

TEXTE

25/2010

Feinstaub und NO₂

Entwicklung und Validierung einer Methode zur
immissionsabhängigen dynamischen Verkehrs-
steuerung

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Förderkennzeichen 205 45 130
UBA-FB 001366

Feinstaub und NO₂

**Entwicklung und Validierung einer Methode zur
immissionsabhängigen dynamischen
Verkehrssteuerung**

von

G. Ludes
B. Siebers

simuPlan, Dorsten

T. Kuhlbusch
U. Quass
M. Beyer

Institut für Energie- und Umwelttechnik, Duisburg

F. Weber
Stadt Hagen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennummer&Suchwort=3936
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 3.1 Umwelt und Verkehr
Marion Malow

Dessau-Roßlau, Mai 2010

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001366	2.	3.
4. Titel des Berichts Feinstaub- und NO ₂ – Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) G. Ludes, B. Siebers, T. Kuhlbusch, U. Quass, M. Beyer, F. Weber	8. Abschlussdatum 31.3.2008	9. Veröffentlichungsdatum Mai 2010
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) Stadtverwaltung Hagen Umweltamt 58042 Hagen Rathausstraße 11	10. UFOPLAN-Nr. 205 45 130	11. Seitenzahl 134
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau	12. Literaturangaben 19	13. Tabellen und Diagramme 23
15. Zusätzliche Angaben	14. Abbildungen 41	
16. Kurzfassung In Hagen wurden in den letzten Jahren aufgrund des Inkrafttretens der 22. BImSchV umfangreiche lufthygienische Untersuchungen in Form von Messungen und Modellrechnungen durchgeführt. Hierbei ergaben sich für die Straßenzüge des Innenstadtrings und die Hauptzufahrtstraßen hohe		

Konzentrationen für Stickstoffdioxid und Feinstaub. Hauptverursacher ist erwartungsgemäß der Straßenverkehr, insbesondere der Schwerlastverkehr. Das von der Projektgruppe zur Aufstellung des Luftreinhalte- und Aktionsplans Hagen Innenstadt festgelegte Maßnahmenkonzept sieht deshalb u. a. ein LKW-Routenkonzept und eine dynamisch immissionsabhängige Verkehrssteuerung vor.

In dem hier vorgestellten Forschungsprojekt werden die Funktionsfähigkeit und die lufthygienischen Auswirkungen einer immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung des Schwerlastverkehrs im Bereich des besonders kritisch belasteten Märkischen Rings untersucht.

Das innovative Konzept sieht vor, dass durch das Steuerungsprogramm *simDRIVE* der Märkische Ring zeitlich befristet für den Schwerlastverkehr gesperrt wird, wenn in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen und den meteorologischen Austauschbedingungen kritische Immissionswerte prognostiziert werden. Während dieser Sperrzeiten wird der Schwerlastverkehr durch dynamische und statische Beschilderungen auf zuvor festgelegte Alternativstrecken geführt, um die Erreichbarkeit der gewünschten Ziele zu gewährleisten.

Mit diesem Forschungsvorhaben soll weiterhin gezeigt werden, a) ob die für NO₂ entwickelte Methode auch für die Reduzierung der Feinstaubbelastung angewendet werden kann, b) wie sich die Maßnahme auf die Immissionssituation in anderen lufthygienisch stark belasteten Straßen der Stadt Hagen auswirkt und c) ob eine Übertragung auf andere Städte möglich ist.

17. Schlagwörter

Luftqualitätsrahmenrichtlinie 96/62/EG, Stickstoffdioxid, Feinstaub, PM₁₀, PM_{2,5}, Luftreinhalte- und Aktionsplan, Straßenverkehr, Schwerlastverkehr, Maßnahmenbewertung, Messungen und Modellrechnungen, LKW-Routenkonzept, immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung, Straßenschluchten, Hot-Spots, Computersimulationen, Verkehrsverlagerungen

18. Preis

19.

20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001366	2.	3.
4. Report Title <p>Fine particles and NO₂ - Development and validation of a method for the immission-relevant, dynamic re-routing of traffic</p>		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s)		
8. Report Date 31.3.2008		
9. Publication Date May 2010		
6. Performing Organisation (Name, Address) <p>Stadtverwaltung Hagen Umweltamt 58042 Hagen Rathausstraße 11</p>		
10. UFOPLAN-Ref. No. 205 45 130		
11. No. of Pages 134		
7. Sponsoring Agency (Name, Address) <p>Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau</p>		
12. No. of Reference 19		
13. No. of Tables, Diagrams 23		
14. No. of Figures 41		
15. Supplementary Notes		
16. Abstract <p>Due to the coming into effect of the twenty-second BImSchV comprehensive investigations on the ambient air quality have been carried out in the city of Hagen in recent years by means of measurement and modelling. High concentrations of nitrogen dioxide and respirable dust have been found along the main streets and the roads belonging to the city ring road system. Main cause of the</p>		

present situation is road traffic, esp. heavy duty vehicles (HDV). Therefore the concept of measures for the implementation of the air monitoring plan and the action plan set up by the project group includes a HDV-routing system and dynamic, immission-relevant re-routing of traffic.

Through this research project the practicability and the effects on air quality of the dynamic, immission-relevant re-routing of HDV-traffic will especially be examined within the highly polluted area of the "Märkischer Ring". By making use of the control programme *simDRIVE* this innovative concept allows temporary closures of the "Märkischer Ring" for HDV-traffic if transgression of critical limit values is prognosticated due to traffic volume and meteorological circumstances. During these closure periods HDV-traffic will be diverted to alternative and previously determined routes by dynamic and static traffic signs in order to guarantee that intended destinations can be reached.

With the help of this research project it should be demonstrated in addition a) if and how this particular method for NO₂ can also be applied on the reduction of respirable dust, b) how this measure affects the situation of air pollution regarding respirable dust in other parts of Hagen and c) if the transfer of methods for the use in other cities is possible.

17. Keywords

European Air Quality Framework Directive -96/62/EG, nitrogen dioxide, respirable dust, PM₁₀, PM_{2,5} action- and minimisation plans, road traffic, heavy duty vehicles (HDV), evaluation of measurements, measurements and modelling, traffic routing concept, immission-relevant dynamic rerouting system, road canon, hot-spots, computer simulation, blocking periods, interdictions

18. Price

19.

