundensummen angegeben (STUDIENPROJEKT STRAßENVERKEHR, 2008) (vgl. Kapitel 3.2).

Die Daten zur Berechnung der Richardson-Zahl wurden an der Steinfurter Straße, 1,6 km nordwestlich des Stadtrandes, im Rahmen einer Doktorarbeit erhoben (GIETL, 2008) (vgl. Kapitel 3.3.3).

2.4 Auswertungsmethoden

2.4.1 Qualitätssicherung

Bevor mit der Datenauswertung begonnen werden konnte, wurden die Rohdaten aufgearbeitet. Zunächst sind negative Werte entfernt worden. Hierbei handelt es sich um Messfehler, die aufgrund sehr geringer Konzentrationen an NO oder NO₂ entstehen können.

Die Messgeräte haben jeweils eine Nachweisgrenze, unter der keine genauen Aussagen über die reale Konzentration gemacht werden können. Die Nachweisgrenze für NO liegt bei 7 µg / m³ und für NO₂ bei 10 µg / m³. Für die Mittelung der Konzentrationen in Stunden-, Tages- oder Jahresmittelwerte und auch für die Berechnung der Mediane wurden Werte unterhalb der Nachweisgrenze mit einbezogen, für die Darstellung von Streudiagrammen wurden diese jedoch nicht berücksichtigt.

Sowohl bei den Messungen der Stickoxide, wie auch bei den meteorologischen Parametern gab es zwischendurch kurze Datenausfälle, die jedoch aufgrund der großen Datenlage nicht wirklich ins Gewicht fallen und somit weitgehend vernachlässigt werden können.

Das NO_x wurde als NO₂ bezogen auf das Molekülge wicht von NO₂ berechnet. Dazu wurde erst das NO als NO₂ berechnet und dann die Summe aus NO (als NO₂) und NO₂ gebildet.

2.4.2 Verwendete Programme

Die Aufbereitung der Daten erfolgte vorwiegend in Excel, die Prüfung der Daten auf Vollständigkeit und Fehler mit dem Programm Time Series Assistant (TSA) von der Arbeitsgruppe Klimatologie des Fachbereichs Geowissenschaften an der Universität Münster.

Statistische Berechnungen über längere Zeiträume wurden mit SPSS 16.0 für Windows vollzogen. Alle anderen statistischen Auswertungen und Berechnungen wurden wieder in Excel durchgeführt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 NO₂-Immissionen in Münster 2006 und 2007

Um einen Überblick über die Verteilung der Stickstoffdioxidimmissionen zu erhalten, wurden die Lage- und Streuungsmaße über ein ganzes Jahr aus den Halbstundenwerten der verschiedenen Stationen berechnet (Tab. 4) (FAHRMEIR et al., 2007).

Tab. 4: Lage- und Streuungsmaße von NO₂ an den LUQS-Stationen

Jahr	MSGE		VMSS		VMSW		VMUE	
	[µg/m³]							
Min	0,01	0,01	0,45	-	-	5,83	0,83	0,32
Perzentil 25	12,94	11,58	25,69	-	-	37,44	19,82	18,45
Median	23,46	19,89	44,14	-	-	59,42	31,95	29,74
Perzentil 75	36,39	32,69	65,00	-	-	88,12	44,83	43,18
Perzentil 95	53,90	51,65	93,59	-	-	127,09	64,13	65,20
Max	92,16	112,19	171,25	-	-	247,96	136,02	146,47
Mittel	25,72	23,28	47,23	-	-	64,80	33,61	32,43

Die Stickstoffdioxidkonzentrationen in Münster lagen in den Jahren 2006 und 2007 an den Stationen Steinfurter Straße (Station VMSS, 2006) und Weseler Straße (Station VMSW, 2007) im Mittel über dem zulässigen Grenzwert von 40 µg / m³ (Tab. 4). Der Mittelwert von 47,2 µg/m³ an der Station VMSS lag allerdings noch innerhalb des Grenzwertes einschließlich der Toleranzmarge von 8 µg / m³ für das Jahr 2006 (BIMSCHV, 2002). An der Weseler Straße (VMSW) gestaltet sich die Situation jedoch kritischer. Mit einem Mittelwert von 64,8 µg / m³ liegt dieser deutlich über dem Grenzwert und war somit ausschlaggebend für die Aufstellung des Luftqualitätsplanes in Münster.

Die Immissionssituation an den beiden Stationen Münster-Geist (MSGE) und Münster-Friesenring (VMUE) ist als unbedenklich im Sinne der Grenzwerte einzustufen. Mit mittleren NO₂-Konzentrationen von 25,7 µg / m³ in 2006 und 23,2 µg / m³ in 2007 an Münster-Geist und 33,6 µg / m³ (2006) und 32,4 µg / m³

(2007) an der Station Münster-Friesenring liegen die Jahresmittel weit unter dem Grenzwert.

Die große Varianz der Werte, die durch die hohe Differenz zwischen Minimum und Maximum und die starke Streuung der Werte aufgezeigt wird, kann auf einen Jahres- oder Tagesgang hinweisen. Die besonders weite Streuung der Werte an den Verkehrsstationen deuten schon hier auf eine hohe Quellstärke.

3.1.1 NO₂-Immissionen im Jahresgang

Um die Immissionssituation an den einzelnen Stationen zu charakterisieren, soll zunächst ein Jahresgang der Stickstoffdioxidkonzentrationen dargestellt werden. Dazu wurde aus den Monatswerten der verschiedenen Stationen der Median berechnet und für die Jahre 2006 und 2007 abgebildet (Abb. 3). Die gesetzlichen Grenzwerte orientieren sich zwar an dem arithmetischen Mittel, statistisch aussagekräftig ist hier jedoch der Median, da die Datensätze nicht normal verteilt sind. Der Mittelwert der jeweiligen Monate lag an allen vier Stationen mehrheitlich über dem Median. Eine Abbildung einschließlich der Mittelwerte ist dem Anhang A zu entnehmen.

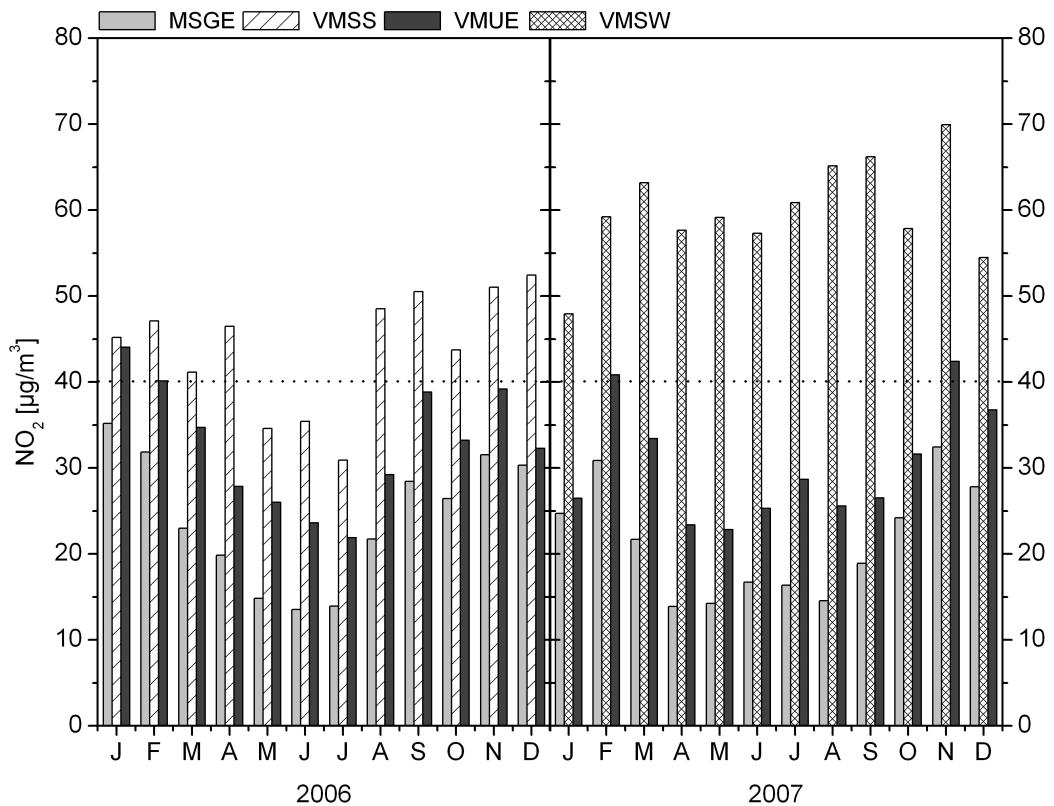


Abb. 3: Monats-Mediane 2006 und 2007 der Stationen Münster-Geist (MSGE), Steinfurter Straße (VMSS, nur 2006), Münster-Friesenring (VMUE) und Weseler Straße (VMSW, nur 2007); die gepunktete Linie markiert den Grenzwert ab 2010

An den Stationen Münster-Geist (MSGE) und Münster-Friesenring (VMUE) ist in 2006 ein deutlicher Jahresgang mit niedrigeren Werten im Sommer und höheren Werten im Winter zu erkennen. Die Stickstoffdioxidkonzentrationen nehmen hier von Januar bis Juni / Juli kontinuierlich ab und steigen dann im August und September wieder an. Von Oktober bis Dezember schwanken dann die Werte um $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, liegen jedoch immer noch über den Werten im Sommer.

Die Konzentrationen an der Steinfurter Straße (VMSS) lassen keinen so deutlichen Jahresgang erkennen, von Mai bis Juni sind sie aber zwischen 5 und $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger als in den Wintermonaten.

Im Jahr 2007 zeigen die Werte an den Stationen Münster-Geist (MSGE) und Münster-Friesenring (VMUE) wieder einen Jahresgang mit geringeren Werten im Sommerhalbjahr von April bis September und höheren Werten im Winter. Während der Sommermonate von Juni bis August unterliegen die Monatsmediane geringen Schwankungen, bleiben aber unter den Werten im

Winter. Auffällig sind hier die Monatsmedianen im Januar und im Dezember. Im Januar liegt der Median an MSGE $5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ unter dem Median im Februar und an VMUE sogar etwa $15 \mu\text{g} / \text{m}^3$ unter dem Wert im Februar. Im Dezember zeigen sich an beiden Stationen um etwa $5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ verringerte Werte im Vergleich zum November.

An der Station Münster-Weseler Straße (VMSW) sind die Konzentrationen ebenfalls im Januar und Dezember geringer als im Februar und im November, ein Jahresgang ist hier aber nicht deutlich auszumachen.

Der Jahresvergleich 2006 und 2007 zeigt klare Übereinstimmungen im jahreszeitlichen Verlauf. Aufgrund der Datenlage von zwei Jahren können hier systematische Aussagen getroffen werden.

Die niedrigeren Werte im Sommer an der Hintergrundstation (MSGE) und der Verkehrsstation am Friesenring (VMUE), die allerdings nicht an einem „Verkehrs-Hot-Spot“ liegt, scheinen ein regelmäßiges Phänomen zu sein. Dass die Schadstoffbelastung der Luft einen jährlichen Gang aufweist, kann zum einen dem erhöhten Verkehrsaufkommen und der Heizperiode in den kälteren Jahreszeiten zugeschrieben werden, zum anderen auch dem besseren Durchmischungsvermögen der Atmosphäre in den Sommermonaten (HELBIG et al., 1999).

An der Steinfurter Straße (VMSS) und der Weseler Straße (VMSW) sind diese Jahresgänge nicht so deutlich ausgeprägt bzw. nicht vorhanden. Meteorologische Einflüsse sind bei dieser Auflösung in Monatsmedianen nicht zu erkennen. Auffallend ist die Häufigkeit, an denen die Monatsmedianen über dem ab 01.01.2010 geltenden Grenzwert (gepunktete Linie) liegen. Während an der Steinfurter Straße die Monatsmedianen zumindest von Mai bis Juli Werte unter dem zukünftigen Grenzwert annehmen, überschreiten die Monatsmedianen diesen an der Weseler Straße ausnahmslos.

Die Station Münster-Geist stellt den städtischen Hintergrund dar. Aufgrund ihrer Lage an einem Schulgelände mit umgebender Wohnbebauung ist sie deutlich weniger beeinflusst von verkehrsbedingten Emissionen. Variationen der Schadstoffkonzentrationen zwischen den Jahren sind somit überwiegend der Meteorologie zuzuschreiben (LANUV NRW, 2009 b).

Anhand der Werte an der Hintergrundstation Münster-Geist (MSGE) kann man meteorologiebedingte Unterschiede zwischen den Jahren sichtbar machen. In der Abbildung 4 sind die Monatsmedianen der Jahre 2006 und 2007 an der Station Münster-Geist gegenübergestellt.

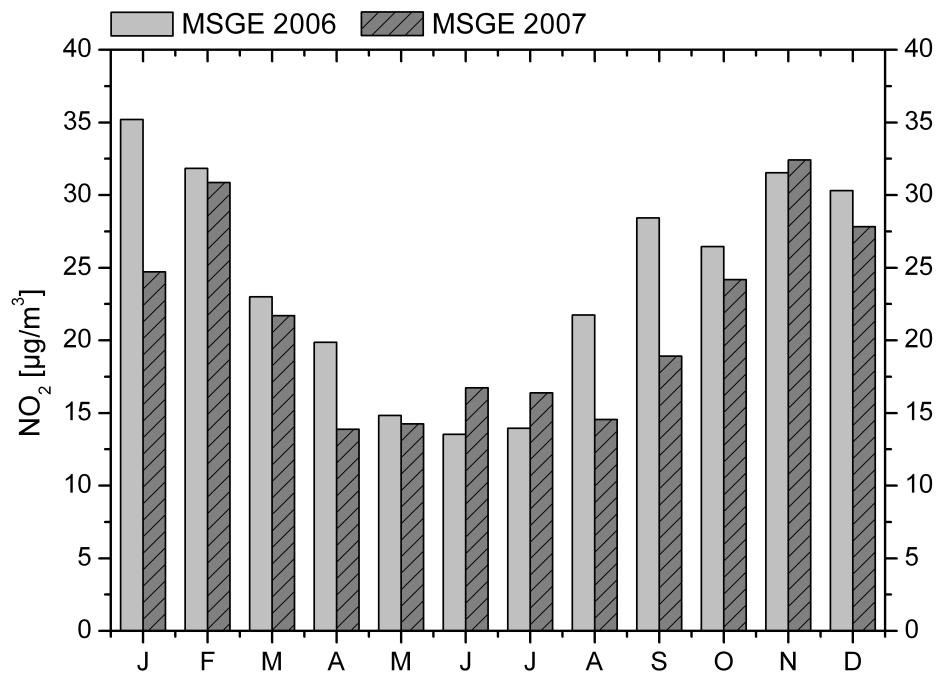


Abb. 4: Monatsmedianen der NO₂-Konzentrationen an der Station MSGE 2006 und 2007

Im Jahresvergleich der einzelnen Monate sind teilweise deutliche Unterschiede im Monatsmedian zu erkennen. Besonders ausgeprägt sind die Abweichungen der Monate Januar, April, August und September im Vergleich der Jahre 2006 und 2007.

Der Monatsmedian nimmt in den genannten Monaten grundsätzlich höhere Werte im Jahr 2006 an. Die Unterschiede betragen im Januar und September ca. 10 µg / m³ und im April und August zwischen 6 und 8 µg / m³.

Bei Betrachtung der Witterungsverhältnisse der angegebenen Monate im Vergleich, konnte kein meteorologischer Parameter identifiziert werden, der generell zu diesen Unterschieden geführt haben könnte. Direkten Einfluss auf die Stickstoffdioxidkonzentrationen nehmen die kurzwellige Einstrahlung, aufgrund der Photolyse von NO₂, und die Windverhältnisse. Sie können Aufschluss geben über Emissionsquellen und die Verteilung der Schadstoffe. Die Großwetterlage beeinflusst den Abtransport. Die Meteorologie in den Jahren 2006 und 2007 wird in Kapitel 3.3.1 dargestellt.

3.1.2 NO₂- und NO_x-Immissionen im Wochenverlauf

Die Belastung der Luft mit Schadstoffen in Städten ist überwiegend anthropogen geprägt (HELBIG et al., 1999). Da die menschliche Aktivität und somit auch der Verkehr eine wöchentliche Periodizität aufweisen, ist insbesondere ein Wochengang der Stickstoffmonoxidimmissionen zu erwarten. Neben den NO₂-Immissionen sind daher in den Abbildungen 5 und 6 auch die NO_x-Immissionen (als NO₂, vgl. Kapitel 2.3.1) dargestellt.

Für die Darstellung des Wochenverlaufs wurden die Mediane der unterschiedlichen Wochentage eines Jahres berechnet. Die gesetzlichen Feiertage wurden zu den Sonntagen hinzugerechnet. Zu beachten sind die unterschiedlichen Konzentrationsbereiche bei NO_x und NO₂.