20.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	7
Abkürzungen, Maßeinheiten, Symbole.....	9
Vorwort.....	12
Zusammenfassung.....	14
Summary.....	18
1 Einleitung	21
1.1 Ausgangslage	21
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	24
1.3 Planung und Vorgehen	25
2 Messdatenerhebung	27
2.1 Meteorologische Daten	30
2.2 Verkehr	34
2.3 Luftsadstoffmessungen	35
2.3.1 Messorte	35
2.3.2 Qualitätssicherung und Datenaufbereitung	36
2.3.2.1 Technische Qualitätssicherungs-Maßnahmen	36
2.3.2.2 Datenprüfung und -aggregierung	39
3 Messergebnisse	41
3.1 Meteorologie	41
3.1.1 Thermische Stabilität / Inversionen	41
3.1.2 Wind.....	43
3.2 Verkehr	47
3.3 Luftsadstoff-Konzentrationen (Gesamtzeitraum).....	49
3.3.1 Bewertungsmaßstab	49
3.3.2 Jahresmittelwerte der Luftsadstoff-Konzentrationen	50
3.3.2.1 NO ₂	52
3.3.2.2 PM ₁₀	52

3.3.2.3 PM _{2,5}	53
3.3.3 Überschreitungshäufigkeiten der Kurzzeit-Grenzwerte	53
3.3.3.1 NO ₂	54
3.3.3.2 PM ₁₀	54
3.3.4 Mittelwerte für Werkstage, Samstage und Sonntage.....	55
3.3.5 Fazit der Luftqualitätsmessungen	57
4 Luftschatstoffemissionen des Straßenverkehrs.....	58
4.1 Berechnungsmethodik	58
4.2 Ergebnisse	60
5 Entwicklung des Steuerungs-Algorithmus	68
5.1 Analyse der lufthygienisch relevanten Einflussgrößen.....	69
5.1.1 Zeitliche Verteilung hoher NO ₂ -Immissionen	69
5.1.2 Windverhältnisse bei hohen NO ₂ -Immissionen	72
5.1.3 Einfluss der atmosphärischen Schichtung.....	74
5.1.4 Strahlung und Photochemie.....	75
5.1.5 Wechselwirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren	78
5.1.6 Zusammenfassung	80
5.2 Steuerungsmodul	81
5.2.1 Konzeption	81
5.2.2 Beurteilung und qualitativer Vergleich im fiktiven Betrieb	84
5.2.3 Immissionsminderungspotenzial	88
5.2.3.1 Methodik zur Bestimmung des Minderungspotenzials	88
5.2.3.2 Ergebnisse zum Minderungspotenzial.....	91
5.3 Rückschlüsse	96
6 Ergebnisse	98
6.1 LKW-Sperrung im Betrieb	98
6.1.1 Statische Steuerung.....	98
6.1.2 Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung I	98
6.1.3 Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung II	101
6.2 Verkehrliche Auswirkungen.....	102
6.3 Bestimmung der Auswirkungen anhand der Immissionsmessungen	106

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

6.4	Bestimmung der Auswirkungen anhand von Modellrechnungen	109
6.4.1	Emissionen	110
6.4.2	Immissionen.....	112
7	Diskussion und Bewertung	114
7.1	Auswirkungen der Maßnahmen im Hagener Stadtgebiet	114
7.1.1	Gesamtstädtische Auswirkungen durch Verlagerung.....	114
7.1.2	Auswirkungen auf der Umgehungsstrecke	118
7.1.2.1	Eingangsdaten	120
7.1.2.2	Ergebnisse	121
7.2	Übertragbarkeit der Methodik auf andere Standorte	123
7.3	Rückschlüsse für die Luftreinhalteplanung in Hagen	127
8	Fazit	129
9	Literaturverzeichnis	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Einbindung der Stadt Hagen in das regionale und das überregionale Straßennetz.....	21
Abbildung 1.2: Luftbild der Innenstadt von Hagen	22
Abbildung 2.1: Zeitliche Gliederung des Untersuchungszeitraumes	27
Abbildung 2.2: Blick auf die Hagener Innenstadt Richtung Südost	30
Abbildung 2.3: Bebauungssituation im kritischen Bereich des Märkischen Rings.....	31
Abbildung 2.4: Lage der meteorologischen Stationen	32
Abbildung 2.5: Aufstellungsorte der Messcontainer	35
Abbildung 2.6: Fotografien der Messcontainer und ihrer unmittelbaren Umgebung	38
Abbildung 3.1: Häufigkeit des Auftretens von Inversionen im Tagesverlauf ..	43
Abbildung 3.2: Windrichtungsverteilungen.....	44
Abbildung 3.3: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeiten.....	45
Abbildung 3.4: Mittlere Verkehrstagesgänge (Halbstundenmittelwerte) am Märkischen Ring	48
Abbildung 3.5: Boxplots der Schadstoffkonzentrationen (Tagesmittel, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	51
Abbildung 4.1: Aufteilung des PKW-Bestandes von Hagen auf die einzelnen Schadstoffklassen (Bezugsjahr 2006).....	58
Abbildung 4.2: Märkischer Ring: Tagesgänge der NO_x -Verkehrsemissionen.	64
Abbildung 4.3: Märkischer Ring: Tagesgänge der PM_{10} -Verkehrsemissionen	65
Abbildung 4.4: Vergleich der Emissionen eines Fahrzeugs der Gruppe SNfz mit den Emissionen eines Fahrzeugs der Gruppe PKW	66
Abbildung 5.1: Märkischen Ring: Mittlere Tagesgänge der NO_2 -Konzentrationen.....	70
Abbildung 5.2: Häufigkeit des Auftretens von NO_2 -Konzentrationen $>160\mu\text{g}/\text{m}^3$ im Tagesverlauf	71
Abbildung 5.3: Windrichtungshäufigkeiten bei NO_2 -Werten $> 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$	72
Abbildung 5.4: Mittlere NO_2 -Konzentration bei Windgeschwindigkeiten $< 2,0 \text{ m/s}$	73

Abbildung 5.5: Mittlerer Tagesgang der NO ₂ -Konzentrationen an Werktagen mit und ohne Inversionen.....	74
Abbildung 5.6: Mittlere tägliche Sonnenscheindauer im Untersuchungszeitraum	76
Abbildung 5.7: Zeitreihenanalyse - Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussgrößen	78
Abbildung 5.8: Fiktiver Betrieb der dynamischen Steuerung für exemplarische Zeiträume.....	87
Abbildung 5.9: „Scatter“-Plot NO ₂ gegen NO _x mit zugehöriger Regressionskurve	89
Abbildung 5.10: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf den NO ₂ -Mittelwert.....	91
Abbildung 5.11: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf die Überschreitungshäufigkeit des NO ₂ - Stundengrenzwertes	92
Abbildung 5.12: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf den PM ₁₀ -Mittelwert	93
Abbildung 5.13: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf die Häufigkeit von PM ₁₀ -Tagesmittelwerten > 50 µg/m ³	94
Abbildung 5.14: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf den PM _{2,5} -Mittelwert.....	96
Abbildung 6.1: Aufbau des Programms zur dynamischen Verkehrslenkung...	99
Abbildung 6.2: Sperrzeiten der dynamischen immissionsabhängigen Steuerung I	100
Abbildung 6.3: Mittleres LKW-Aufkommen während der Nullphasen sowie während der Phasen mit LKW-Sperrungen am Märkischen Ring	102
Abbildung 6.4: Missachtung des Durchfahrverbotes.....	103
Abbildung 6.5: Mittlere NO ₂ -Immission während der Nullphase und der zweiten Phase der dynamischen Steuerung am Märkischen Ring.....	107
Abbildung 6.6: Spezifische Zusatzbelastung am Märkischen Ring während der dynamischen Sperrung II sowie der Nullphasen	108

Abbildung 6.7: Reduktion der NO _x -Emissionen durch die LKW-Sperrungen während der Sperrzeiten.....	110
Abbildung 7.1: Verlagerungen des werktäglichen Schwerlastverkehrs auf dem Innenstadtring durch LKW-Sperrungen am GvG und MR	116
Abbildung 7.2: Märkischer Ring mit Ausweichroute	118
Abbildung 7.3: Untersuchter Bereich der Rembergstraße	119

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Messgrößen der Meteorologiestationen	31
Tabelle 2.2:	Messparameter und -geräte der IUTA-Messcontainer	37
Tabelle 3.1:	Tägliches Verkehrsaufkommen auf dem Märkischen Ring	47
Tabelle 3.2:	Grenzwerte der verkehrsrelevanten Schadstoffe zum Schutz der menschlichen Gesundheit nach der 22. BlmSchV	49
Tabelle 3.3:	Jahresmittelwerte der gemessenen Schadstoff-Konzentrationen	50
Tabelle 3.4:	Überschreitungshäufigkeiten der Kurzzeit-Grenzwerte für NO ₂ bzw. PM ₁₀ gem. 22. BlmSchV. inkl. und exkl. Überschreitungstage durch grenzüberschreitenden Eintrag von Wüstensand	54
Tabelle 3.5:	Kenndaten der Schadstoffkonzentrationen für Werk- und Wochenendtage;	56
Tabelle 4.1:	PM ₁₀ -Emissionsfaktoren für Aufwirbeln und Abriebe	59
Tabelle 4.2:	Märkischer Ring: Mittlere und maximale NO _x -Emissionsraten	60
Tabelle 4.3:	Märkischer Ring: Mittlere und maximale PM ₁₀ -Emissionsraten	61
Tabelle 4.4:	Ableitung der Emissionsraten für PM _{2,5}	62
Tabelle 4.5:	Märkischer Ring: Mittlere und maximale PM _{2,5} -Emissionsraten	63
Tabelle 5.1:	Kriterien zur Aktivierung des Lkw-Durchfahrverbotes	82
Tabelle 5.2:	Kenngrößen der unterschiedlichen Sperrkonzepte	85
Tabelle 6.1:	LKW-Minderung gegenüber den Nullphasen in den unterschiedlichen Sperrphasen.....	105
Tabelle 6.2:	Reduktion der Gesamtemissionen durch die LKW-Sperrungen während der Sperrzeiten.....	111
Tabelle 6.3:	Auswirkungen der LKW-Sperrungen auf die Immissionssituation am Märkischen Ring	112

Tabelle 7.1:	Einfluss von Sperrungen auf das Schwerlastverkehrsaufkommen an Werktagen (DTV _W -Werte - LKW-Anzahl pro 24 h)	115
Tabelle 7.2:	Hintergrundbelastungswerte in µg/m ³	120
Tabelle 7.3:	Verkehrsdaten der Rembergstraße.....	120
Tabelle 7.4:	Daten zur Beschreibung der Straßengeometrie.....	121
Tabelle 7.5:	Mittlere Emissionsraten.....	121
Tabelle 7.6:	Berechnete Immissionskenngrößen.....	122
Tabelle 7.7:	Investitionskosten zum Aufbau einer immissionsabhängigen dynamischen Verkehrslenkung	125

Abkürzungen, Maßeinheiten, Symbole

Abb.	Abbildung
AVZ	Automatische Verkehrszählstelle
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
BR	Immissionsmessstation Bergischer Ring
d	Tag
Ds	Diesel
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
E	Euro
F	Feiertag
FDP	Immissionsmessstation Ferdinand-David-Park
Fr	Freitag
Fz	Fahrzeug
ggf.	gegebenenfalls
GKAT	geregelter Katalysator
GvG	Immissionsmessstation Graf-von-Galen Ring
GW	Grenzwert
h	Stunde
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren
hv	Sonnenlicht
HVS	Hauptverkehrsstraße
i.d.R	in der Regel
IO	innerorts
JMW	Jahresmittelwert
K	Kelvin
Kfz	Kraftfahrzeug
km	Kilometer
LANUV	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW
LKW	Lastkraftwagen
LSA	Lichtsignalanlage

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

LUQS	Luftqualitätsüberwachungssystem des Landes Nordrhein-Westfalen
LzSz	Last- und Sattelzüge
m	Meter
m²	Quadratmeter
m³	Kubikmeter
Mo	Montag
MR	Immissionsmessstation Märkischer Ring
NO	Stickstoffmonoxid
NO_x	Stickstoffoxide
NO₂	Stickstoffdioxid
O₂	Sauerstoff
O₃	Ozon
PKW	Personenkraftwagen
PM_{2,5}	Particulate matter < 2,5 µm (Partikel mit aerodynamischem Durchmesser < 2,5 µm)
PM₁₀	Particulate matter < 10 µm (Partikel mit aerodynamischem Durchmesser < 10 µm)
P0	Luftdruck
QS	Qualitätssicherung
RF	relative Luftfeuchte
RR	Niederschlagsmenge
s	Sekunde
Sa	Samstag
SD	Sonnenscheindauer
SNfz	Schwere Nutzfahrzeuge (LKW und Sattelzug)
So	Sonntag
SR	Globalstrahlung
SW	Meteorologiestation der Sternwarte Hagen
Tab.	Tabelle
TMGW	Tagesmittel-Grenzwert