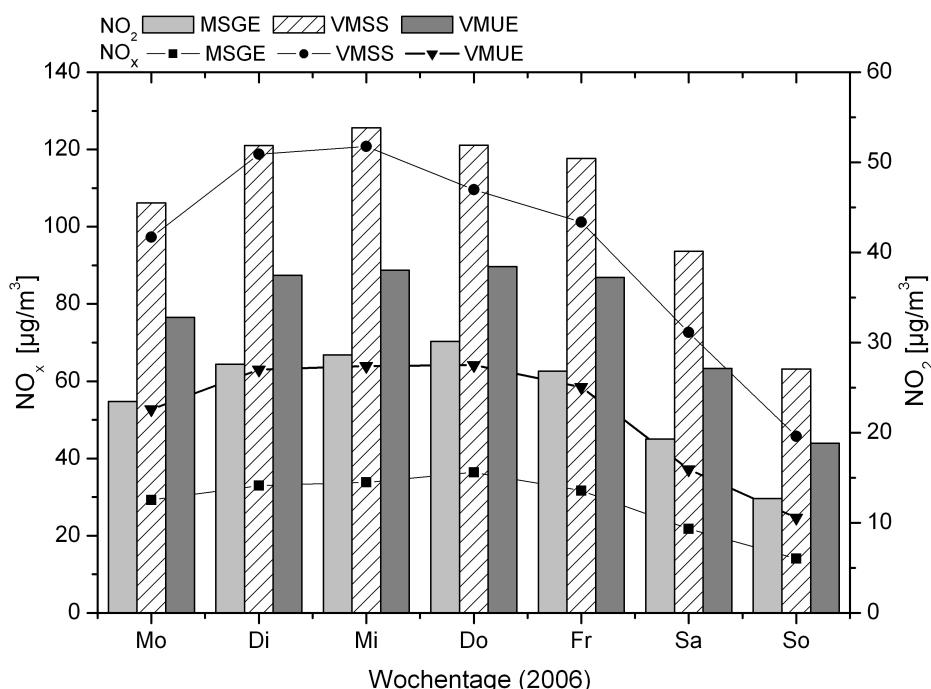


Abb. 5: Median-Wochentage NO_x (als NO₂) und Median-Wochentage NO₂ 2006 der Stationen MSGE, VMSS und VMUE

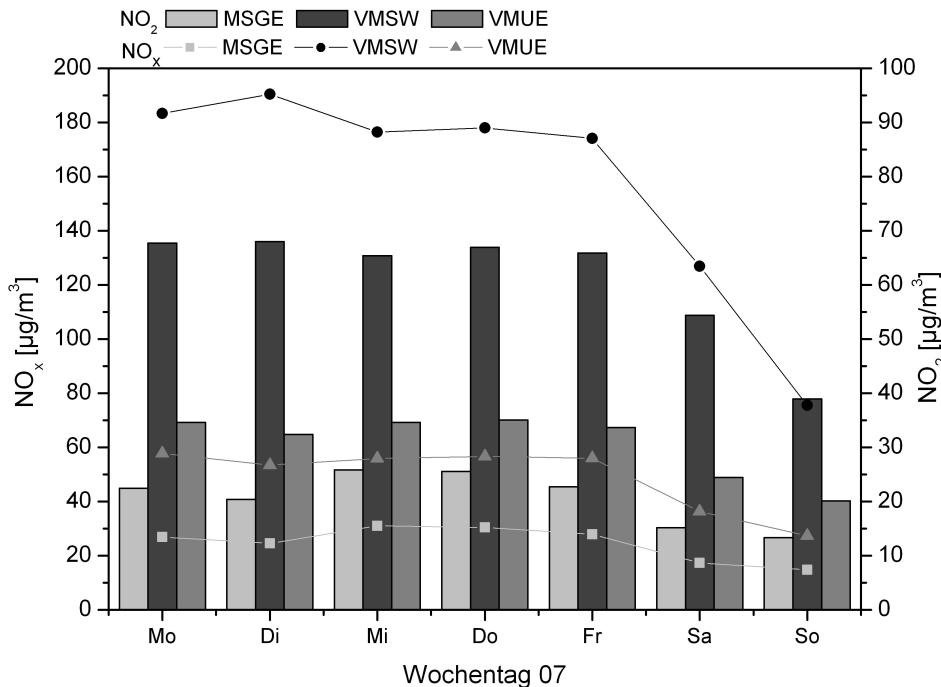


Abb. 6: Median-Wochentage NO_x (als NO₂) und Median-Wochentage NO₂ 2007 der Stationen MSGE, VMSW und VMUE

Der Wochenverlauf der NO₂-Konzentrationen ist an den Stationen Münster-Geist (MSGE) und Münster-Friesenring (VMUE) in beiden Jahren jeweils sehr ähnlich. Im Jahr 2006 ist an diesen Stationen ein kontinuierlicher Anstieg der NO₂-Konzentrationen von Montag bis Donnerstag zu beobachten. Am Freitag nehmen die NO₂-Immissionen zunächst unwesentlich ab und sinken schließlich am Wochenende beachtlich (Abb. 5).

Ähnlich ist der Verlauf in 2007 (Abb. 6). Hier ist der Anstieg an den Stationen MSGE und VMUE diskontinuierlich, mit zunächst höheren Werten am Montag als am Dienstag. Der Wochengang ist an diesen Stationen auch nicht so ausgeprägt wie in 2006. Aber auch hier befindet sich das Maximum am Donnerstag.

Der Sonntag ist der Tag mit den niedrigsten Konzentrationen an allen vier Stationen in beiden Jahren.

An der Station VMSS ist in 2006 ebenfalls ein deutlicher Wochengang zu erkennen mit einem Maximum am Mittwoch und dem Minimum am Sonntag.

Die Station an der Weseler Straße (VMSW) weist solch ein Maximum jedoch nicht auf. Hier sind die Konzentrationen an den Werktagen auf relativ konstantem und deutlich höherem Niveau. Die starke Abnahme von Freitag bis Sonntag um etwa 25 µg / m³ ist aber auch hier offensichtlich. Insgesamt sind

die NO₂-Immissionen an Sonn- und Feiertagen im Durchschnitt 31 % geringer als an Werktagen.

Der Wochengang der Stickoxide verläuft nahezu analog zu dem des Stickstoffdioxids. Der Zusammenhang beider Gase ist hier gut zu erkennen.

3.1.3 Tagesgänge der NO₂-Immissionen

Um die Intensität des Verkehrs und dessen zeitliche Variation darzustellen, werden die Mediantagesgänge der Werkstage, der Samstage und der Sonn- und Feiertage der Stationen aus 2006 gegenübergestellt (Abb. 7). Die Tagesgänge nehmen aber in beiden Jahren einen sehr ähnlichen Verlauf an. Eine Abbildung der Mediantagesgänge im Jahr 2007 an der Station Münster-Weseler Straße (VMSW) ist dem Anhang zu entnehmen (vgl. Anhang B).

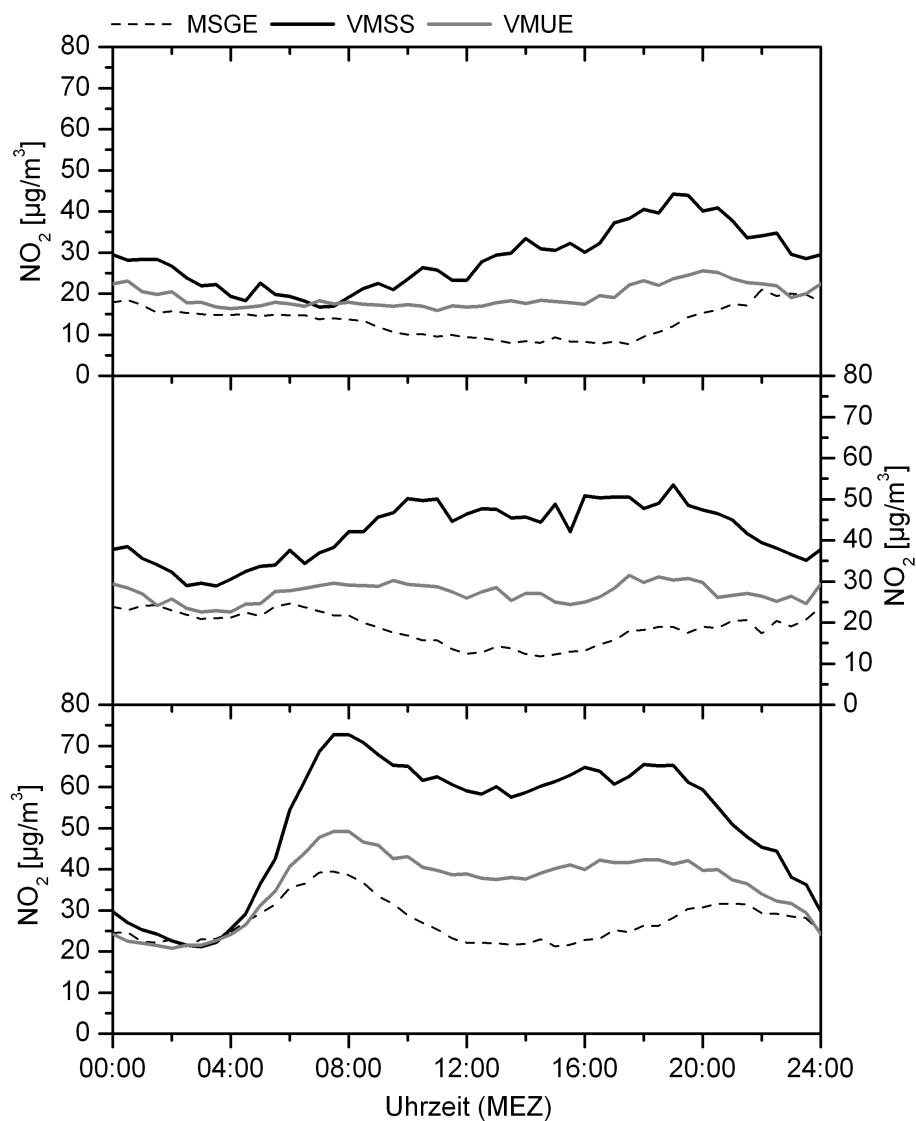


Abb. 7: Mediantagesgänge 2006 der Stationen MSGE, VMSS und VMUE werktags (unten), samstags (Mitte) und sonntags (oben)

Die Stickstoffdioxidimmissionen zeigen an den Werktagen an allen Stationen einen deutlichen Tagesgang mit jeweils einem Peak am morgen und einem

Peak am Abend. Nach 4:00 Uhr morgens steigen die Konzentrationen an und erreichen um etwa 8:00 Uhr ihr Maximum. Danach fallen sie zum Mittag ab und steigen dann noch einmal, einhergehend mit dem Feierabendverkehr, bis etwa 19:00 Uhr an den Verkehrsstationen Stationen (VMSS und VMUE) und bis etwa 21:00 Uhr an der Hintergrundstation (MSGE). Der zweite Peak ist an allen Stationen auf einer geringeren Konzentrationshöhe als der erste Peak der jeweiligen Station. In der Nacht sinken die Konzentrationen dann erneut.

Der Anstieg und Abfall ist an den einzelnen Stationen unterschiedlich ausgeprägt. An der verkehrsreichen Steinfurter Straße ist der Anstieg von im Minimum etwa $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$ bis zum Maximum von ca. $72 \mu\text{g} / \text{m}^3$ am stärksten. Genauso stark ist der Abfall während der Nacht. Dagegen ist die Abnahme zur Mittagszeit im Verhältnis gering. Im Gegensatz dazu steigen die Immissionen an der Station Münster-Geist (MSGE) von ebenso $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im Minimum auf knapp $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im ersten Peak. Danach sinken die Immissionen aber wieder bis auf das Ausgangsniveau von $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$ und steigen dann noch einmal um etwa $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$ bevor sie erneut in der Nacht um die gleiche Höhe abnehmen. An der Station Münster-Friesenring ist der Verlauf dem an der Station Münster-Steinfurter Straße sehr ähnlich, nur bewegen sich die Immissionen während des Tages zwischen 40 und $50 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Auch wenn die Immissionen an allen Stationen unterschiedlich hoch sind, sinken diese in der Nacht auf das etwa gleiche Niveau von $25 – 30 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Ursächlich ist hier die Reaktion von NO_2 mit OH-Radikalen. NO_2 kann nachts nicht photolysiert werden und reagiert mit dem OH-Radikal zu HNO_3 (SEINFELD & PANDIS, 2006) (vgl. Kapitel 1.2.1).

Der Verkehrsanteil nimmt von der Station an der Steinfurter Straße (VMSS) über die Station am Friesenring (VMUE) bis zur Hintergrundstation (MSGE) ab. Die Abbildung spiegelt dieses wider. Die Immissionshöhen nehmen in dieser Reihenfolge ebenso ab wie der Tagesgang in dieser Reihenfolge weniger ausgeprägt ist.

Um die Verkehrsspitzen unabhängig von der Immissionshöhe darzustellen wurden zusätzlich die relativen Mediantagesgänge berechnet. Dazu wurden Minima und Maxima der einzelnen Werkstage berechnet, jeweils als 0 % und 100 % gesetzt und in Relation dazu der Anteil der restlichen Halbstundenwerte

des Tages berechnet (Abbildung 8). Aus diesen Werten wurde dann der Median zu den einzelnen Uhrzeiten gebildet.

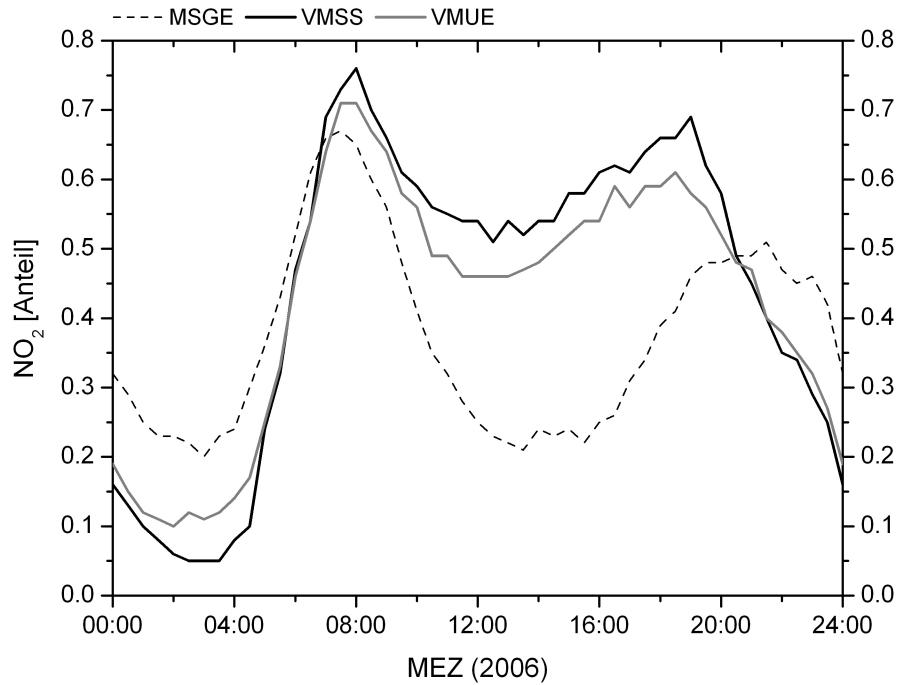


Abb. 8: Relative Mediantagesgänge der Stationen VMSS, VMUE und MSGE, werktags

Hier fällt auf, dass der Peak am Morgen an allen Stationen höher ausfällt, als der zweite Peak am Nachmittag. Für den starken Anstieg am Morgen ist der Schichtungszustand der Atmosphäre verantwortlich. Die nächtliche Inversion ist noch nicht vollständig aufgelöst, und somit die Durchmischung der Luftmassen noch stark eingeschränkt. Durch den morgendlichen Berufsverkehr nehmen die NO-Konzentrationen stark zu. Dieses reagiert dann sehr schnell mit dem bodennahen Ozon zu NO₂ (vgl. Kapitel 1.2.1, Gleichung 1.3).

Zur Mittagszeit sinken die Stickstoffdioxidkonzentrationen an der Station Münster-Geist bis fast auf das Minimum des Tages. An den beiden Verkehrsstationen sinken die Konzentrationen nur um etwa 20 – 30 %.

Das Absinken zur Mittagszeit ist auf mehrere Einflussfaktoren zurückzuführen. Die Zahl der Kraftfahrzeuge und somit die verkehrsbedingten Emissionen nehmen zur Mittagszeit zwischenzeitlich ab und die Sonneneinstrahlung und somit auch die potentielle Photolyserate von NO₂ nehmen zu (vgl. Kapitel 1.2.1, Gleichung 1.1). Durch die erhöhte Einstrahlung wird außerdem der Boden

stärker erwärmt, wodurch die Konvektion vermehrt und somit die vertikale Durchmischung der Atmosphäre gefördert wird (HÄCKEL, 2008).

An den Samstagen, Sonn- und Feiertagen sind an den Stationen VMUE und MSGE anhand der Abbildung 7 keine Tagesgänge erkennbar. Bei der verkehrsreichen Station VMSS sind zwar Konzentrationsunterschiede am Wochenende im Verlauf erkennbar aber anhand dieser Grafik nicht eindeutig zuzuordnen. Am Samstag sinken die Konzentrationen nachts erst ab und steigen ab etwa 8 Uhr morgens. Der Anstieg erfolgt bis etwa 11 Uhr. Danach bleiben die NO₂-Immissionen auf einem relativ konstanten Niveau. Ab 20 Uhr sinken dann die Konzentrationen wieder.

Die Abbildung 9 stellt die relativen Mediantagesgänge der Samstage in 2006 dar.

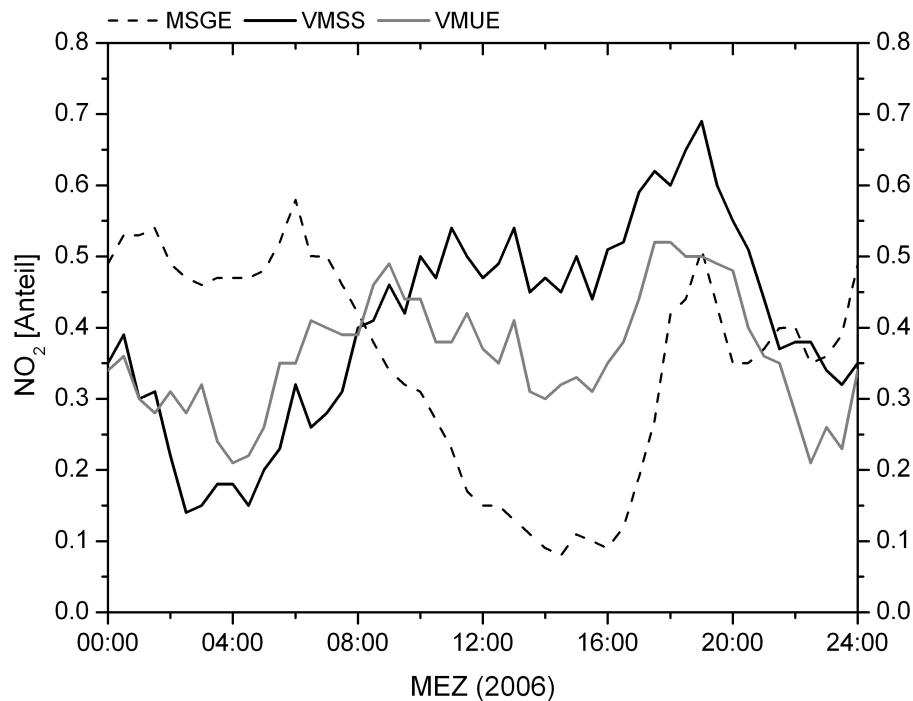


Abb. 9: Relative Mediantagesgänge der NO₂-Immissionen 2006 an MSGE, VMUE und VMSS, samstags

Unterschiede im Tagesverlauf sind anhand der Abbildung 9 feststellbar. Während die Immissionen an der Steinfurter Straße ab 4:00 Uhr fast kontinuierlich bis etwa 19:00 Uhr ansteigen und danach stark abfallen, sinken sie an der Station Münster-Geist ab etwa 6:00 Uhr und steigen erst ab ca. 16:00 Uhr wieder an. Die Immissionen am Friesenring (VMUE) verhalten sich denen an der Steinfurter Straße (VMSS) sehr ähnlich. Abbildung 10 stellt die

relativen Mediantagesgänge an den Sonn- und Feiertagen der drei Stationen dar.