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

TMW	Tagesmittelwert
TKE	turbulente kinetische Energie
TT	Lufttemperatur
ÜDM	Meteorologiestation auf dem Dach des Finanzamtes am Märkischen Ring
vgl.	vergleiche
W	Watt
WR	Windrichtung
WS	Windgeschwindigkeit
µm	Mikrometer

Vorwort

Der motorisierte Straßenverkehr ist ein bedeutender Schadstoffemittent auch in Hagen. Verkehrsbedingt hohe Luftbelastungen ergeben sich insbesondere bei Feinstäuben und Stickstoffdioxid. Messungen haben ergeben, dass an mehreren Straßenabschnitten in der Innenstadt die Grenzwerte für den Gesundheitsschutz dauerhaft überschritten werden. Die Stadt hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, Mittel und Wege zu finden, wie diese Grenzwertüberschreitungen zu verhindern sind.

Um die Beeinträchtigung des Verkehrs so gering wie möglich zu halten, wurde eine Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung entwickelt. Es handelt sich dabei um ein onlinefähiges Verkehrsmanagementsystem, das auf der Grundlage von aktuellen Messwerten der NO₂-Immission, Windgeschwindigkeit und Windrichtung sowie des Verkehrsgeschehens den Einsatz von verkehrslenkenden Maßnahmen, wie Durchfahrverbote für Schwerlastverkehre prognostiziert.

Die vorliegende Studie baut nun auf diesen Ergebnissen auf. Sie untersucht messtechnisch die Wechselwirkungen von statischen und dynamischen Verkehrssperrungen auf die Immissionssituation im Stadtgebiet und ermöglicht so eine Optimierung der Auslösebedingungen der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung.

Gleichzeitig werden in unserer Studie die gesamtstädtischen Auswirkungen von Verkehrslenkungsmaßnahmen bewertet. Die Prüfung der Übertragbarkeit der Untersuchungsergebnisse auf andere Städte mit entsprechenden Handlungsempfehlungen bildet den Abschluss der Untersuchungen.

Dieses Projekt wurde im Auftrag des Bundesumweltministeriums im Rahmen des Umweltforschungsplans des Umweltbundesamtes durchgeführt.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Ich bedanke mich bei allen an der Untersuchung beteiligten, insbesondere beim Bundesumweltministerium und beim Umweltbundesamt sowie bei der Landesanstalt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW für Ihre Unterstützung und die kooperative Zusammenarbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Klein von der Arbeitsgemeinschaft Sternwarte Hagen e.V. für seinen persönlichen Einsatz bei der Übermittlung der Wetterdaten vom Eugen-Richter Turm.

Dr. Herbert Bleicher
Beigeordneter

Zusammenfassung

In Hagen wurden in den letzten Jahren umfangreiche lufthygienische Untersuchungen in Form von Messungen und Modellrechnungen durchgeführt. Hierbei ergaben sich für die Straßenzüge des Innenstadtrings und die Hauptzufahrtstraßen hohe Konzentrationen für Stickstoffdioxid und Feinstaub. Hauptverursacher ist erwartungsgemäß der Straßenverkehr, insbesondere der Schwerlastverkehr.

Das von der Projektgruppe zur Aufstellung des Luftreinhalte- und Aktionsplans Hagen Innenstadt festgelegte Maßnahmenkonzept sieht daher unter anderem ein LKW-Routenkonzept und eine dynamisch immissionsabhängige Verkehrssteuerung vor (vgl. [Bezirksregierung Arnsberg 2004] und [Bezirksregierung Arnsberg 2005]).

Im hier vorgestellten Forschungs- und Entwicklungsprojekt soll eine einfache Methodik zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung des Schwerlastverkehrs am lufthygienisch hoch belasteten Märkischen Ring entwickelt und validiert werden.

Des Weiteren waren folgende Fragestellungen zu beantworten:

Liefert die mit dem Ziel der Minderung hoher NO₂-Immissionen entwickelte Methode auch signifikante Beiträge zur Reduzierung der Feinstaubbelastung?

Welche lufthygienischen Auswirkungen ergeben sich durch Verlagerungseffekte und Umwegfahrten an anderen Straßen im Hagener Stadtgebiet?

Ist die Methodik auf andere Standorte/Städte übertragbar?

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Zur Entwicklung und Validierung des einfachen Steuerungsalgorithmus wurde ein umfangreiches Messprogramm durchgeführt, um die Verkehrsverhältnisse, die lufthygienischen Belastungssituationen und die meteorologischen Gegebenheiten im Bereich der Hagener Innenstadt zu erfassen.

Im Rahmen des Immissionsmessprogrammes wurden für den gesamten Innenstadtring (Märkischer Ring, Graf-von-Galen-Ring, Bergischer Ring) der Stadt Hagen Überschreitungen des Grenzwertes für das NO₂-Jahresmittel nachgewiesen. Am Märkischen Ring wurde zudem für NO₂ der Stundengrenzwert von 200 µg/m³ an mehr als 18 Stunden sowie der Grenzwert für den PM₁₀-Tagesmittelwert an mehr als 35 Tagen überschritten. Die Immissionsmessungen bestätigten somit die Einschätzung, dass der Märkische Ring der lufthygienisch am höchsten belastete Straßenzug in Hagen ist. Die Notwendigkeit besonderer Minderungsmaßnahmen für den Märkischen Ring wurden somit eindrucksvoll belegt.

Auf der Grundlage der Messdaten konnte das einfache und dennoch prognosegenaue EDV-System *simDRIVE* zur immissionsabhängigen Steuerung des Schwerlastverkehrs am Märkischen Ring entwickelt und in Betrieb genommen werden. Neben dem Verkehrsaufkommen wurden als wesentliche Steuerungsgrößen die meteorologischen Größen Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung identifiziert,

Bei der Überprüfung der Minderungswirkung anhand der im Rahmen dieses Projektes erhaltenen Messwerte, zeigten sich keine signifikanten Minderungen der NO₂, NO, PM₁₀ und PM_{2,5} Massenkonzentrationen. Dieses ist unter anderem auf die zumeist sehr geringe Befolgsrate (ca. 10% im Mittel, max. ca. 30%) der Steuerungssignale (LKW-Sperrung) zurückzuführen. Daher kann die Minderungswirkung nur modelltechnisch überprüft werden.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen konnte nachgewiesen werden, dass eine dynamische immissionsabhängige Verkehrssteuerung des Schwerlastverkehrs das Potenzial aufweist

- hohe NO₂-Immissionswerte deutlich zu mindern,
- die Zahl der PM₁₀-Überschreitungstage zu verringern,
- NO₂-, PM₁₀- und PM_{2,5}-Mittelwerte geringfügig abzusenken.