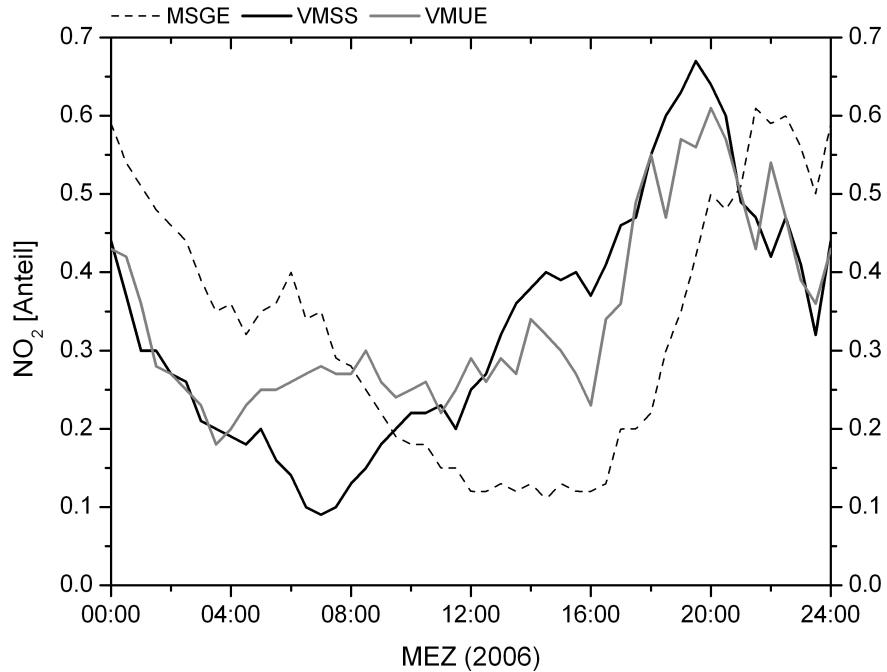


Abb. 10: Relative Mediantagesgänge der NO₂-Immissionen 2006 an MSGE (hellgraue Linie), VMUE (graue Linie) und VMSS (schwarze Linie), Sonn- und Feiertage

An den Sonn- und Feiertagen gibt es einen deutlichen Peak der NO₂-Konzentrationen am frühen Abend an den beiden Verkehrsstationen. Die Werte an der Station MSGE dagegen sinken von 0:00 Uhr bis 12:00 Uhr, mit einem zwischenzeitlichen geringen Anstieg zwischen 5:00 Uhr und 6:00 Uhr morgens. Von 12:00 Uhr bis 16:00 Uhr bleiben sie auf einem relativ konstanten Niveau und steigen dann wieder stark bis um ca. 21:00 Uhr an. Somit sind hier die hohen Werte in der Nacht zu verzeichnen und die niedrigen am Tag.

3.1.4 Bewertung der Jahres-, Wochen- und Tagesgänge

Ein Einfluss meteorologischer Parameter, die sich im Jahresverlauf aufgrund der Jahreszeiten ständig ändern, ist an den Stationen Münster-Friesenring und Münster-Geist eindeutig feststellbar. Im Winter treten häufiger Inversionswetterlagen auf, die den Abtransport der Stickoxide nahezu verhindern. Dadurch kann eine Akkumulation dieser auftreten (HELBIG et al.,

1999). Die höheren Immissionen im Winter sind zum Teil aber auch bedingt durch das Heizverhalten der Bevölkerung und dem höheren Verkehrsanteil. Im Sommer dagegen werden bedingt durch die erhöhte Sonneneinstrahlung die Luftmassen in Bodennähe stärker aufgeheizt und somit die Durchmischung der Bodennahen Luftmassen verstärkt. Dieses führt zu einem besseren Abtransport der Schadstoffe.

Die Verkehrsstationen an der Steinfurter Straße und der Weseler Straße zeigen diese jahreszeitlichen Unterschiede kaum. Der Einfluss des Verkehrs scheint an diesen Stationen bedeutend stärker zu sein. Sowohl die Steinfurter Straße als auch die Weseler Straße werden vorwiegend durch Regional- und Durchgangsverkehr geprägt. Etwa 30 % der Einwohnerzahl von Münster pendelt täglich ein und aus (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009).

Beide Straßen werden von Pendlern aus dem und in das Umland genutzt und dienen auch dem Lieferverkehr. Der Einfluss des Verkehrs wird in Kapitel 3.2 anhand der Station an der Weseler Straße abgeschätzt.

Die Verläufe der Wochen- und Tagesgänge der NO₂-Immissionen geben klar die Mobilität der Bevölkerung wieder. Höhere Werte an den Werktagen und deutlich niedrigere am Wochenende resultieren hauptsächlich aus dem Verkehr. Von Montag bis Freitag ist das Verkehrsaufkommen deutlich höher als am Wochenende, wobei dieses von Samstag bis Sonntag noch weiter abnimmt.

Während die Werte in der Nacht deutlich geringer sind, sind die beiden Peaks am Morgen und am Abend auf den Berufsverkehr zurückzuführen. Auch am Wochenende ist der Verlauf an der Steinfurter Straße und am Friesenring auf den Verkehr zurückzuführen.

An Werktagen ist dieser sogar bis in den Hintergrund hinein erkennbar. An den Wochenenden deutet der Verlauf an Münster-Geist jedoch auf keinen Einfluss des Verkehrs.

Für charakteristische Tagesgänge eines Luftschadstoffes sind somit mehrere Faktoren verantwortlich. Die meteorologischen Parameter dürfen als Einflussfaktoren nicht vernachlässigt werden. In Kapitel 3.3 werden diese speziell an der Weseler Straße untersucht.

3.2 Abschätzung des Einflusses vom Straßenverkehr auf die NO₂-Immissionen

Die hohen NO_x-Immissionen und die große Varianz im Tagesverlauf an der Weseler Straße deuten auf einen örtlich nahen Emittenten hin. Laut Luftqualitätsplan für das Stadtgebiet Münster stammen an der Weseler Straße etwa 75 % der NO₂-Immissionen aus dem Verkehr (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Um den Zusammenhang zwischen hohen NO₂-Immissionen und starkem Kraftfahrzeugverkehr darzustellen wurden Verkehrszählungen aus dem Studienprojekt 2008 „Straßenverkehr“ an der Weseler Straße mit den Stickoxiddaten aus dem Jahr 2007, ebenfalls von der Weseler Straße, korreliert. Die Fahrzeuge wurden innerhalb von drei Intervallen gezählt, das erste Intervall ist von 0:00 Uhr bis 4:00 Uhr, das zweite geht von 7:00 Uhr bis 13:00 Uhr und das dritte von 13:00 Uhr bis 19:00 Uhr. Bei den Werten handelt es sich um die Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde. Die Art der Fahrzeuge wurde nicht unterschieden. Da die Verkehrszählungen in 2008 durchgeführt wurden, die Stickoxiddaten jedoch aus 2007 stammen, ist das Ergebnis vorsichtig zu betrachten. Die Fahrzeuge wurden außerdem mithilfe einer Kamera automatisch gezählt, daher sind die Werte nicht ganz exakt. Sie geben aber einen klaren Trend wieder und sind durchaus für Korrelationsanalysen geeignet.

In Abbildung 11 sind die Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde, gemittelt aus zwei Werktagen, aufgetragen. Dazu sind die Mediantagesgänge von NO und NO₂ der Werkstage (aus Halbstundenwerten) an der Weseler Straße dargestellt. Die Intervalle zeigen klare Unterschiede im Verkehrsaufkommen mit Höchstwerten der passierten Fahrzeuge am Tag und geringem Kraftverkehr in der Nacht. Zwei Peaks sind während der Hauptverkehrszeit zu erkennen. Die Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde nimmt in der Nacht von ca. 650 Fahrzeugen zwischen 0:00 Uhr und 1:00 Uhr bis auf etwa 250 Fahrzeuge in der Zeit zwischen 3:00 Uhr und 4:00 Uhr morgens ab. Einhergehend mit dieser Abnahme sinken auch die NO- und NO₂-Konzentrationen von 0:00 Uhr bis 4:00 Uhr. In der Zeit von 7:00 Uhr bis 8:00 Uhr ist das Verkehrsaufkommen bereits mit 2500 Fahrzeugen sehr hoch und erreicht sein erstes Maximum um

11:00 Uhr. Um 12:00 Uhr ist dann ein starker Einbruch der Anzahl um etwa die Hälfte zu verzeichnen. Um 13:00 Uhr ist die Zahl der Fahrzeuge aber schon wieder knapp verdoppelt. Aufgrund der geringen Datenlage von zwei Werktagen und der bereits beschriebenen relativen Ungenauigkeit ist es fraglich, ob der Einbruch zur Mittagszeit tatsächlich so extrem ausfällt. Ein Einbruch an dieser Stelle ist aber realistisch.

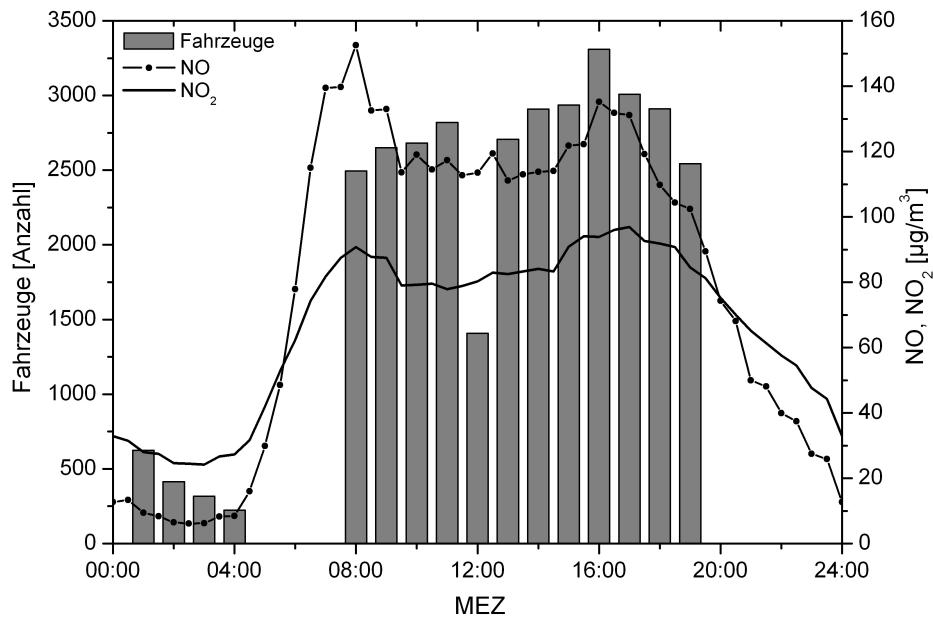


Abb. 11: Fahrzeuge pro Stunde, gemittelt aus 2 Werktagen (Weseler Straße, 2008) und Mediantagesgänge von NO und NO₂ aus 2007 (werktags, VMSW)

Das zweite Maximum der Fahrzeuganzahl wird um 16:00 Uhr passend zum Feierabendverkehr erreicht. Ab 18:00 Uhr sinken die Werte wieder stärker. Einhergehend mit der Zu- und Abnahme der Fahrzeuganzahl nehmen auch die NO- und NO₂-Immissionen zum einsetzenden Berufsverkehr deutlich zu. Ihr Maximum erreichen sie jedoch bereits um 8:00 Uhr. Zum Mittag sinken die Immissionen wieder und erreichen ebenso um 16:00 Uhr ihr zweites Maximum. Auffällig sind hier die im Bezug zu den NO₂-Immissionen geringeren NO-Immissionen während der Nacht und die darauf extrem höheren NO-Immissionen während des Tages. In der Nacht reagiert das emittierte NO mit dem bodennahen Ozon zu NO₂ (vgl. Kapitel 1.2.1, Gleichung 1.3). Durch die fehlende Sonneinstrahlung wird das gebildete NO₂ jedoch nicht photolysiert und verbleibt durch die nächtliche Inversion überwiegend in Bodennähe. Am Tag sind die verkehrsbedingten Emissionen so hoch, dass kontinuierlich NO

nachgeliefert wird, welches anteilig am NO_x zu 90 % emittiert wird (SEINFELD & PANDIS, 2006). Zudem wird das NO₂ durch Photolyse wieder zu NO reduziert (vgl. Kapitel 1.2.1).

Abbildung 12 zeigt die gleichen Parameter an einem Sonntag. Die Werte der passierten Fahrzeuge stammen hier aus der Zählung nur eines einzigen Sonntags. Die Mediane der Immissionen jedoch wieder aus allen Sonntagen eines ganzen Jahres, einschließlich der Feiertage. Eine Aussage ist trotzdem möglich.

Hier wurden deutlich mehr Fahrzeuge in den nächtlichen Stunden registriert. Wie an den Werktagen sinken die Werte von 0:00 Uhr bis 4:00 Uhr morgens. Ein Minimum wird aber erst am Morgen gegen acht Uhr erreicht. Danach steigen die Zahlen wieder an und erreichen ein Maximum gegen 16:00 Uhr.

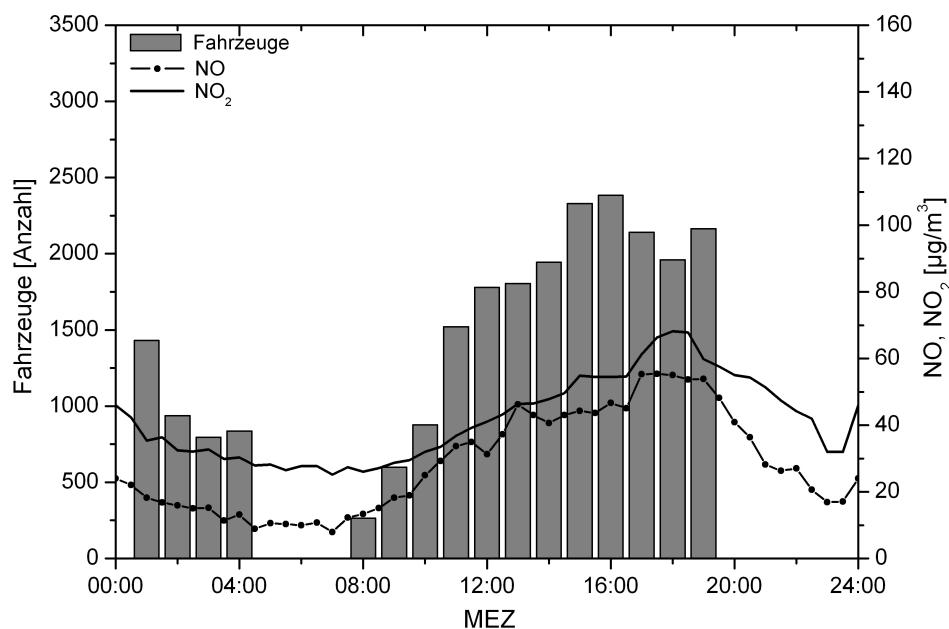


Abb. 12: Fahrzeuge pro Stunde an einem Sonntag 2008 (Weseler Straße), Mediantagesgänge 2007 von NO und NO₂ (sonntags, VMSW)

Ein Zusammenhang ist auch hier unverkennbar. Mit der steigenden Anzahl der Fahrzeuge während des Tages steigen auch die Konzentrationen der Stickoxide. Ein Maximum der Fahrzeuganzahl wird gegen 16:00 Uhr erreicht. Die Stickstoffmonoxidimmissionen und die Stickstoffdioxidimmissionen sind aber erst um 18:00 Uhr auf ihrem Tagesmaximum. Das Fehlen des Berufverkehrs wird hier deutlich durch die geringe Anzahl der Fahrzeuge gegen

acht Uhr (ca. 250 Fahrzeuge pro Stunde) und den daraufhin auch nur langsamem Anstieg der Zahlen. Die im Vergleich zum Werktag hohe Anzahl in der Nacht ist auf das Ausgehverhalten der Bevölkerung zurückzuführen.

An diesem Sonntag wurden etwa 30 % weniger Fahrzeuge als an den Werktagen gezählt. Zu erwähnen ist hier aber, dass eine NO₂-Minderung an den Sonn- und Feiertagen gegenüber den Werktagen von ca. 40 % festgestellt wurde (vgl. Kapitel 3.1.2).

Im Gegensatz zu den Werktagen liegen sonntags die NO₂-Konzentrationen außerdem grundsätzlich über den NO-Konzentrationen.

Dass die NO₂-Immissionen mit steigendem Kraftfahrzeugverkehr zunehmen, verdeutlicht die Abbildung 13. Für das Streudiagramm wurden alle Werkstage aus dem Jahr 2007 zusammengefasst und Stundenmittel der NO₂-Konzentrationen zu den jeweiligen Uhrzeiten gebildet. Es wurde somit ein mittlerer Werktag der NO₂-Immissionen mit einem mittleren Werktag der Fahrzeuge pro Stunde korreliert, aufgrund des geringen Datensatzes bezüglich der Fahrzeuganzahl.