Ein Vergleich mit anderen Steuerungsstrategien zeigt, dass eine dynamische, der lufthygienischen Belastungssituation angepasste Steuerung von LKW-Durchfahrerverboten deutlich effektiver ist als statische Sperrungen zu bestimmten festgelegten Zeiten.

Durch die insgesamt kürzere Sperrdauer werden einerseits Verlagerungseffekte und hierdurch verursachte lufthygienische Verschlechterungen auf anderen Straßen verringert und andererseits lufthygienische Verbesserungen am Märkischen Ring aufgrund des hohen Immissionsminderungspotenzials während der Sperrzeiten optimiert. Die Minderungswirkung hängt aber in starkem Maße von der Befolgsrate des Durchfahrtverbotes während der Sperrzeiten ab.

Die in Hagen angewandte Methodik zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung kann auf andere Städte und Straßen übertragen werden, weil auch an anderer Stelle hohe verkehrsbedingte Immissionswerte im Prinzip von denselben Ursachen hervorgerufen werden.

Voraussetzung für die Inbetriebnahme von *simDRIVE* an anderer Stelle ist allerdings eine Anpassung an die besonderen Standortgegebenheiten auf der Grundlage von Messungen.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Für die zukünftige Luftreinhalteplanung in Hagen haben sich aus dem Forschungsprojekt folgende Erkenntnisse ergeben:

- Die Einhaltung der Grenzwerte am Märkischen Ring kann durch dynamische, zeitlich befristete LKW-Sperrungen alleine nicht erreicht werden. Aufgrund der besonderen Belastungssituation in der Hagener Innenstadt sind lokale verkehrliche Einzelmaßnahmen wegen der negativen lufthygienischen Effekte, die aus Verkehrsverlagerungen resultieren, nur bedingt zielführend.
- Positive lufthygienische Effekte lassen sich hingegen durch das von der Stadt Hagen erarbeitete „LKW-Routenkonzept“ erreichen. Ziel hierbei ist es, LKW-Verkehre großräumig um die Hagener Innenstadt herum zu leiten. In einer zukünftigen Eweiterungsstufe des LKW-Routenkonzeptes soll eine Beschilderung zur Lenkung der Schwerlastverkehre bereits an den Autobahnausfahrten erfolgen.
- Die immissionabhängige dynamische Verkehrssteuerung sollte als zusätzliches Lenkungsinstrument in das großräumige Routenkonzept integriert werden, um im Falle hoher lufthygienischer Belastungen in der Hagener Innenstadt den LKW-Verkehr auf weniger belasteten Ausweichstrecken um die Innenstadt herumzuführen.
- Mit der großräumigen Lenkung werden auf den lufthygienisch kritischen Straßenabschnitten nicht nur LKW-Ziel- und -Quellverkehre sondern insbesondere LKW-Durchgangsverkehre vermieden bzw. reduziert.

Summary

In the City of Hagen, comprehensive investigations on the ambient air quality have recently been carried out by means of measurements and modelling. High concentrations for nitrogen dioxide and respirable dust were found for the roads belonging to the City ring system. As to be expected, the main pollution source is road traffic, particularly due to heavy duty vehicles (HDV).

A project group commissioned to set up action and minimisation plans proposed i.a. a routing concept for HDV as well as dynamic immission-relevant rerouting system (c.f [Bezirksregierung Arnsberg 2004] and [Bezirksregierung Arnsberg 2005]).

The research project presented here aimed at the development and validation of a simplified methodology for the dynamic immission-relevant re-routing system with particular emphasis in the highly polluted street “Märkischer Ring”.

Besides, the project targeted to answer additional questions:

- 1) Is the method, being developed to lower high NO₂ concentrations, also efficient in reducing airborne dust concentrations?
- 2) Which effects on air quality can be caused by traffic shifts and deviations at other roads in the city?
- 3) Is it possible to transfer the method onto other places/cities?

To develop and validate the simplified algorithm a comprehensive, 1-year measurement program of traffic flow rates, air quality and meteorological parameters was carried out.

The air quality measurements revealed that exceedences of the annual limit for NO₂ occurred at all parts of the city ring system (Märkischer Ring, Graf-von-Galen-Ring, Bergischer Ring). At “Märkischer Ring”, the hourly limit value of 200 µg/m³ was exceeded in more than 18 hours, and exceedence of the daily limit for PM₁₀ occurred on 59 days. These findings prove the assumption that the “Märkischer Ring” must be considered as the most polluted road canyon in

the city of Hagen. Thus, the need for particular reduction measures is clearly indicated.

Based on the measurement results the simplified but nevertheless well-prognostic program “simDrive”, allowing a dynamic immission-relevant control of heavy duty traffic at the “Märkischer Ring”, could be developed and put into function. Besides the actual traffic volume also meteorological data – wind direction, wind speed and global radiation – were identified as essential input parameters.

An evaluation of the reduction effect using the measured pollutant concentrations did not show a significant influence on the NO₂, NO, PM₁₀ and PM_{2,5} mass concentrations. Beside other factors this is due to the general low compliance to the HDV transit interdiction (average 10%, maximum 30%). Therefore, the reduction effect could be assessed only by means of model calculations.

By means of computer simulations it is shown that a dynamic immission-relevant re-routing of the heavy duty traffic has the potential to

- significantly drop high NO₂ concentrations
- reduce the frequency of PM₁₀ exceedence days
- slightly lower NO₂, PM₁₀ and PM_{2,5} mean values

Comparisons made with other strategies clearly indicate the advantage of a dynamic control of HDV traffic over static approaches with fixed time transit interdictions. Due to overall shorter blocking periods traffic shifts to other roads can be reduced while air quality improvements at the “Märkischer Ring” are optimized because blocking is initiated only at situations with high reduction potential. However, the improvement significantly depends on the compliance to the interdictions during the blocking periods.

The methodology applied at the city of Hagen can be transferred to other cities and roads because principally at any road canyon the same mechanisms generate high traffic related air pollution. In any case, the system must be adapted to a given situation by measurements.