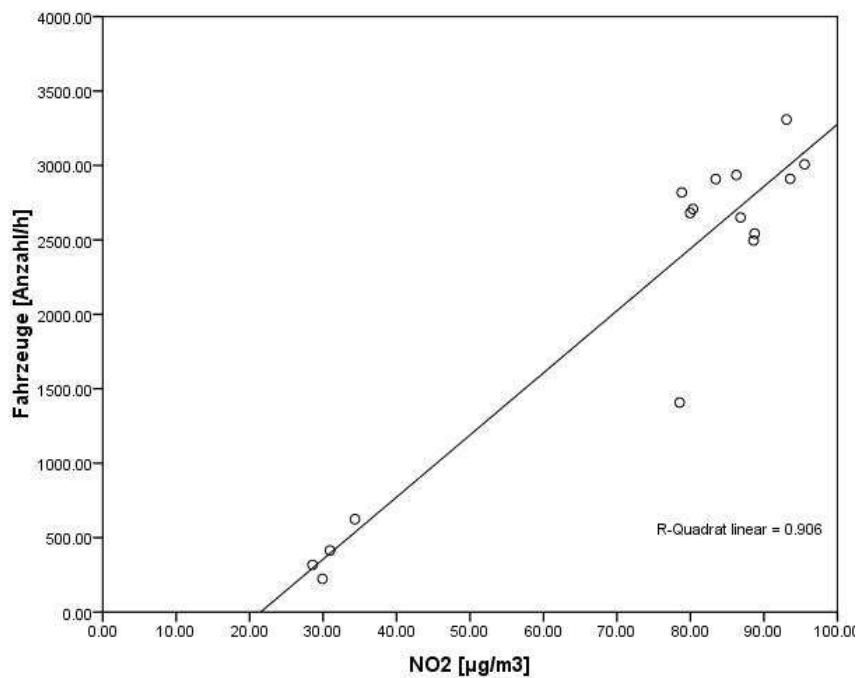


Abb. 13: Korrelation der Stickstoffdioxidkonzentrationen mit der Anzahl der Fahrzeuge an Weseler Straße 2007

Eine Korrelation der Stickstoffdioxidemissionen eines mittleren Werktages mit den gezählten Fahrzeugen pro Stunde ergab einen Korrelationskoeffizienten nach Pearson von $r=0,95$ (FAHRMEIR et al, 2007). Somit ist eine sehr starke Korrelation vorhanden. Eine Lineare Regression ist hier jedoch nicht anwendbar, da die automatische Datenerfassung zu viele Fehler enthält und es sich auch nur um 2 erfasste Tage handelt.

Wie bereits erwähnt, wurde bei der Verkehrszählung die Art der Fahrzeuge nicht unterschieden. Aus dem Luftqualitätsplan der Stadt Münster geht jedoch hervor, dass etwa 11 % der NO₂-Belastung an der Weseler Straße der Verursachergruppe der schweren Nutzfahrzeuge ohne Busse zuzuschreiben ist (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Sechsundzwanzig Prozent der NO₂-Belastung fallen demnach auf die Verursachergruppe PKW (direkt an der Weseler Straße) und 15 % auf den urbanen Kraftfahrzeugverkehr. Im gesamten Luftqualitätsplangebiet, dessen Grenze gleichzeitig die Stadtgrenze ist, wird für das Jahr 2010 ein Anteil von 55 % der NO_x-Emissionen prognostiziert, die von schweren Nutzfahrzeugen ohne Busse verursacht werden.

3.3 Abschätzung des Einflusses meteorologischer Parameter auf die NO₂-Immissionen

Die Belastung der Luft mit Schadstoffen wird auch beeinflusst durch die Meteorologie. Eine gute vertikale Durchmischung der Atmosphäre kann zu einer schnellen Verteilung der Luftschatstoffe und somit zu einer Abnahme der Konzentrationen frisch emittierter Stoffe führen. Die Voraussetzungen für eine gute Durchmischung wurden bereits in Kapitel 1.2.4 beschrieben.

Hohe Windgeschwindigkeiten bewirken einen schnellen Abtransport der Schadstoffe. Außerdem kann durch bestimmte Windrichtungen „frische“ Luft aus weniger belasteten Gebieten herantransportiert werden. In bebautem Gebiet spielen auch die Bebauungsdichte und die Höhe der Bauten eine Rolle. Diese können Einfluss auf die Windrichtung und Windgeschwindigkeit nehmen, sodass es zu Turbulenzen und somit zu speziellen Verteilungen der Schadstoffe kommen kann (OKE, 1987).

Eine allgemeine Aussage über die Art und Höhe des Einflusses der jeweiligen meteorologischen Parameter ist nicht so einfach möglich. Um die Einflüsse in Münster abschätzen zu können, wurden verschiedene Korrelationsanalysen zwischen Stickstoffdioxidimissionen und ausgewählten meteorologischen Parametern durchgeführt.

Da die größten Belastungen an der Weseler Straße festgestellt wurden, finden Analysen im Wesentlichen an der Station VMSW statt.

3.3.1 Meteorologie in Münster 2006 und 2007

Zunächst werden die meteorologischen Verhältnisse der Jahre 2006 und 2007 im Gesamten betrachtet.

Abbildung 14 zeigt die mittleren Monatstemperaturen und die monatlichen Niederschlagssummen der beiden Jahre im Vergleich untereinander und im Vergleich zum mittleren monatlichen Klima in Münster. Die Werte für 2006 und 2007 wurden auf der Basis von Halbstundenwerten berechnet. Entnommen

sind die Daten der Station Hüffergarten. Die Werte für das mittlere Klima stammen von der Internetseite des Instituts für Landschaftsökologie, Arbeitsgruppe Klimatologie. Die Basisdaten wurden der Station Münster Zoo vom Deutschen Wetterdienst (DWD) aus dem Zeitraum von 1961 bis 1990 entnommen. Zudem sind die Jahresmittelwerte der Temperatur und die Summe des Niederschlages des jeweiligen Jahres und im langjährigen Mittel angegeben.

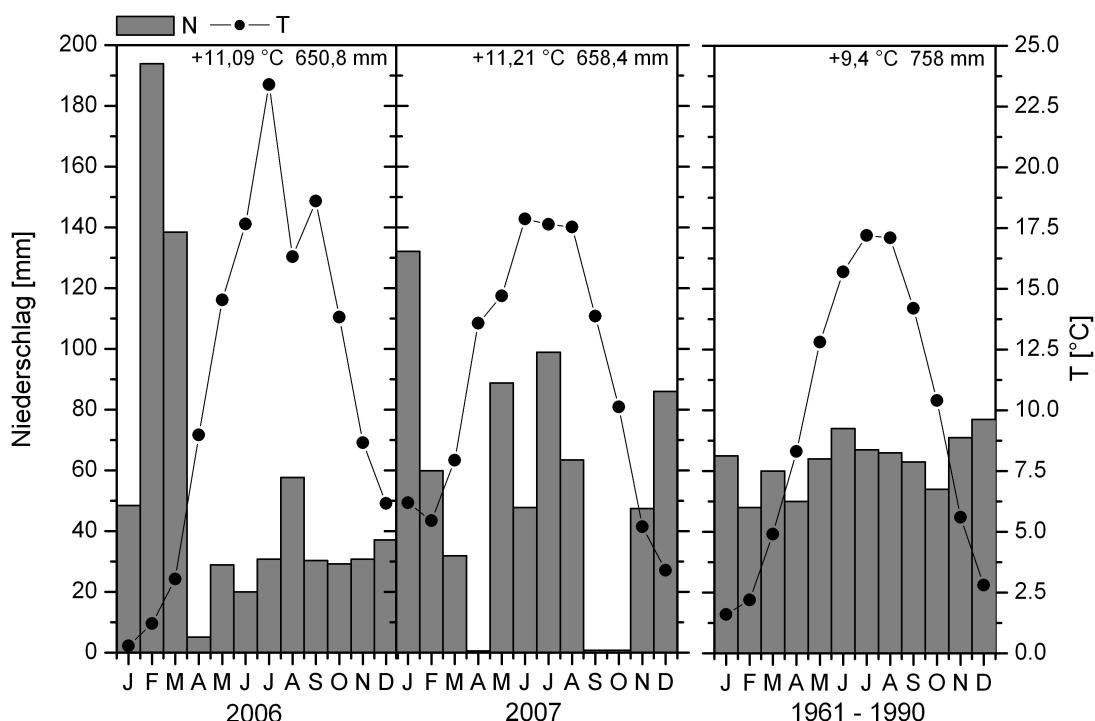


Abb. 14: Mittlere monatliche Temperatur und monatliche Niederschlagssummen 2006 und 2007 (Station Hüffergarten) und mittleres monatliches Klima (1961 – 1990) in Münster (Station Münster Zoo, DWD)

Die mittleren Jahrestemperaturen und die Niederschlagssummen der Jahre 2006 und 2007 in Münster weichen um etwa 1,7 °C bzw. 1,8 °C von den langjährigen Mittelwerten ab. Auch die monatlichen Niederschlagssummen im Jahresverlauf zeigen starke Abweichungen im Jahresvergleich und im Vergleich zum mittleren Klima.

Mit +11,09 °C im Jahr 2006 und +11,21 °C in 2007 liegen die mittleren Jahrestemperaturen eng beieinander. Im Vergleich zur langjährigen mittleren Temperatur von +9,4 °C ist jedoch eine deutliche Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur zu verzeichnen. Die Jahressumme der Niederschläge mit 650,8 mm im Jahr 2006 und 658,4 mm im Jahr 2007 zeigt, dass in beiden

Jahren vergleichbare Mengen an Niederschlag auftraten. Im Vergleich zum langjährigen Mittel von 758 mm ist jedoch weniger Niederschlag gefallen. Solche Abweichungen der Einzeljahre von den Mittelwerten sind jedoch nicht ungewöhnlich (HÄCKEL, 2008).

Die Verteilung des Niederschlags auf die Monate stellt sich in 2006 völlig anders als in 2007 dar. Im Januar 2006 fielen nur etwa 49 mm. Im Januar 2007 betrug die Summe der Niederschläge ca. 132 mm. Im Februar dagegen fielen im Jahr 2006 mehr als 190 mm, im Jahr 2007 jedoch nur knapp 60 mm. Zusammenfassend kann man sagen, dass im Jahr 2006 ca. 50 % der Jahresniederschlagssumme in den Monaten Januar bis März fielen. Im Jahr 2007 fielen zwar bereits im Januar 20 % der Summe der Niederschläge, die Sommermonate Mai bis August waren aber auch sehr niederschlagsreich.

Die Temperaturverteilung stellt sich im Vergleich der beiden Jahre auch sehr unterschiedlich dar. Im Jahr 2006 wurden extremere Temperaturunterschiede zwischen den Wintermonaten und den Sommermonaten gemessen. Im Januar lag die mittlere Temperatur nur knapp über Null und auch die Monate Februar und März waren mit durchschnittlichen Temperaturen von 1,19 °C und 3,03 °C relativ kalt und lagen jeweils etwa 1 °C unter dem langjährigen Mittel. Der Juli dagegen war mit einer mittleren Temperatur von 23,38 °C überdurchschnittlich warm und lag mehr als 6 °C über dem langjährigen Mittel für den Monat Juli. Bis auf die Temperaturen der Monate Januar bis März und des Augusts lagen die restlichen mittleren Temperaturen der einzelnen Monate in 2006 zwischen 3 und 4 °C über den langjährigen Mittelwerten. Der Herbst 2006 war bis dahin der wärmste seit Messbeginn (EPOOLY LTD., 2009).

Die ersten sechs Monate im Jahr 2007 dagegen waren im Vergleich zum mittleren Klima um bis zu 5 °C im Mittel wärmer. Der Januar 2007 war mit einer Durchschnittstemperatur von ca. 6 °C sehr mild. Zu erwähnen ist hier auch, dass in diesem Monat der Orkan „Kyrill“ unter anderem in Nordrhein-Westfalen diverse Zerstörungen angerichtet hat (EPOOLY LTD., 2009). Dieses spiegelt sich auch in der mittleren Windgeschwindigkeit von 3,62 m / s und der hohen Niederschlagssumme von 132 mm in diesem Monat wider.

Im zweiten Halbjahr von 2007 lagen die Temperaturen dann sehr nahe am langjährigen Mittelwert.

Abbildung 15 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen beispielhaft anhand des Jahres 2007. Die Hauptwindrichtung in Münster ist Südwesten. Im Jahr 2007 kamen die Winde mit einem Anteil von mehr als 25 % auch hauptsächlich aus Südwest, gefolgt von Westwinden mit einer Häufigkeit von 20 %. Außerdem traten Winde aus Nordwest und aus Ost mit etwa 12,5 % relativ häufig auf.

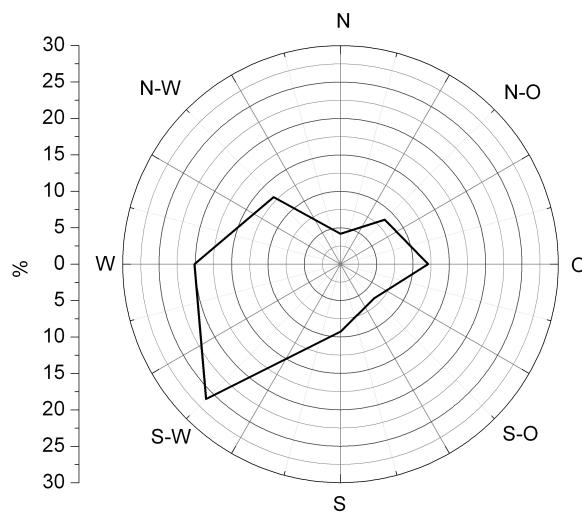


Abb. 15: Häufigkeiten der Windrichtung in 2007

Die Verteilung der Windrichtung auf die jeweiligen Monate ist der Abbildung 16 zu entnehmen. Dargestellt sind die Tagesmittelwerte (gemittelt aus 10-Minutenwerten) in den Jahren 2006 (untere Grafik) und 2007 (obere Grafik).

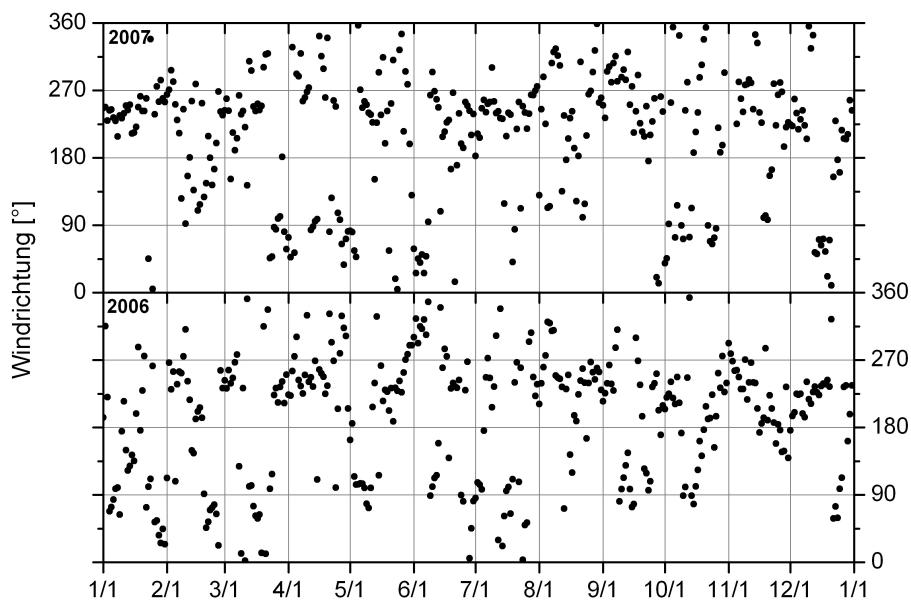


Abb. 16: Verteilung der Windrichtungen 2006 (unten) und 2007 (oben) als Tagesmittelwerte (Basis 10-Minutenwerte)

In beiden Jahren wechselte die Windrichtung häufiger innerhalb eines Monats. Nur im November und Dezember 2006 wehte der Wind relativ konstant aus Süd und Südwest, und im Januar 2007, indem der Orkan „Kyrill“ auftrat, wehte der Wind hauptsächlich aus Südwest und drehte dann auf West.

Bei Betrachtung der Windgeschwindigkeiten ist eine relative Abhängigkeit von der Windrichtung zu erkennen. In Abbildung 17 sind die Verteilungen der Windgeschwindigkeiten nach der Windrichtung in 2007 dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten wurden auf Basis von 10-Minutenwerten nach den jeweiligen Windrichtungen gemittelt.

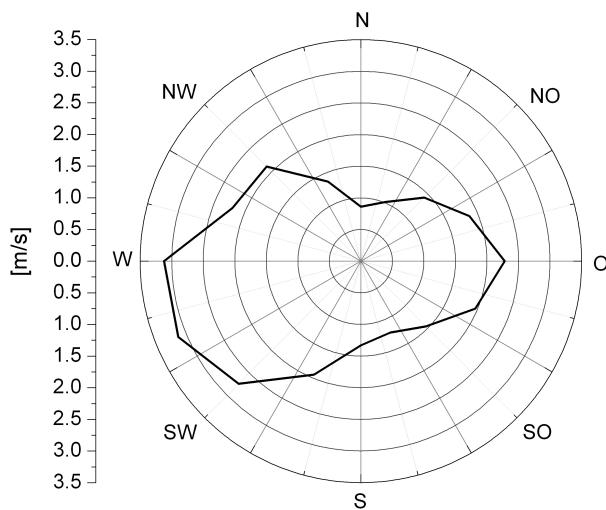


Abb. 17: Mittlere Windgeschwindigkeit 2007 zu den jeweiligen Windrichtungen

Höhere Windgeschwindigkeiten treten besonders bei Winden aus West und Südwest auf. Die mittleren Windgeschwindigkeiten betragen bei Westwinden ca. 3 m / s und bei Winden aus Südwest ca. 2,75 m / s. Aber auch bei Winden aus Nordwest und aus Ost treten im Mittel Geschwindigkeiten von etwa 2,25 m / s auf. Bei Winden aus Nord und Süd dagegen ist der Wind im Mittel am schwächsten.

Die Verteilung der Windgeschwindigkeiten über das Jahr ist in Abbildung 18 aufgeführt. Hier wurden aus den 10-Minutenwerten Tagesmittelwerte gebildet und gegen die Zeit aufgetragen. Die Verteilung für 2006 ist in der unteren Grafik abgebildet, die Verteilung für 2007 in der oberen Grafik.