The main results of the project with respect to the future ambient air quality policy at the city of Hagen are

- a dynamic, temporary blocking of HDV traffic at the Märkischer Ring alone will not succeed in compliance to air quality standards
- due to the particular situation in the city centre local measures leading to traffic shifts have only limited potential
- the implementation of a “Green Zone” appears to be more meaningful because reduction might be achieved on a larger scale
- positive effects on the air quality are also achievable by the so-called “HDV routing system”. This system aims at re-routing HDV traffic to roads outside of the city. In a future phase this could also include information of HDV drivers already on the relevant highway exits.
- the dynamic immission-relevant re-routing system should be implemented as an additional control instrument within the framework of the large scale routing concept to distribute HDV traffic within the city to less polluted roads in case of high pollution episodes.
- the large scale routing system does not only affect “target and source” HDV traffic but also transit traffic.

1 Einleitung

In dem hier vorgestellten Forschungsprojekt wird die Funktionsfähigkeit und die lufthygienischen Auswirkungen einer immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung für den lufthygienisch besonders kritisch belasteten Märkischen Ring in der Hagener Innenstadt untersucht.

1.1 Ausgangslage

Die Innenstadt von Hagen wird durch ein Ringsystem erschlossen. Abbildung 1.1 zeigt die Verkehrserschließung der Hagener Innenstadt sowie die Anbindung an das regionale und überregionale Straßennetz (Autobahnen).

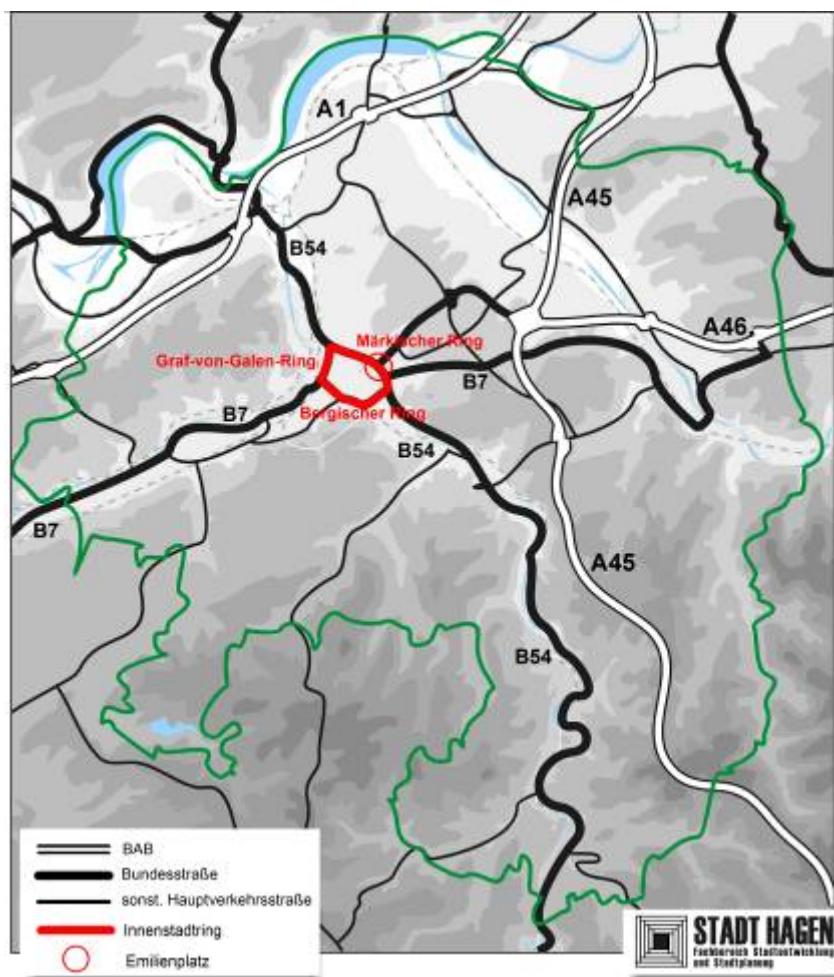


Abbildung 1.1: Einbindung der Stadt Hagen in das regionale und das überregionale Straßennetz

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Der Innenstadtring übernimmt die Verteilerfunktion für zwei wichtige überregionale Bundesstraßen (B7, B 54), die sich im Hagener Zentrum kreuzen und für den Autobahnzubringer zur A45 und A46 (vgl. Abbildung 1.1). Über den Knoten "Emilienplatz" im Hagener Zentrum werden täglich etwa 60.000 Kraftfahrzeuge auf das Ringsystem verteilt. Durch drei Autobahnen (A1, A45, A46) mit sechs Anschlüssen ist Hagen an das Fernstraßennetz angebunden (siehe Abbildung 1.1.). Aber nicht nur die überregionale Verteilerfunktion, sondern auch der starke Ziel- und Quellverkehr der Innenstadt führen auf einigen Straßenabschnitten des Innenstadtringes zu kritischen Schadstoffbelastungen.

LKW-Durchgangsverkehre auf den Tangenten B54 und häufig ausgelöste Autobahnbedarfsumleitungen entlang der B7 wirken sich zudem negativ auf die lufthygienische Belastungssituation in der Hagener Innenstadt aus.

Die Abbildung 1.2 zeigt, dass in der Innenstadt dichte Bebauungsstrukturen vorherrschen, die häufig ungünstige Austauschbedingungen zur Folge haben.



Abbildung 1.2: Luftbild der Innenstadt von Hagen

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Bereits 1999 wurden von der Stadt Hagen im Rahmen von Screening-Berechnungen alle gefährdeten Straßenabschnitte im Stadtgebiet überprüft. Hierbei wurden mehrere Straßenabschnitte mit kritischen Immissionswerten sondiert. Besonders hohe Immissionswerte wurden aufgrund der hohen Verkehrsbelastung und der extrem engen Bebauung für einen Teilabschnitt des Märkischen Ring ermittelt.

Hauptverursacher für die hohen Schadstoffkonzentrationen in Hagen ist nach [LUA 2002] der Straßenverkehr, insbesondere der LKW-Verkehr. Als Folge hiervon hat die Stadt Hagen in Zusammenarbeit mit dem Land Nordrhein-Westfalen den Prototyp zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung entwickeln lassen [ARTec/simuPlan 2002]. Hierdurch sollen kurzfristige Überschreitungen von Grenzwerten im Luftschadstoffsektor am Märkischen Ring verhindert werden.