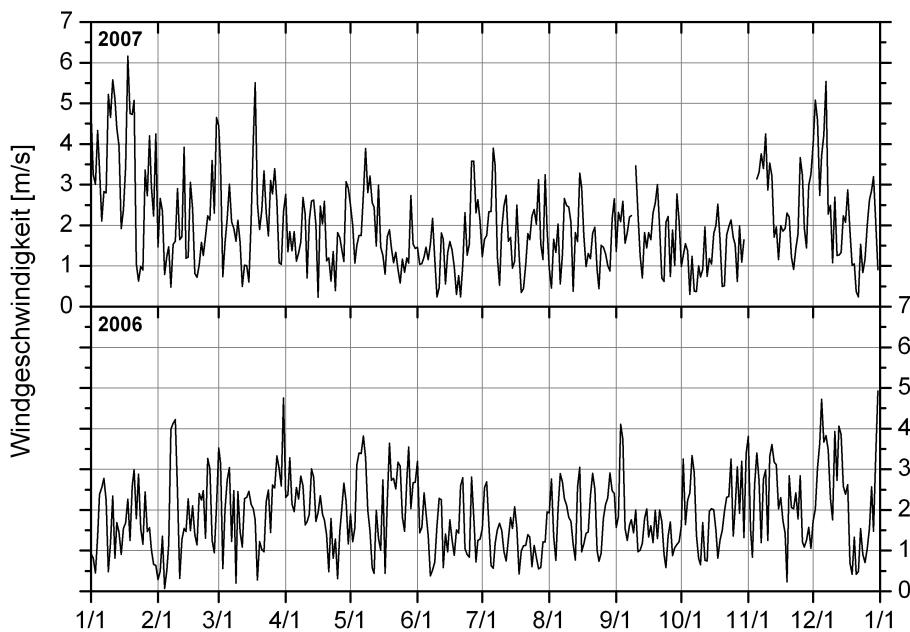


Abb. 18: Verteilung der Windgeschwindigkeiten 2006 (unten) und 2007 (oben) als Tagesmittelwerte (Basis 10-Minutenwerte)

Im Vergleich zu 2006 sind im Jahr 2007 während einiger Tage im Januar, im März und im Dezember mittlere Windgeschwindigkeiten >5 m / s gemessen worden. Die hohen Tagesmittel werte von >6 m / s zeigen den Einfluss des Orkans „Kyrill“. Im Jahr 2006 traten im Tagesmittel indessen Höchstwerte von etwa 4,75 m / s auf. Vergleicht man jedoch die Windgeschwindigkeit im Jahresmittel so ist mit einer Geschwindigkeit von 2,09 m/s im Jahr 2006 und 2,24 m / s im Jahr 2007 kein deutlicher Unterschied zu erkennen.

3.3.2 Einflussfaktor Wind

Die Windverhältnisse nehmen direkten Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen. Sie beeinflussen die Ausbreitung der emittierten Stoffe und können Aufschluss über Emissionsquellen geben.

Mithilfe einer Schadstoffwindrose kann die mittlere Luftverschmutzung angezeigt werden, die bei den jeweiligen Windrichtungen auftritt (HELBIG et al., 1999). In Abbildung 19 sind die Stickstoffdioxidimmissionen am Standort Weseler Straße (VMSW) in Abhängigkeit zur Windrichtung dargestellt. Hierzu wurden die NO₂-Konzentrationen auf Basis von Stundenmittelwerten nach der Windrichtung sortiert und gemittelt. Auf eine Einteilung in Jahreszeiten wurde hier verzichtet, da an der Weseler Straße keine wesentlichen jahreszeitlichen Schwankungen festzustellen waren.

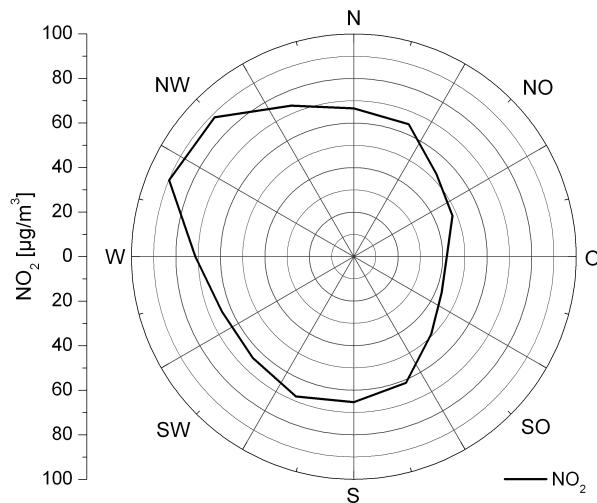


Abb. 19: NO₂-Immissionen zu den Windrichtungen an der Station VMSW (2007) gemittelt aus Halbstundenwerten (vorläufige Grafik)

Die Schadstoffwindrose zeigt, dass die größte Belastung bei Winden aus West bis Nordwest auftritt. Gleichzeitig treten die geringsten Belastungen bei Ost- bis Südostwinden auf. Die im Mittel höchsten Konzentrationen bei Westwinden betragen bis zu 90 µg / m³, bei Ostwinden liegen diese zwischen 40 und 50 µg / m³. Eine Abhängigkeit der Immissionen von der Windrichtung ist eindeutig erkennbar. Trotzdem unterschreiten die mittleren Konzentrationen nie die Grenze von 40 µg / m³. Bei Betrachtung der Mediantagesgänge zu den jeweiligen Windrichtungen wird diese Abhängigkeit noch verdeutlicht. In der

Abbildung 20 sind die Mediantagesgänge bei Ostwind und bei Westwind dargestellt. Für die Berechnung der Tagesgänge bei Ostwind mussten die Tage eine mittlere Tageswindrichtung zwischen 60° und 135° aufweisen und bei Westwind zwischen 260° und 330° .

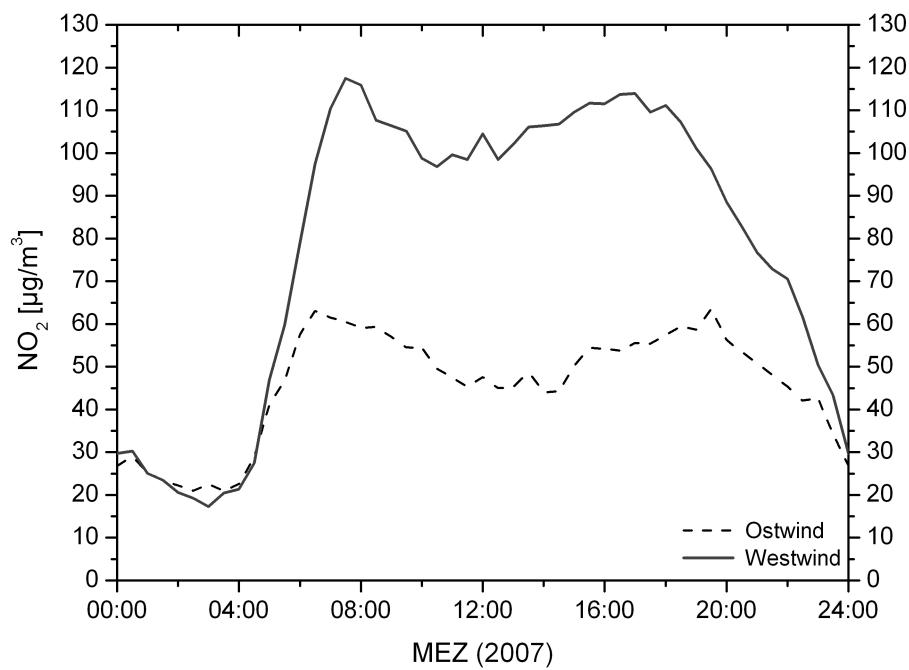


Abb. 20: Mediantagesgänge an der Station VMSW 2007 bei Ost- und Westwind (werktag)

Bei beiden Windrichtungen ist der Tagesverlauf sehr ähnlich. Die Ursachen für den Tagesverlauf wurden bereits in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Bei Westwind sind die Immissionen jedoch fast doppelt so hoch wie die Immissionen bei Ostwind. Auffällig ist auch, dass sowohl bei Ost- als auch bei Westwind die Konzentrationen in der Nacht bis auf im Mittel $30 \mu\text{g} / \text{m}^3$ abfallen und ein Minimum von ca. $20 \mu\text{g} / \text{m}^3$ zwischen 2:00 Uhr und 4:00 Uhr aufweisen.

Die offensichtlichen Immissionsunterschiede können unter Umständen aus den Windgeschwindigkeiten resultieren, die mit den Windrichtungen einhergehen. In Kapitel 3.3.1 sind diese anhand der Abbildung 17 bereits beschrieben. Es wurde jedoch festgestellt, dass die mittlere Windgeschwindigkeit bei Westwind mit etwa $3 \text{ m} / \text{s}$ am höchsten ist. Bei Ostwind und bei Nordwestwind ist die mittlere Windgeschwindigkeit jedoch mit $2,25 \text{ m} / \text{s}$ bei Ostwind und $2,15 \text{ m} / \text{s}$ bei Nordwestwind fast gleich hoch. Hohe Immissionen treten jedoch auch bei Nordwestwinden auf.

Bei einer zusätzlichen Klassifizierung der NO₂-Immissionen nach unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (Abbildung 21) ist die Abhängigkeit nach der Windrichtung auch weiterhin existent.

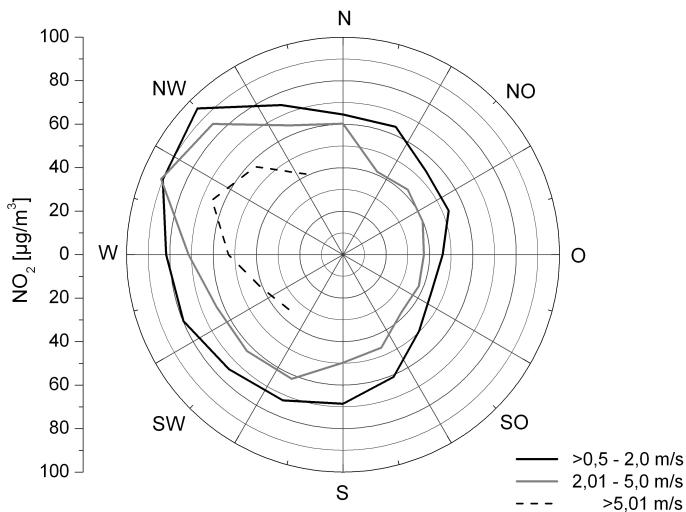


Abb. 21: NO₂-Immissionen zu den Windrichtungen an der Station VMSW (2007) gemittelt aus Halbstundenwerten und klassifiziert nach Windgeschwindigkeiten,

Bei Westwinden, besonders bei Nordwestwinden treten hohe Belastungen auch bei höheren Windgeschwindigkeiten auf. Sogar bei Windgeschwindigkeiten über 5 m / s sind die NO₂-Konzentrationen mit rund 60 µg / m³ im Mittel höher als bei sämtlichen Ostwind-Verhältnissen. Selbst bei geringen Windgeschwindigkeiten beträgt die mittlere Immissionsbelastung bei Ostwind etwa 55 µg / m³ und nimmt mit zunehmender Windgeschwindigkeit weiter ab.

Die Aufteilung nach Windgeschwindigkeiten kann auch zum Aufspüren möglicher Emissionsquellen dienen (HELBIG et al., 1999). Dafür wurden die Stickoxidimmissionen in einer Windrose nach der gleichen Klassifizierung wie in Abbildung 21 abgebildet (Abb. 22).

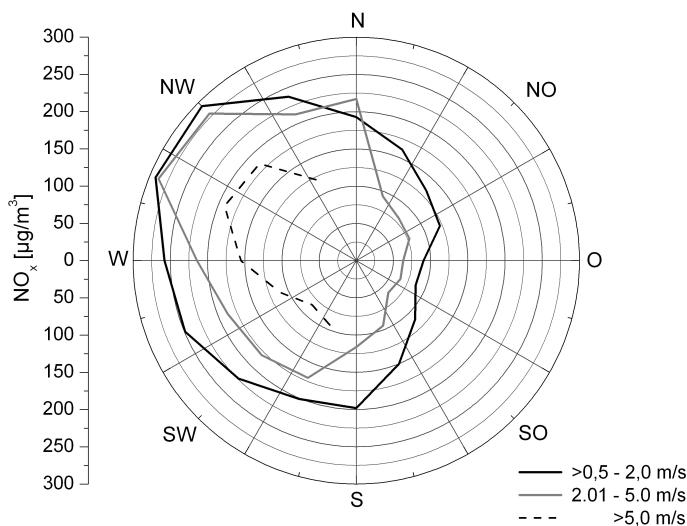


Abb. 22: NO_x-Immissionen zu den Windrichtungen an der Station VMSW (2007) aus Stundenmitteln, klassifiziert nach Windgeschwindigkeiten

Die NO_x-Immissionen verhalten sich in Relation zueinander in Abhängigkeit von der Windrichtung ähnlich wie die NO₂-Immissionen. Bei Ostwindverhältnissen sind wesentlich geringere Immissionen zu verzeichnen als bei Westwindverhältnissen. Auch sinken die Immissionen mit zunehmender Windgeschwindigkeit außer bei Winden aus Nord und Nordwest. Auffällig sind die hohen Immissionen bei Nordwind trotz im Mittel höherer Windgeschwindigkeiten (graue Linie). Dieser Wert weist auf einen oder mehrere Emittenten in nördlicher Lage zur Weseler Straße hin.

Die Weseler Straße liegt am Stationsstandort mit einer Nord–Süd–Ausrichtung am südlichen Ende der Münster Innenstadt. Aus dem Norden gelangen somit urban geprägte Luftmassen zur Messstation. Diese sind vor allem beeinflusst durch die Gewerbe- und Siedlungsflächen und die Emissionen aus dem Kraftfahrzeugverkehr.

Den Abbildungen 21 und 22 ist außerdem zu entnehmen, dass bei West–Nordwestwinden sowohl die NO₂-Immissionen als auch die NO_x-Immissionen mit zunehmender Windgeschwindigkeit kaum bzw. gar nicht abnehmen, erst ab Geschwindigkeiten >5 m / s.

Im Rahmen des Studienprojektes 2008 „Straßenverkehr“ wurden die Windverhältnisse auch direkt an der Weseler Straße untersucht. Dazu wurde ein Ultraschallanemometer auf dem Dach der Station VMSS in 4 m über dem

Grund installiert und die Windrichtung sowie die Windgeschwindigkeit gemessen. Das Ergebnis war, dass besonders bei Ostwinden die Windrichtung innerhalb der Weseler Straße Nord-Nordwest betrug. Es findet daher eine Kanalisierung entlang des Straßenverlaufs statt. Diese Strömung kann dazu führen, dass Schadstoffe von der Station wegtransportiert werden (STUDIENPROJEKT STRAßENVERKEHR, 2008). An der Abbildung 21 ist dieser Effekt an den geringeren Immissionen während der Ostwindverhältnisse erkennbar. Gleichzeitig sinken aber, laut der Ergebnisse des Studienprojekts, die Windgeschwindigkeiten innerhalb der Straßenschlucht. Daher sind die NO₂-Immissionen auch bei der Hauptwindrichtung Ost noch hoch.

Bei Winden aus Südwest deuten die Messungen des Studienprojektes ebenfalls auf einen kanalisierten Effekt hin. Hier wird der Wind so abgelenkt, dass er schließlich aus Süd-Südost weht, ebenfalls etwa entlang des Straßenverlaufs. Während dieser Situationen wurden wieder im Vergleich zu den Werten an der Hüfferstation geringere Windgeschwindigkeiten verzeichnet. Es wurde zudem festgestellt, dass bei westlicher Hauptwindrichtung innerhalb der Straßenschlucht eine große Streuung der Windrichtung mit zudem sehr geringen Windgeschwindigkeiten aufzufinden war.

Die Bebauung stellt folglich bei diesen Windrichtungen eine Barriere dar (STUDIENPROJEKT STRAßENVERKEHR, 2008). Über das ganze Jahr verteilt scheint diese Situation besonders bei Winden aus West-Nordwest, also ca. zwischen 290° und 315° aufzutreten. Es treten somit sowohl kanalisierte als auch stauende Effekte auf (HELBIG et al, 1999; OKE, 1987).

Erst bei Windgeschwindigkeiten >5 m / s scheinen die Turbulenzen ausreichend, sodass es auch an der Station zu verringerten Immissionen kommt (Abb. 21 und 22). Verantwortlich hierfür können Windwalzen sein, die folglich nur bei hohen Windgeschwindigkeiten in dieser Straße auftreten. Ursächlich hierfür sind die Bebauungsstruktur und das Verhältnis von Bauhöhe zur Breite der Straße (OKE, 1987). Befindet sich die Station im Lee der Bebauung, wird der Wind an der gegenüberliegenden Straßenbebauung nach unten abgelenkt, und bodennah zur Station geführt. Da somit auch NO₂-belastete Luftmassen von der gegenüberliegenden Straßenseite zur Station

transportiert werden, ist die Belastung trotz der hohen Windgeschwindigkeit weiterhin mit um die $60 \mu\text{g} / \text{m}^3$ sehr hoch (Abb. 23).

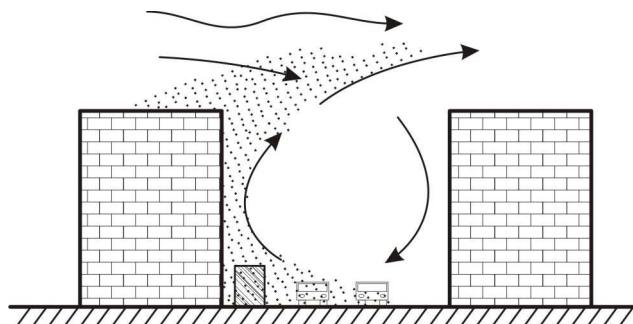


Abb. 23: Einfluss der Bebauung auf die Immissionssituation in einer Straßenschluchten (verändert nach OKE, 1987)

Die Datengrundlage der Ergebnisse des Studienprojekts bezieht sich auf nur wenige Tage im Juli 2008. Die Betrachtung über ein ganzes Jahr deuten aber ebenfalls auf diese Verhältnisse.