In [ARTec/simuPlan 2002] wurde die grundsätzliche Funktionsfähigkeit dieses Managementsystems nachgewiesen und hinsichtlich der modelltechnischen Qualität dokumentiert. Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigten, dass die hohen Luftschadstoffkonzentrationen durch eine immissionsabhängige dynamische Steuerung der Schwerlastverkehre deutlich reduziert werden können.

Aufgrund der zwischenzeitlich durch Immissionsmessungen festgestellten Überschreitungen der Grenzwerte der 22. Bundesimmissionsschutzverordnung [22. BlmschV 2002] wurde für die Innenstadt von Hagen ein Luftreinhalteplan aufgestellt [Bezirksregierung Arnsberg 2003].

Im Rahmen der Umsetzung des Luftreinhalteplans soll das System der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung zum Einsatz kommen.

Aktuelle Untersuchungen machten die Erweiterung des Luftreinhalteplans um einen Aktionsplan für den Graf-von-Galen-Ring erforderlich. Während am Märkischen Ring mit zeitlich befristeten LKW-Sperrungen primär die NO₂-Spitzenbelastung gesenkt werden soll, soll mit Hilfe des Aktionsplans am Graf-

von-Galen-Ring die Feinstaubbelastung mit statischen Lkw-Sperrungen verringert werden, so dass hier der Tagesmittelwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nicht häufiger als 35 mal im Jahr überschritten wird.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben sollten folgende Fragestellungen untersucht werden:

- Lässt sich der komplexe Prognosealgorithmus einer immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung am Märkischen Ring ([ARTec/simuPlan 2002] und [MODUS CONSULT 2002]) durch ein einfacheres und robusteres Modell ersetzen?
- Ist die Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung, die unter der ausschließlichen Betrachtung von NO₂-Stundenmittelwerten entwickelt wurde, für die Reduzierung der Feinstaubbelastung (PM₁₀ und PM_{2,5}) geeignet?
- Wie wirken sich die verkehrslenkenden Maßnahmen mit der Verlagerung von Verkehrsströmen auf die Immissionssituation an anderen lufthygienisch hoch belasteten Straßen aus?
- Unter welchen Voraussetzungen lässt sich die Methode auf andere Städte übertragen?

Mit der Beantwortung der Fragestellungen soll eine bessere Entscheidungsgrundlage bezüglich der Maßnahmenauswahl für den Luftreinhalteplan Hagen-Innenstadt abgeleitet werden.

1.3 Planung und Vorgehen

Der Kern des Projektes bestand in der Entwicklung und Erprobung des Steuerungsalgorithmus für die immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung. Daher wurden folgende methodische Schritte vorgesehen:

- Ermittlung der relevanten Steuerungsparameter und –bedingungen anhand von Messdaten für Schadstoffe, Verkehrsaufkommen und Meteorologie
- Erstellung einer ersten Version des Steuerungsalgorithmus
- Simulation der Wirkung der Steuerung anhand von Zeitreihen gemessener Verkehrs- und Schadstoffdaten
- Ggf. Anpassung und Optimierung des Algorithmus
- Praxiserprobung der Steuerung
- Auswertung der Praxiserfahrungen, ggf. Modifikation der Steuerung und erneute Umsetzung in die Praxis
- Gesamtauswertung und Berichtserstellung

Sowohl in der Entwicklungs- als auch in der Erprobungsphase wurden umfassende zeitaufgelöste Messungen der relevanten Schadstoffkonzentrationen (NO_x , NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$), des Verkehrsaufkommens (PKW, LKW) sowie der wesentlichen meteorologischen Größen (Windrichtung und –geschwindigkeit, vertikale Temperaturschichtung, Globalstrahlung) benötigt. Daher wurde ein entsprechendes Messprogramm konzipiert, das ein gesamtes Kalenderjahr abdeckte. Dies trug der hohen saisonalen Variabilität der atmosphärischen Durchmischung und den unterschiedlichen Umwandlungsraten von NO in NO_2 Rechnung.

Neben der Messung der Schadstoffe und meteorologischen Situation direkt in der Straßenschlucht des Märkischen Rings waren zusätzlich Schadstoffmessungen im städtischen Hintergrund notwendig, um den durch

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

den lokalen Verkehr bedingten Anteil der Schadstoffkonzentrationen ermitteln zu können. Im Hinblick auf mögliche Effekte durch Verkehrsverlagerungen während der Sperrzeiten wurden weiterhin Messdaten vom Graf-von-Galen-Ring und (im Auftrag der Stadt Hagen) ergänzend auch vom Bergischen Ring erhoben. Durch Kurzzeiterhebungen des Verkehrsaufkommens auf möglichen Ausweichstrecken während der LKW-Sperrungen am Märkischen Ring wurden Daten zur Ermittlung der lufthygienischen Auswirkungen von Verkehrsverlagerungen gewonnen.

Der Projektablauf wurde als Abfolge mehrerer Perioden konzipiert, in denen sich Phasen ohne Verkehrsbeeinflussung („Nullphasen“) mit Phasen, in denen ein Steuerungsmodell zur Anwendung kam, abwechselten. Auf der Grundlage der Messergebnisse aus den Nullphasen wurden die Steuerungsparameter und -bedingungen abgeleitet und der mögliche Effekt des entwickelten Algorithmus unter Anwendung von standardisierten Emissions-Berechnungsverfahren simulativ ermittelt. Die Steuerungsphasen dienten jeweils der Prüfung und ggf. weiteren Optimierung des Steuerungsverfahrens in der Praxis.

2 Messdatenerhebung

Zur Entwicklung und Validierung der dynamischen Lenkung des Schwerlastverkehrs am Märkischen Ring wurde ein umfangreiches Messprogramm (Luftschadstoffimmissionen, Meteorologie, Verkehr) durchgeführt. Die ermittelten Messdaten wurden zur Entwicklung und Validierung des Steuerungsprogrammes benötigt. Die Verkehrs- und Meteorologiedaten wurden von Beginn des Projektes an kontinuierlich auf einen Rechner der Hagener Stadtverwaltung übertragen, auf dem im weiteren Projektverlauf auch das Steuerungsprogramm installiert wurde.

Die Messungen erfolgten über ein Jahr vom 01.09.2006 bis 31.08.2007. Während dieses Zeitraumes können aufgrund der durchgeführten statischen bzw. dynamischen Verkehrslenkungsmaßnahmen folgende Phasen unterschieden werden:

Messzeiträume

Die Messungen erfolgten über ein Jahr vom 01.09.2006 bis 31.08.2007. Während dieses Zeitraumes ergab sich aufgrund der durchgeführten statischen bzw. dynamischen Verkehrslenkungsmaßnahmen eine zeitliche Gliederung in 7 Phasen (siehe Abbildung 2.1).