3.3.3 Einflussfaktor atmosphärische Schichtung

Die Schichtung der Atmosphäre hat einen großen Einfluss auf die Schadstoffbelastung der Luft (vgl. Kapitel 1.2.4). Der Stabilitätsgrad der Atmosphäre kann durch die (Gradient-) Richardson-Zahl (R_i) dargestellt werden (Gleichung 3.1). In diese gehen die mittleren Gradienten der Temperatur und der Geschwindigkeit in einer turbulenten Strömung mit ein (ETLING, 2008, GIETL, 2008, GIETL & KLEMM, 2009).

$$R_i = g(\Delta\Theta / \Delta Z) / T(\Delta u / \Delta Z)^2 \quad (3.1)$$

Die Gleichung setzt sich aus der Schwerebeschleunigung $g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$, der potentielle Temperatur θ in Kelvin (K), der Höhe Z in Meter (m), der Temperatur T in Kelvin (K) und der horizontalen Windgeschwindigkeit u in m / s zusammen. Die Daten für die Berechnung der Richardson-Zahl wurden 1,6 km nordwestlich des Stadtrandes in den Jahren 2006 und 2007 im Rahmen einer Dissertation erhoben (GIETL, 2008). An einem 10 m Mast wurden die zu ermittelnden Größen in zwei Höhen gemessen. Dazu wurden die Windgeschwindigkeit in m / s und die Lufttemperatur in $^\circ\text{C}$ in einer Höhe von 2,185 m und 9,345 m gemessen. Die Höhendifferenz ΔZ betrug 7,16 m. Für die Temperatur T wurde die Lufttemperatur ($^\circ\text{C}$) in Kelvin umgerechnet und der Mittelwert aus beiden Höhen berechnet. Alle gemessenen Werte sind 10-Minutenwerte.

Eine einfache Einteilung der Richardson-Zahl (R_i) nach Foken (FOKEN, 2006) ist in Tabelle 5 angegeben.

Tab. 5: Einteilung des Stabilitätsgrades (nach FOKEN, 2006)

Schichtung	R_i
Labil	<0
Neutral	~0
stabil	0 < R_i < 0,2

Bei labiler Schichtung der Atmosphäre liegt die Richardson-Zahl unter Null. Nimmt R_i einen Wert von nahezu Null an, ist die Atmosphäre neutral

geschichtet. Bei einem Wert von R_i zwischen 0 und 0,2 ist die Atmosphäre stabil geschichtet. Nimmt die Richardson-Zahl einen Wert über 0,2 an, findet bei stabiler Schichtung ein turbulenter Austausch nahezu nicht mehr statt (ROEDEL, 2000, FOKEN, 2006). Turbulenzen entstehen dann nur noch durch zufällige, unsystematische Störungen (ROEDEL, 2000). Es findet somit ein Umschlag in weitgehend laminare Strömung statt (FOKEN, 2006).

Abbildung 24 zeigt den Mediantagesgang der Richardson-Zahl gemeinsam mit dem Mediantagesgang an der Station VMSW an Werktagen. Eine Einteilung der Richardson-Zahl in Werk- und Sonntage ist nicht notwendig, da die Schichtung der Atmosphäre unabhängig vom Wochentag ist.

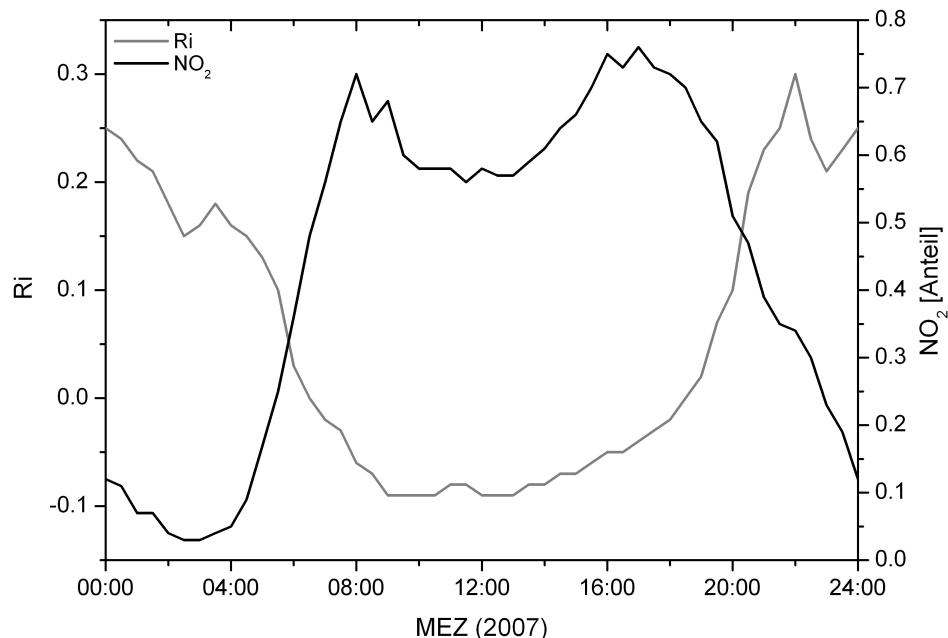


Abb. 24: Mediantagesgang der Richardson-Zahl und relativer Mediantagesgang VMSW (werktags, 2007)

Der Tagesverlauf der Richardson-Zahl und der Werktagessgang der NO_2 -Immissionen an der Weseler Straße zeigen einen gegensätzlichen Verlauf (Abb. 24). Mit den einsetzenden Turbulenzen am Morgen, die durch den Anstieg der Temperatur entstehen und hier durch die abnehmende Richardson-Zahl ausgedrückt werden, steigen die Konzentrationen des Stickstoffdioxids. Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, ist für den Anstieg ab 4:00 Uhr morgens der einsetzende Berufsverkehr verantwortlich. Der Einfluss des Verkehrs auf die Immissionssituation ist somit viel stärker als die

Austauschfähigkeit der bodennahen Luftmassen. Dieses Phänomen wurde bereits anhand der PM₁₀-Konzentrationen in Münster festgestellt (GIETL, 2008). Der Abfall der Immissionen zur Mittagszeit wurde in Kapitel 3.2 bereits mit dem geringeren Verkehrsaufkommen zu dieser Zeit verglichen. Gleichzeitig ist der starke Abfall um bis zu 15 % auch der ausgeprägten vertikalen Durchmischung zur Mittagszeit zuzuschreiben. Der Verlauf lässt somit vermuten, dass sowohl der relativ geringe Verkehr als auch die Schichtung der Atmosphäre zumindest zur Mittagszeit Einfluss auf die Stickstoffdioxidimmissionen nehmen. Der gegensätzliche Verlauf zu den restlichen Tageszeiten ist jedoch ein eindeutiges Indiz dafür, dass der Stabilitätsgrad der Atmosphäre zumindest an den Verkehrs-Hot-Spots kaum Einfluss auf die Schadstoffbelastung mit NO₂ nimmt.

Anhand der Station MSGE soll beispielhaft ein Tagesgang demonstriert werden, der vorwiegend durch die Atmosphärenschichtung gekennzeichnet ist. Für die Darstellung wurde der relative Mediantagesgang der Sonn- und Feiertage aus dem Jahr 2006 mit den Median-Tageswerten der Richardson-Zahl aus dem Jahr 2006 aufgezeichnet (Abb. 25). An den Sonn- und Feiertagen kann der Einfluss des Verkehrs an der Hintergrundstation vernachlässigt werden (vgl. Kapitel 3.1.4). Der relative Mediantagesgang wurde gewählt, da dieser unabhängig von Ausreißern ist.

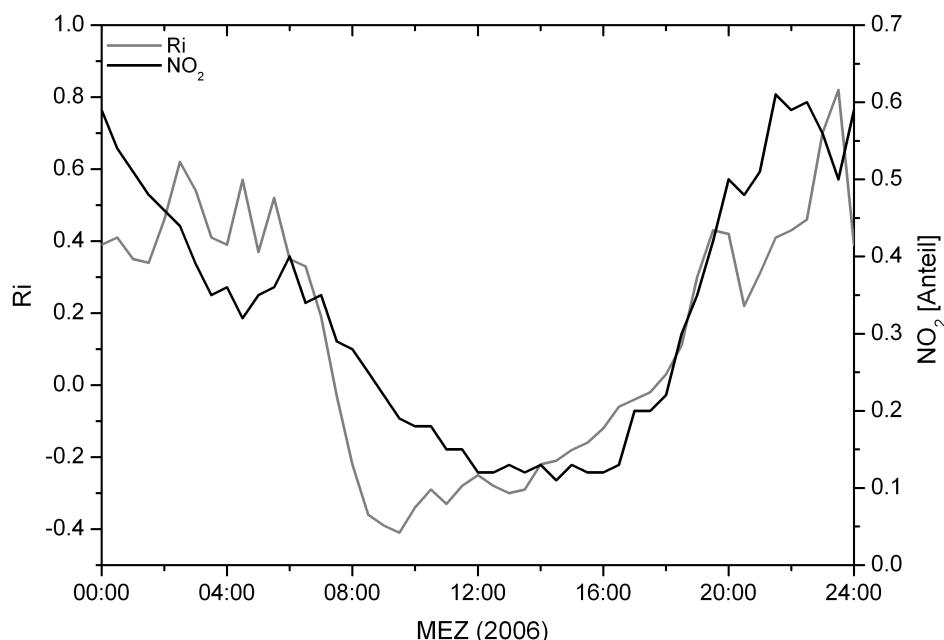


Abb. 25: Mediantagesgang von Ri und relativer Mediantagesgang von NO₂ (MSGE) an Sonn- und Feiertagen 2006

Ab ca. 6:00 Uhr morgens sinken die NO₂-Immissionen einhergehend mit der Aktivierung der atmosphärischen Turbulenz bis zum Mittag und bleiben bis ca. 16:00 Uhr auf ihrem Minimum. Ab ca. 16:00 Uhr steigen die Immissionen wieder deutlich an, einhergehend mit der Richardson-Zahl.

Im städtischen Hintergrund ist somit zumindest an den Sonntagen ein Einfluss des Schichtungszustandes der Atmosphäre vorhanden.

3.3.4 Einfluss anderer meteorologischer Parameter

Einflüsse anderer meteorologischer Parameter, die bedeutend auf die Immissionssituation an der Weseler Straße einwirken, konnten nicht festgestellt werden. Zur Vollständigkeit sollen hier kurz die berechneten Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die Korrelationen der NO₂-Konzentrationen und der meteorologischen Parameter aufgezeigt werden, die einen direkten Einfluss auf die NO₂-Immissionen nehmen können (Tabelle 6).

Die kurzwellige Einstrahlung ist bedeutend für die Photolyse des Stickstoffdioxids (vgl. Kapitel 1.2.1). Die Photolyserate des Stickstoffdioxids steigt mit zunehmender Sonneneinstrahlung und auch mit steigender Temperatur. Bei höheren Windgeschwindigkeiten werden die Stickoxide abtransportiert oder besser verteilt.

Angegeben sind die ermittelten Korrelationskoeffizienten für die Stundenmittelwerte der Hintergrundstation MSGE, der Station Weseler Straße (VMSW) und der Station am Friesenring (VMUE) an Werktagen (WT) und an Sonn- und Feiertagen (SF). Die Korrelationen sind auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tab. 6: Pearson-Korrelation zwischen der NO₂-Konzentration und den meteorologischen Parametern an den LUQS-Stationen in 2007, differenziert nach Werktag (WT) und Sonn- und Feiertage (SF), Basis: Stundenmittel

<i>Meteorologischer Parameter</i>	<i>MSGE</i>		<i>VMSW</i>		<i>VMUE</i>	
	<i>NO₂ [µg/m³]</i>	<i>NO₂ [µg/m³]</i>	<i>NO₂ [µg/m³]</i>	<i>NO₂ [µg/m³]</i>	<i>WT</i>	<i>SF</i>
kurzwellige Einstrahlung [W/m²]	-0,23	-0,19	0,26	-0,05	-0,06	-0,28
Temperatur [°C]	-0,38	-0,3	0,14	0,01	-0,18	-0,28
Windgeschwindigkeit [m/s]	-0,31	-0,28	-0,18	-0,33	-0,2	-0,34

Die Darstellung des Korrelationskoeffizienten allein ist jedoch mit Vorsicht zu betrachten. Aus der Tabelle geht hervor, dass ein schwacher Zusammenhang zwischen der kurzweligen Einstrahlung und den NO₂-Immissionen an Werktagen an der Weseler Straße besteht. Eine genauere Betrachtung ergab aber, dass dieser Zusammenhang aus den Werten in der Nacht resultiert. Also sinken die Immissionen, wenn auch die kurzwellige Einstrahlung sinkt. Die nächtliche Senke besteht aber in der Reaktion des NO₂ mit dem OH-Radikal, bei der Salpetersäure entsteht (vgl. Kapitel 1.2.1). Die Betrachtung von Streudiagrammen bestätigt dieses. Die zugehörigen Diagramme sind dem Anhang C zu entnehmen.

An den Sonn- und Feiertagen konnte ein Einfluss jedes der angegebenen Parameter auf die Werte der Stationen Münster-Geist (MSGE) und Münster-Friesenring (VMUE) festgestellt werden. Aber keiner hat auf die Stickstoffdioxidimmissionssituation an diesen Standorten bedeutend eingewirkt, sodass von einer Senkung oder Erhöhung der Konzentrationen gesprochen werden könnte.

4 Mögliche Minderungsmaßnahmen

Die Maßnahmen im Rahmen der Luftqualitätsplanung beziehen sich bisher auf eine Senkung der Emissionen. Betroffen sind die Verursachergruppen im Bezug auf technische Verbesserungen an den Fahrzeugen sowie im Bezug auf Verkehrseinschränkungen. Eine Prognose für 2010 ergab, dass der Grenzwert für NO₂ an der Steinfurter Straße vermutlich knapp eingehalten wird (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). An der Weseler Straße wird zwar eine Besserung der Belastungssituation prognostiziert, die vor allem durch geringere Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs entsteht. Diese Emissionsminderung basiert vorwiegend auf den Verbesserungen der Fahrzeugtechnik und der Einführung neuer Euronormen ab 2010, die noch einmal die Abgasgrenzwerte für Kraftfahrzeuge herabsetzen (vgl. Kapitel 1.2.3). Ohne weitere Maßnahmen wird diese Minderung jedoch nicht ausreichen.

Mit dem Einbezug meteorologischer Gegebenheiten kann man direkt auf die Immissionen zielen. Ausgehend von den zuvor ermittelten Ergebnissen sollen hier Maßnahmen aufgezeigt werden, die zur Minderung der Stickstoffdioxidimmissionen, insbesondere an der Weseler Straße führen können. Da ein meteorologischer Einfluss nur den Windverhältnissen in der Straßenschlucht zugeschrieben werden kann (vgl. Kapitel 3.3.2), berücksichtigen die folgenden Maßnahmen in erster Linie sowohl den Kraftfahrzeugverkehr als Hauptverursacher, als auch diesen meteorologischen Parameter, der signifikanten Einfluss auf die Immissionssituation nimmt.

4.1 Allgemeine Maßnahmen

Für eine erste Analyse der möglichen Effizienz von Maßnahmen, die auf die aufgetretenen Spitzenkonzentrationen der NO₂-Belastung Einfluss nehmen würden, wurden rechnerisch alle Werte die über dem Perzentil 95 lagen auf dessen Wert (127,1 µg / m³, vgl. Kapitel 3.1) gesetzt. Dabei bleibt

zunächst völlig außen vor, wie eine solche Maßnahme aussehen könnte. Eine Berechnung des Jahresmittelwertes, der für eine derartige Minderungsmaßnahme ausschlaggebend ist (vgl. Kapitel 1.2.2), ergab einen Wert von $63,9 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Die Vermeidung dieser extremen Spitzen ergibt somit eine Abnahme von etwa $0,9 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Aufgetreten sind diese Werte überwiegend an Montagen, Dienstagen und Donnerstagen. Insgesamt wurden diese hohen Werte in 117 Stunden an 136 Tagen im Jahr gemessen. Wie schon zu vermuten, traten diese hohen Immissionen überwiegend zu den Hauptverkehrszeiten auf. In Tabelle 7 sind die Mittelwerte angegeben, die nach dem beschriebenen Verfahren für die jeweiligen Perzentile berechnet wurden.

Tab. 7: Jahresmittelwerte nach Herabsetzung auf das jeweilige Perzentil der Halbstundenwerte für NO₂

berechneter Reduktion auf: Jahresmittelwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
Perzentil 95	63,91
Perzentil 90	62,92
Perzentil 80	60,22
Perzentil 75	58,64
Median	48,12

Bei keiner der Berechnungen wurde eine Minderung der NO₂-Konzentrationen festgestellt, die eine Einhaltung des Grenzwertes ermöglicht hätte..

Um überhaupt eine Reduktion der Spitzenwerte zu erzielen, müssen die verkehrsbedingten Emissionen besonders zu den Hauptverkehrszeiten reduziert gesenkt werden.

4.2 „Modifizierte Umweltzone“

Eine Umweltzone ist eine Maßnahme, die auf die Reduktion der Emissionen aus dem Kraftfahrzeugverkehr abzielt (vgl. Kapitel 1.2.3). Eine Studie über die Wirkung der Umweltzone in Köln, ergab eine Reduktion der NO₂-Immissionen

von durchschnittlich $1,2 \mu\text{g} / \text{m}^3$ an den stark verkehrsbelasteten Standorten (LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN, 2009). Eingeführt wurde die Umweltzone in Köln am 01.01.2008. Für die Bewertung wurden daher die Zeiträume vom 01.07. – 31.12.2007 und 01.07. – 31.12.2008 verglichen. Ein Erfolg ist zwar zu verzeichnen, indem der Mittelwert von $54,2 \mu\text{g} / \text{m}^3$ auf $53 \mu\text{g} / \text{m}^3$ gesenkt wurde. Gleichzeitig ist jedoch eine Minderung im städtischen Hintergrund von $0,5 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im Vergleichszeitraum festgestellt worden. Diese Minderung ist vorwiegend der Meteorologie zuzuschreiben. Auch reicht die Reduzierung der NO_2 -Belastung nicht aus, um den Grenzwert von $40 \mu\text{g} / \text{m}^3$ bis zum 01.01.2010 einzuhalten (vgl. Kapitel 1.2.3). Dem Luftqualitätsplan der Stadt Münster ist zu entnehmen, dass die bisher geplante Maßnahme auch dort allein nicht ausreichen wird, die Belastung an der Weseler Straße dauerhaft zu senken (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009).

Berücksichtigt man nun die stark unterschiedlichen Schadstoffbelastungen zu den Hauptwindrichtungen Ost und West-Nordwest an der Weseler Straße (vgl. Kapitel 3.3.2), könnte ein System entwickelt werden, welches im Bezug auf Verkehrsbeschränkungen auch die Windverhältnisse einbezieht.

In Tabelle 8 sind die Lage- und Streuungsmaße bei Ostwindverhältnissen und Westwindverhältnissen an Werktagen gegenübergestellt.

Tab. 8: Lage- und Streuungsmaße der NO_2 -Konzentrationen an der Station VMSW bei Ost- und Westwindverhältnissen (werktags)

	Ostwind [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Westwind [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Min	8,66	6,22
Max	174,90	240,25
Perzentil 25	35,95	50,43
Median	48,78	87,68
Perzentil 75	62,27	111,90
Perzentil 95	94,85	137,19
Mittelwert	51,38	81,77

Der im Bezug auf die Gesetzeslage für die Bewertung der NO_2 -Belastung interessante Wert ist der Mittelwert. Bei Ostwind beträgt der Mittelwert rund

51 µg / m³, bei Westwind knapp 82 µg / m³. Es ist somit ein Unterschied von etwa 30 µg / m³ zu verzeichnen. In diese Bewertung sind 34 Werkstage mit Ostwind und 51 Werkstage mit Westwind eingegangen. An 27 Tagen mit Westwind wurde das Perzentil 95 (Tab. 8) überschritten. An 50 von 51 Werktagen wurden Immissionen über dem Perzentil 75 der Westwindsituationen gemessen. Um diese hohen Immissionswerte zu reduzieren, wird als Maßnahme eine Verkehrsminderung auf Sonntagsniveau betrachtet. Tabelle 9 zeigt die NO₂-Immissionen bei Ost- und Westwind an Samstagen und Sonntagen. Hier wurden abermals die Feiertage den Sonntagen hinzugezählt.

Tab. 9: Mittelwerte der NO₂-Immissionen bei Ost- und Westwindverhältnissen der Samstage und Sonntage an VMSW

	Ostwind [µg/m ³]	Westwind [µg/m ³]
Samstag	41,44	70,58
Sonntag	38,55	54,38

Die Werkstage bei Westwind einschließlich der Samstage werden aus dem Datensatz entfernt und durch einen mittleren Sonntag, der aus allen Sonntagen eines Jahres mit Westwindsituation berechnet wurde, ersetzt. Dieses soll die Reduzierung des Verkehrs unter möglichst vergleichbaren Windverhältnissen simulieren. Der Jahresmittelwert an der Station VMSW verringert sich dadurch um 4,3 µg / m³ auf 60,9 µg / m³.

Zusätzlich zu der Einführung der bisher üblichen Umweltzone können die Immissionen durch eine Modifizierung dieser weiter reduziert werden. Dazu ist nötig, dass bei den Windverhältnissen, an denen hohe Immissionen zu erwarten sind, nur Fahrzeuge der Schadstoffgruppe 4 die Weseler Straße befahren dürfen. Da 77 % der gemeldeten Fahrzeuge in Münster, einschließlich der schweren Nutzfahrzeuge und Busse, der Schadstoffgruppe 4 zugeordnet werden (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009), wird dadurch der Verkehr schon wesentlich reduziert.

Zudem sollte für diese Wetterphasen die Straße für den Schwerlastenverkehr vollständig gesperrt werden. In Münster entfallen im Jahr 2010 8,4 % der Jahresfahrleistung auf die Fahrzeuggruppe der schweren Nutzfahrzeuge ohne Busse (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Laut Luftqualitätsplan verursachen diese dann etwa 55 % der NO_x-Emissionen.

Allein durch eine Verkehrsreduzierung bei Westwinden kann so zwar eine deutlichere Minderung der Immissionen im Jahresmittel erzielt werden, aber auch diese ist längst nicht ausreichend

4.3 Städtebauliche bzw. –planerische Maßnahmen

Die geringeren NO₂-Immissionen während der Ostwindverhältnisse an VMSW entstehen durch eine Kanalisierung der Strömung, sodass an der Station Nordwind herrscht. Zurückzuführen ist diese Situation auf die Kreuzung Weseler Straße / Moltkestraße. Eine schematische Darstellung ist der Abbildung 26 zu entnehmen.

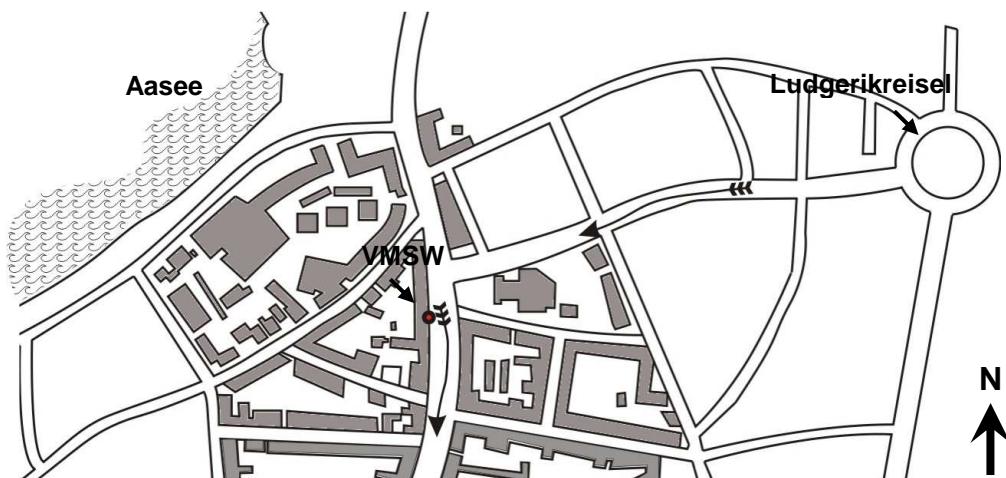


Abb. 26: Skizze der Ostwind-Situation an der Weseler Straße (verändert nach BEZIRKSREGIERUNG KÖLN ABTEILUNG GEOBASIS.NRW (2009), Maßstab ca. 1 : 5.000)

Der Wind (geschlängelter Pfeil) aus Osten wird über die Moltkestraße in die Weseler Straße gelenkt und dort in Richtung Süden kanalisiert (vgl. Kapitel 3.3.2). Obwohl der Wind auch Luftmassen vom Ludgerikreisel transportiert, einem Kreisverkehr mit starkem Verkehrsaufkommen, wurden deutlich

geringere Immissionen bei diesen Situationen registriert. Ursächlich sind hier vermutlich stärkere Turbulenzen und eine bessere Durchmischung durch die Bebauungsstruktur und den Straßenverlauf. Dieses bewirkt eine stärkere Transmission des NO₂. Der West-Nordwestwind wird dagegen von der vier- bis fünfstöckigen Bebauung weitgehend abgebremst. Um eine annähernd vergleichbare Immissionssituation wie bei Ostwindverhältnissen herbeizuführen, sind somit strukturelle Veränderungen auf der Westseite der Weseler Straße notwendig. Eine Maßnahme wäre die Errichtung einer Bebauungslücke und einer „Frischluftschneise“, bzw. einer Luftleitbahn (KUTTLER et al., 2005). Eine Variante ist der Abbildung 27 zu entnehmen.

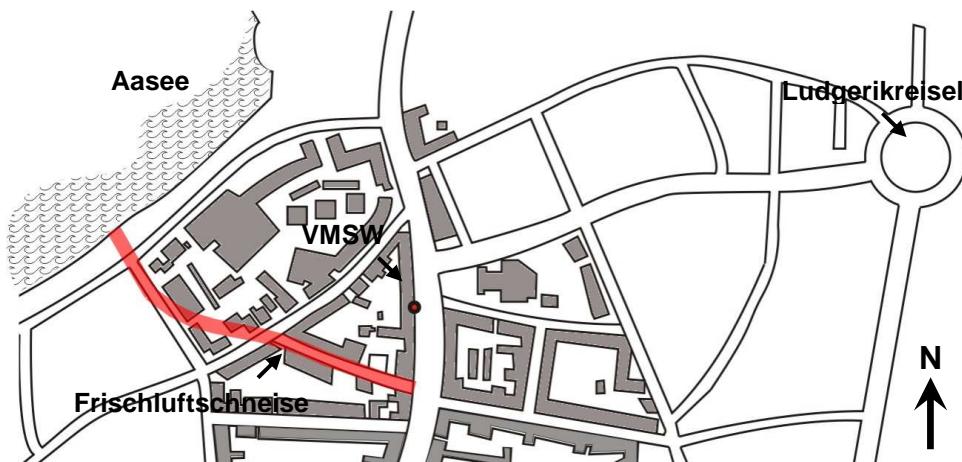


Abb. 27: Weseler Straße mit Frischluftschneise aus Richtung Aasee (verändert nach BEZIRKSREGIERUNG KÖLN ABTEILUNG GEOBASIS.NRW (2009), Maßstab ca. 1 : 5.000)

Im Nordwesten der Station VMSW liegt der Aasee. Eine Bebauungslücke würde nicht nur zu einer besseren Durchmischung und einem besseren Abtransport der schadstoffbelasteten Luftmassen führen. Die Straße würde zudem mit „Frischluft“, also Luftmassen aus gering belastetem Gebiet, versorgt werden. Im Luftqualitätsplan der Stadt Münster ist bereits die Vermeidung von Straßenschluchten in der Bauleitplanung als Maßnahme mit einbezogen worden (BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER, 2009). Eine Veränderung der bestehenden Strukturen in Straßenschluchten wurde bisher aber noch nicht in Betracht gezogen.

Um diese Maßnahme in Zahlen auszudrücken wurden die Westwindsituationen durch entsprechende Ostwindsituationen ersetzt. Hierbei wurden die Werktag-

bei Westwind durch Werkstage bei Ostwind ersetzt und das gleiche Verfahren bei Samstagen, Sonn- und Feiertagen angewendet. Diese Veränderung ergab einen Jahresmittelwert an der Weseler Straße von ca. $58 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Zu berücksichtigen ist hier, dass insgesamt die Ostwindsituationen nur an 19 % des Jahres herrschten, Westwindsituationen an 22 %. In die Berechnung sind somit etwas weniger Werte eingegangen, als für die Berechnung des realen Mittelwertes. Außerdem sind auch immer Störfaktoren zu berücksichtigen, wie die individuelle Baustruktur und die unterschiedliche Zusammensetzung der Luftmassen aus den unterschiedlichen Windrichtungen. Der Wert stellt aber einen deutlichen Trend dar.

Eine noch erheblichere Senkung würde erreicht werden, wenn zusätzlich zu der Frischluftschneise der Verkehr an einem oder mehreren Werktagen auf Sonntagsniveau reduziert würde. Dazu wurde die bereits beschriebene Berechnung übernommen und zudem die verbliebenen Wochentage durch Sonntage ersetzt. Diese Maßnahme reduziert die NO₂-immissionen demnach auf $45,8 \mu\text{g} / \text{m}^3$ im Jahresmittel. Damit wird der Grenzwert jedoch auch nicht erreicht.

4.4 Verkehrseinschränkungen und Verkehrsverbote

Die bisher aufgeführten Maßnahmen führen zwar zu einer Minderung der NO₂-Immissionen, werden aber voraussichtlich nicht die gesetzlichen Vorgaben erreichen. Dafür sind drastischere Maßnahmen notwendig.

Eine Reduktion des Kraftfahrzeugsverkehrs auf Sonntagsniveau würde eine erhebliche Minderung der Immissionen erwarten lassen. Der Median an den Sonn- und Feiertagen beträgt $38,9 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Als gesetzliche Grundlage gilt hier jedoch der Mittelwert, der mit $44,1 \mu\text{g} / \text{m}^3$ den Grenzwert zumindest im Jahr 2007 noch überschreitet. Selbst wenn somit an allen Werktagen der Verkehr an der Weseler Straße auf den Sonntagsverkehr beschränkt würde (vgl. Kapitel 3.2), sinken die NO₂-Immissionen nur auf ca. 68 % der gesamten Immissionen.

Eine weitere Maßnahme ist der „Autofreie Sonntag“. Um diesen zu simulieren, wurden die Werte der Sonn- und Feiertage an der Station VMSW durch die entsprechenden Werte der Hintergrundstation (MSGE) ersetzt. Durch diese Maßnahme verringert sich der Mittelwert im Idealfall immerhin um $4,9 \mu\text{g} / \text{m}^3$ auf $59,9 \mu\text{g} / \text{m}^3$. Ausreichend ist diese Maßnahme jedoch nicht.

Abbildung 28 zeigt die Entwicklung des Jahresmittelwertes, bei einer Erweiterung des Verkehrsverbotes an der Weseler Straße auf weitere Wochentage. Für die Berechnungen wurden die Werte der angegebenen Wochentage im Jahr 2007 an der Station VMSW durch die entsprechenden Werte der Station MSGE ersetzt. Dadurch wird erreicht, dass ausschließlich der Verkehr ausgeschlossen wird. Andere Einflüsse, die zumindest auf den städtischen Hintergrund wirken, gehen somit in die Berechnung mit ein.

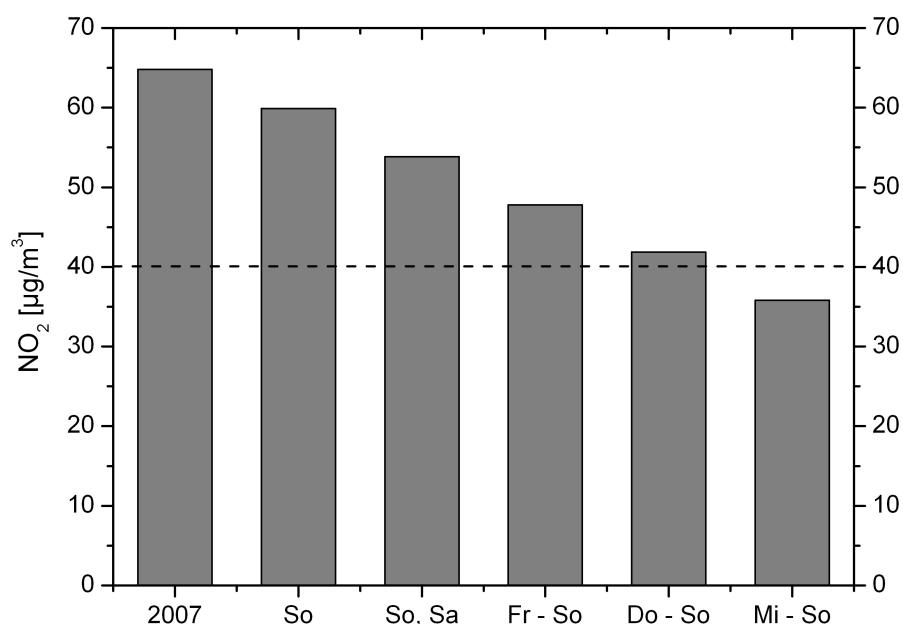


Abb. 28: Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentrationen im Jahr 2007 (tatsächlicher Wert) und nach angegebenen autofreien Wochentagen (modellierte Werte)

Es ist eine kontinuierliche Zunahme der verkehrsfreien Wochentage abgebildet. Der Jahresmittelwert der NO₂-Konzentrationen sinkt mit Zunahme der verkehrsfreien Tage ebenfalls kontinuierlich. Möchte man also eine ausreichende Reduktion erzielen, müsste die Weseler Straße von Mittwoch bis Sonntag für den Kraftfahrzeugverkehr durchgehend gesperrt werden.

5 Fazit und Ausblick

Der Straßenverkehr, als Hauptemittent der Stickoxide, nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die Stickstoffdioxidimmissionen. Eine ausreichende und notwendige Minderung der NO₂-Konzentrationen kann daher nur erfolgen, wenn der Kraftfahrzeugverkehr drastisch reduziert oder die Fahrzeugtechnik deutlich verbessert wird. Eine Senkung der NO₂-immissionen an der Weseler Straße auf den gesetzlichen Jahresgrenzwert wird nur mit radikalen Maßnahmen zu verwirklichen sein. Auch wenn die aufgeführten Maßnahmen eine Minderung der NO₂-Immissionen prognostizieren, wird man eine Senkung auf Grenzwertniveau nur durch eine Sperrung der Weseler Straße während einiger Wochentage erzielen. Dieses ist nicht nur notwendig aufgrund der Gesetzeslage, sondern auch da die Gesundheit der Anwohner gefährdet ist. Als Schritt in Richtung Grenzwerteinhaltung ist eine Erweiterung der Maßnahme Umweltzone notwendig. Der Einbezug der Windverhältnisse speziell an der Weseler Straße kann eine solche Erweiterung darstellen.

6 Literaturverzeichnis

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2006): Luftreinhalteplan der Bezirksregierung Köln für das Stadtgebiet Köln. Köln

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN (2009): Luftreinhalte- und Aktionsplan Aachen. Köln

BEZIRKSREGIERUNG KÖLN ABTEILUNG GEOBASIS.NRW (2009): Topographisches Informationsmanagement-TIM-online.

<http://www.tim-online.nrw.de/tim-online/initParams.do>,
abgerufen am: 10.09.2008

BEZIRKSREGIERUNG MÜNSTER (2009): Luftqualitätsplan für das Stadtgebiet Münster. Münster

BIMSCHG (2009): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BIMSchG)
<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/bimschg/gesamt.pdf>,
abgerufen am 10.09.2009

BIMSCHV (2002): Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft- 22. BIMSchV)
http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_22_2002/gesamt.pdf,
abgerufen am 10.09.2008

BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (2009): Umweltzonen sollen für saubere Luft in den Innenstädten sorgen
http://www.bmvbs.de/Klima_-Umwelt-Energie/Mobilität-Verkehr/Umweltzone-2936.1002640/Umweltzonen-sollen-für-sauber.htm, abgerufen am 27.09.2009

Epooly Ltd. (2009): Der monatliche Wetterrückblick 2007.
http://www.windinfo.eu/de/windinfo/wind_wetter_nachlese/rueckblick_2007/januar_2007.html, abgerufen am 10.09.2009

Etling, D. (2008): Theoretische Meteorologie. Eine Einführung. Dritte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg

FAHRMEIR et al. (2007) Fahrmeier, L., Künstler, R., Pigeot, I., Tutz, G. (2007): Statistik- Der Weg zur Datenanalyse. Sechste Auflage. Springer-Verlag, Berlin

Fezer, F. (1995): Das Klima der Städte. Erste Auflage. Justus Perthes Verlag Gotha GmbH Heidelberg

FINLAYSON-PITTS B.J, PITTS J.N. (2000): Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere: Theory, Experiments, and Applications. Academic Press, San Diego

-
- FOKEN, T. (2006): Angewandte Meteorologie. Mikrometeorologische Methoden. Zweite Auflage. Springer Verlag Berlin
- GIETL, J.K. (2008): Source apportionment of airborne particulate matter in Münster, Germany. Inauguraldissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften. Westfälische Wilhelms-Universität Münster
- GIETL, J.K., KLEMM, O. (2009): Analysis of traffic and meteorology on airborne particulate matter in Münster, NW Germany. Journal of the Air and Waste Management Association 59, 809-818.
- GRAEDEL, T.E., CRUTZEN P.J. (1994): Chemie der Atmosphäre. Bedeutung für Klima und Umwelt. Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg
- GUDERIAN, R (2000): Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie: Band 1A: Atmosphäre: Anthropogene und biogene Emissionen - Photochemie der Troposphäre - Chemie der Stratosphäre und Ozonabbau. Berlin Springer Verlag
- HÄCKEL, H. (2008): Meteorologie. Sechste Auflage. Ulmer, Stuttgart
- HELBIG et al. (1999) Helbig A., Baumüller J., Kerschgens M.J. (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. Zweite Auflage. Springer Verlag, Heidelberg
- KUTTLER, W. (2009): Klimatologie. Ferdinand Schöningh, Paderborn
- KUTTLER et al. (2005) Kuttler, W., Hupfer, P., Chmielewski, F.M., Pethe, H. (2005): Witterung und Klima. Eine Einführung Meteorologie und Klimatologie. Elfte Auflage. Teubner Verlag Wiesbaden
- LAHMANN, E. (1990): Luftverunreinigung – Luftreinhaltung. Eine Einführung in ein interdisziplinäres Wissensgebiet. Parey Berlin
- LANDESAMT FÜR NATUR, UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ NORDRHEIN-WESTFALEN (2009): Auswirkungen der Umweltzone Köln auf die Luftqualität – Auswertung der Messdaten.
http://www.lanuv.nrw.de/luft/pdf/Umweltzone_Koeln_20090625.pdf, abgerufen am 12.09.2009
- LANUV NRW (2009): Stationen zur Messung der Luftqualität in NRW
<http://www.lanuv.nrw.de/luft/temes/stat.htm>, abgerufen am 23.03.2009
- LANUV NRW (2009 a): Kontinuierliche Messverfahren.
http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/kon_messung.htm, abgerufen am 12.09.2009
- LANUV NRW (2009 b): Stickstoffdioxidkonzentrationen im städtischen Hintergrund.
<http://www.lanuv.nrw.de/umweltindikatoren-nrw/index.php?indikator=4=indi#def>, abgerufen am 04.03.2009

LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN (2005): Feinstaubkohortenstudie Frauen in NRW. Langfristige gesundheitliche Wirkungen von Feinstaub in Nordrhein-Westfalen 2002-2005. Fachbericht 7/2005

http://www.lanuv.nrw.de/veroeffentlichungen/fachberichte/fachb07/fachbericht7_luanrw_b.pdf, abgerufen am 12.09.2009

OKE, T.R. (1987): Boundary layer climates. Second Edition. Methuen, London:

OPENSTREETMAP (2009): Die freie Wiki-Weltkarte

<http://www.openstreetmap.org/export/>

abgerufen am 18.09.2009

ROEDEL, W. (2000): Physik unserer Umwelt. Die Atmosphäre. Dritte Auflage. Springer Verlag Berlin

SEINFELD, J. H., PANDIS, S. N. (2006): Atmospheric Chemistry and Physics. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey

STUDIENPROJEKT STRAßENVERKEHR (2008), Studenten der Universität Münster: Studienprojekt Straßenverkehr. Leitung: Prof. Dr. Klemm, O., Prof. Dr. Krüger, A.

STULL, R. (1997): An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

STADT MÜNSTER, AMT FÜR STADTENTWICKLUNG, STADTPLANUNG, VERKEHRSPLANUNG, PRESSE- UND INFORMATIONSAMT (2008): Münster im Spiegel der Zahlen 2008.

http://www.muenster.de/stadt/stadtplanung/pdf/Faltblatt_Muenster_im_Spiegel_2008.pdf, abgerufen am: 27.09.2009

Umweltbundesamt (2007): Nur mit Plakette durch die Umweltzone. Presseinformation Nr. 10 / 2007

<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/2007/pd07-010.htm>, abgerufen am 10.09.2009

UMWELTBUNDESAMT (2008): Luft und Lufreinhaltung, Luftpollutionen
<http://www.umweltbundesamt.de/luft/luftmessnetze/index.htm>, abgerufen am 10.09.2009

UMWELTBUNDESAMT (2008 a): Richtlinie 96/62/EG des Rates vom 27.9.1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität

<http://www.umweltbundesamt.de/luft/infos/gesetze/eu/luft-rl.htm>, abgerufen am 10.09.2009

UMWELTBUNDESAMT (2008 b): Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22.4.1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft.

<http://www.umweltbundesamt.de/luft/infos/gesetze/eu/luft-rl.htm>, abgerufen am 10.09.2009

UMWELTBUNDESAMT (2008 c): Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa

<http://www.umweltbundesamt.de/luft/infos/gesetze/eu/luft-rl.htm>, abgerufen am 10.09.2009

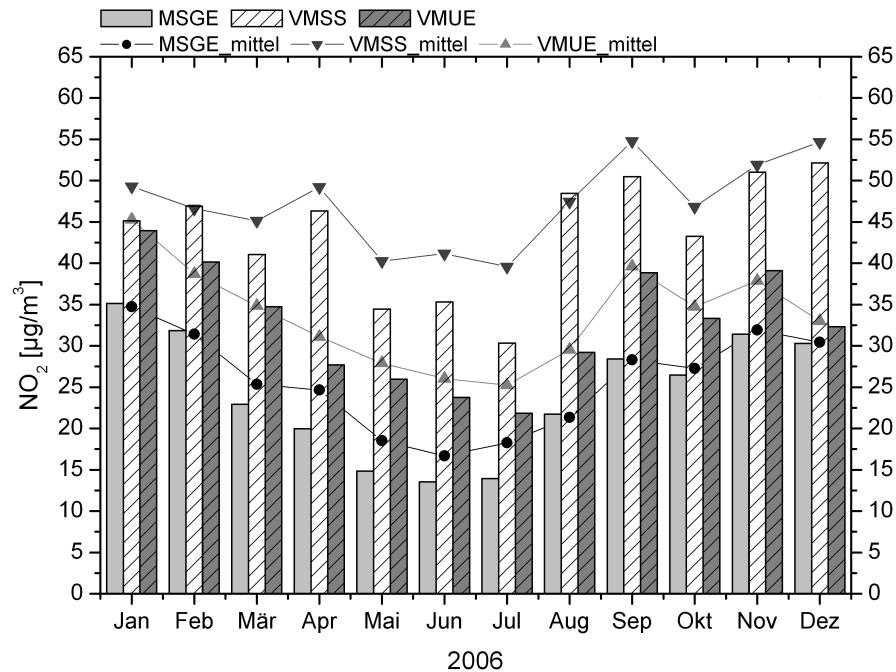
UMWELTBUNDESAMT (2009): Umweltzonen und Luftreinhaltepläne in Deutschland

<http://gis.uba.de/website/umweltzonen/index.htm>, abgerufen am 27.09.2009

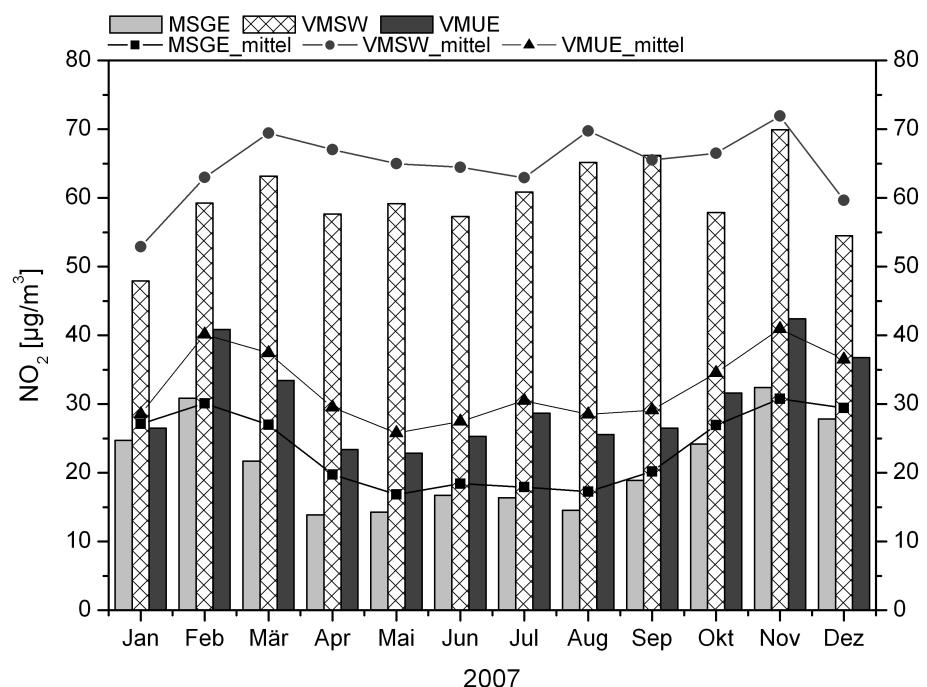
UMWELTBUNDESAMT (2009 a): Daten zur Umwelt - Emissionen ausgewählter "klassischer" Luftschadstoffe nach Quellkategorien.

<http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do?ident>, abgerufen am 13.09.2009

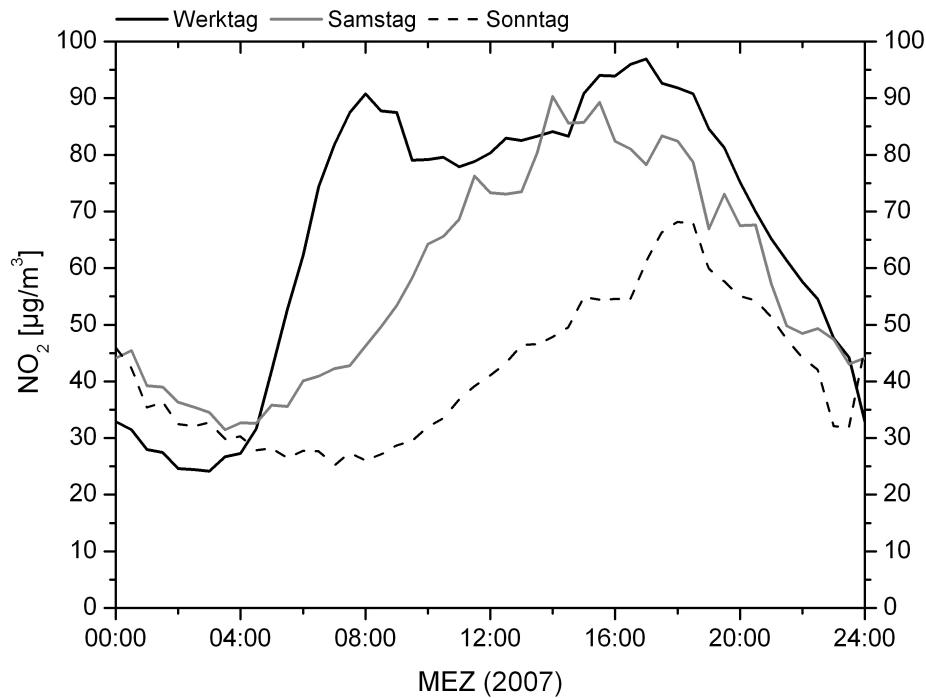
7 Anhang



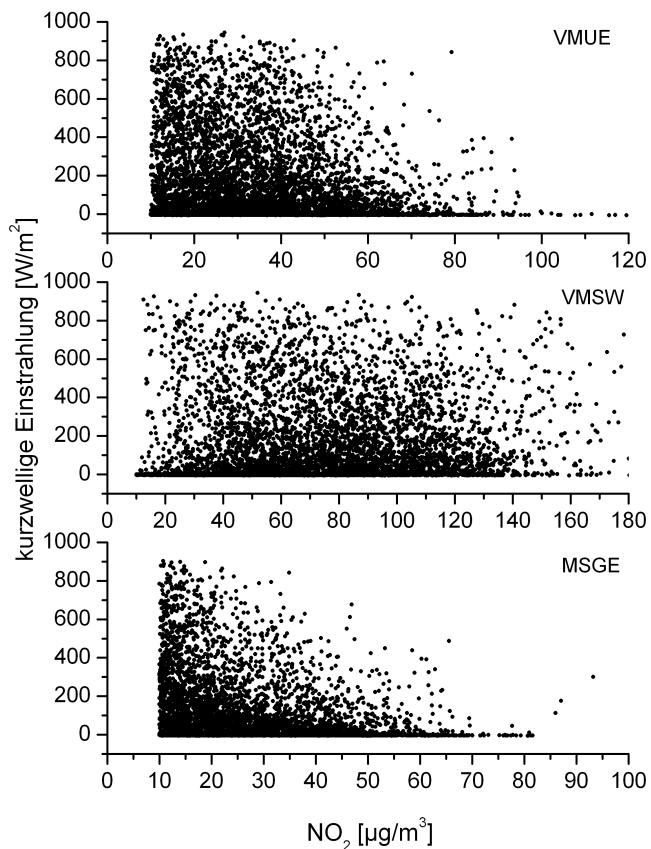
Anhang A1: Monats-Mediane und Monatsmittel 2006 der Stationen Münster-Geist (MSGE), Steinfurter Straße (VMSS), Münster-Friesenring (VMUE)



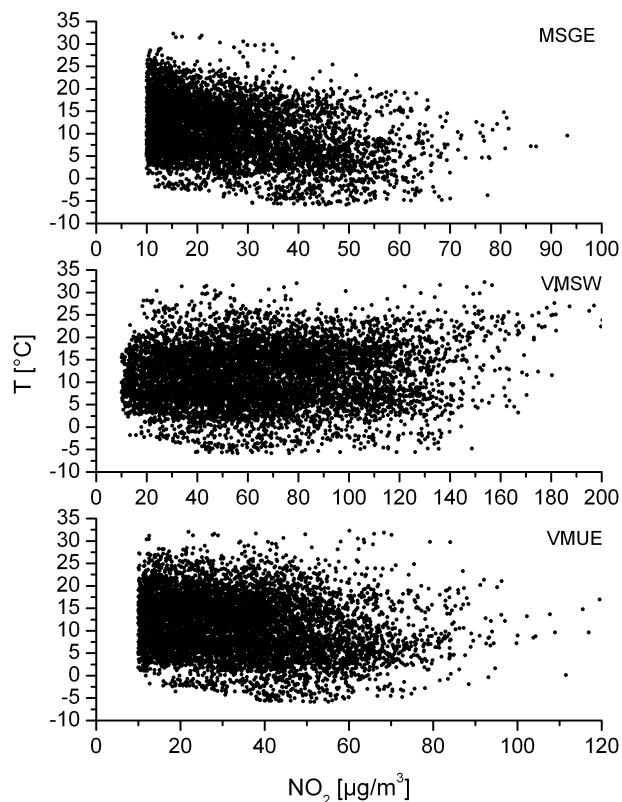
Anhang A2: Monats-Mediane und Monatsmittel 2007 der Stationen Münster-Geist (MSGE), Münster-Friesenring (VMUE) und Weseler Straße (VMSW)



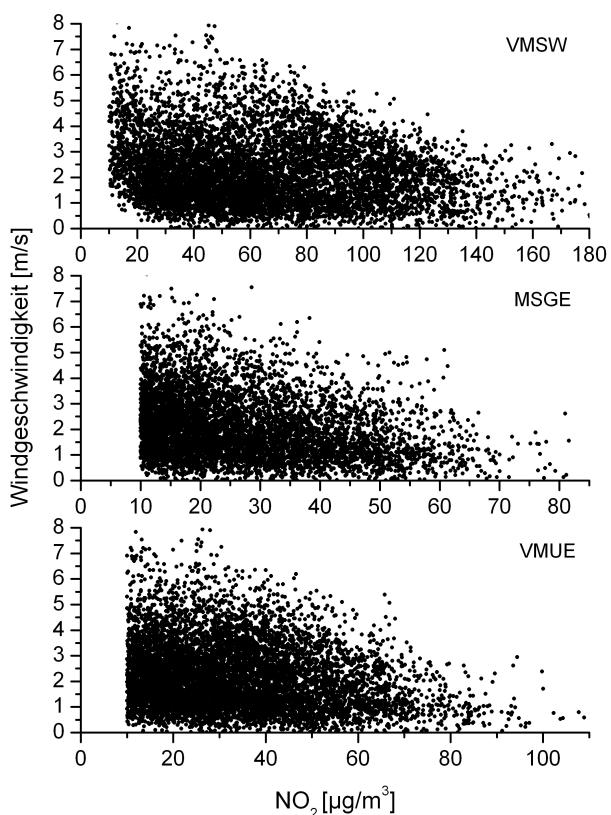
Anhang B: Mediantagesgänge 2007 an der Station Münster-Weseler Straße (VMSW)



Anhang C1: Streudiagramme der NO₂-Konzentrationen und Kurzwelliger Einstrahlung an den LUQS-Stationen (2007)



Anhang C2: Streudiagramme der NO₂-Konzentrationen und Kurzwelliger Einstrahlung an den LUQS-Stationen (2007)



Anhang C2: Streudiagramme der NO₂-Konzentrationen und Windgeschwindigkeit an den LUQS-Stationen (2007)

8 Danksagung

Ich danke Prof. Dr. Otto Klemm für die Anregungen, Hinweise und die gute Betreuung.

Ich bedanke mich beim Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen für die Bereitstellung der Daten. Besonderer Dank gilt Sabine Wilhelm für die Zusammenstellung der Daten.

Danke an Frank Grießbaum und Dr. Andres Schmidt für die Hilfestellungen zu Beginn der Arbeit.

Bei den Studenten des Studienprojekts Straßenverkehr 2008 für die Verkehrszählungen an der Weseler Straße und Dr. Johanna Katharina Gietl für die Daten zur Stabilitätsberechnung bedanke ich mich.

Vielen Dank an Volker, Susanne, Janina, und Corina, die fleißigen Korrekturleser!

9 Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Alle Stellen, die ich wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften übernommen habe, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Münster, 2009

Nina Kampling