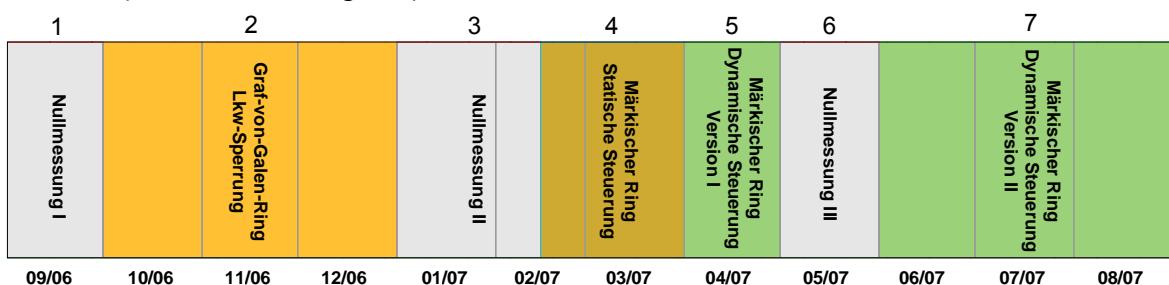


Abbildung 2.1: Zeitliche Gliederung des Untersuchungszeitraumes

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Phase 1: Nullmessung 1: 01.09.-30.09.2006

Im September 2006 erfolgten keine Verkehrssperrungen oder Verkehrslenkungen im Bereich der Hagener Innenstadt. Am Märkischen Ring herrschten daher normale Verhältnisse.

Phase 2: Lkw-Sperrung Graf-von-Galen-Ring 01.10.-31.12.2006

Für den Graf-von-Galen-Ring trat aufgrund einer mehr als 35-maligen Überschreitung des Grenzwertes für den PM₁₀-Tagesmittelwert die Umsetzung eines Aktionsplanes in Kraft, bei dem der Graf-von-Galen-Ring für den Schwerlastverkehr gesperrt wurde. Der öffentliche Nahverkehr war von der Sperrung ausgenommen. Aufgrund der Lkw-Sperrung am Graf-von-Galen-Ring ergaben sich Verlagerungen des Schwerlastverkehrs auf den Bergischen und den Märkischen Ring. Die entsprechenden Verkehrsverlagerungen im Bereich der Hagener Innenstadt sind dem Gutachten [AVISO 2007] zu entnehmen.

Phase 3: Nullmessung 2: 01.01.-14.02.2007

Am Jahresende 2006 wurde der Aktionsplan für den Graf-von-Galen-Ring in Abstimmung mit der Bezirksregierung Arnsberg außer Kraft gesetzt. Bis Mitte Februar schloss sich die zweite Nullphase mit unbeeinflussten „normalen“ Verkehrsverhältnissen an.

Phase 4: Statische Sperrung Märkischer Ring 15.02.-31.03.2007

Nach der zweiten Nullmessperiode schloss sich eine Phase mit einer „statischen“ Sperrung an. Hierbei wurde der Märkische Ring an Werktagen (montags bis freitags) unabhängig von den lufthygienischen Verhältnissen immer zwischen 06:00 Uhr und 10:00 Uhr gesperrt. Diese Phase diente insbesondere zur ersten Erprobung der dynamischen Beschilderung und zu Vergleichszwecken zur dynamischen Verkehrslenkung.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Phase 5: Dynamische Sperrung Märkischer Ring 01.04.-30.04.2007

Die erste Version des Programms *simDRIVE* zur dynamischen immissions-abhängigen Verkehrssteuerung wurde auf einem Rechner der Stadt Hagen installiert. Im April wurde die Steuerung der Verkehrsbeschilderung zur Regelung des Durchfahrtverbotes für Lkw-Verkehre am Märkischen Ring von *simDRIVE* übernommen.

Phase 6: Nullmessung 3 01.05.-31.05.2007

Die dritte Nullphase diente zur Überprüfung und Verbesserung des Steuerungsprogrammes *simDRIVE*.

Phase 7: Dynamische Sperrung Märkischer Ring 01.06.-31.08.2007

Die verbesserte zweite Version von *simDRIVE* wurde installiert und in Betrieb genommen. Mit dieser Version erfolgte von Ende Juni bis zum Ende der Immissionsmessungen Ende August 2007 die dynamische Steuerung der Schilder zur Regelung der Lkw-Durchfahrt im Bereich des Märkischen Rings.

2.1 Meteorologische Daten

Die Geländetopographie und die innerstädtische Bebauung modifizieren und überprägen die übergeordneten meteorologischen Verhältnisse (Windrichtung, Windgeschwindigkeit und thermische Stabilität).

Im Bereich der Hagener Innenstadt herrschen aufgrund der Tallage und der verdichteten Bebauungsstrukturen insgesamt ungünstige Austauschbedingungen (siehe Abbildung 2.2). Besonders in engen, stark vom Straßenverkehr frequentierten Straßenschluchten - wie dem kritischen Abschnitt des Märkischen Rings - können sich die hier emittierten Schadstoffe stark anreichern (siehe Abbildung 2.3).



Abbildung 2.2: **Blick auf die Hagener Innenstadt Richtung Südost**
Quelle: Ingo Kramer



Abbildung 2.3: Bebauungssituation im kritischen Bereich des Märkischen Rings

Für die Untersuchungen wurden Messdaten (Halbstundenmittelwerte) von drei meteorologischen Stationen verwendet. Die folgende Tabelle enthält eine Aufstellung der Messgrößen, die an den einzelnen Stationen erfasst wurden.

Tabelle 2.1: Messgrößen der Meteorologiestationen

Standort	WR	WS	RF	TT	P0	TKE	RR	SD	SR
Märkischer Ring	X	X	—	X	—	X	—	—	—
Finanzamt	X	X	X	X	X	—	—	—	—
Sternwarte	X	X	X	X	X	—	X	X	X

WR – Windrichtung in Grad, WS – Windgeschwindigkeit in m/s, RF – relative Luftfeuchte in %,
TT – Lufttemperatur in °C, P0 – Luftdruck in mbar, TKE – turbulente kinetische Energie in m²/s²,
RR – Niederschlagsmenge in mm, SD – Sonnenscheindauer in Minuten, SR – Globalstrahlung

Die Lage der meteorologischen Messstationen kann der Abbildung 2.4 entnommen werden.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

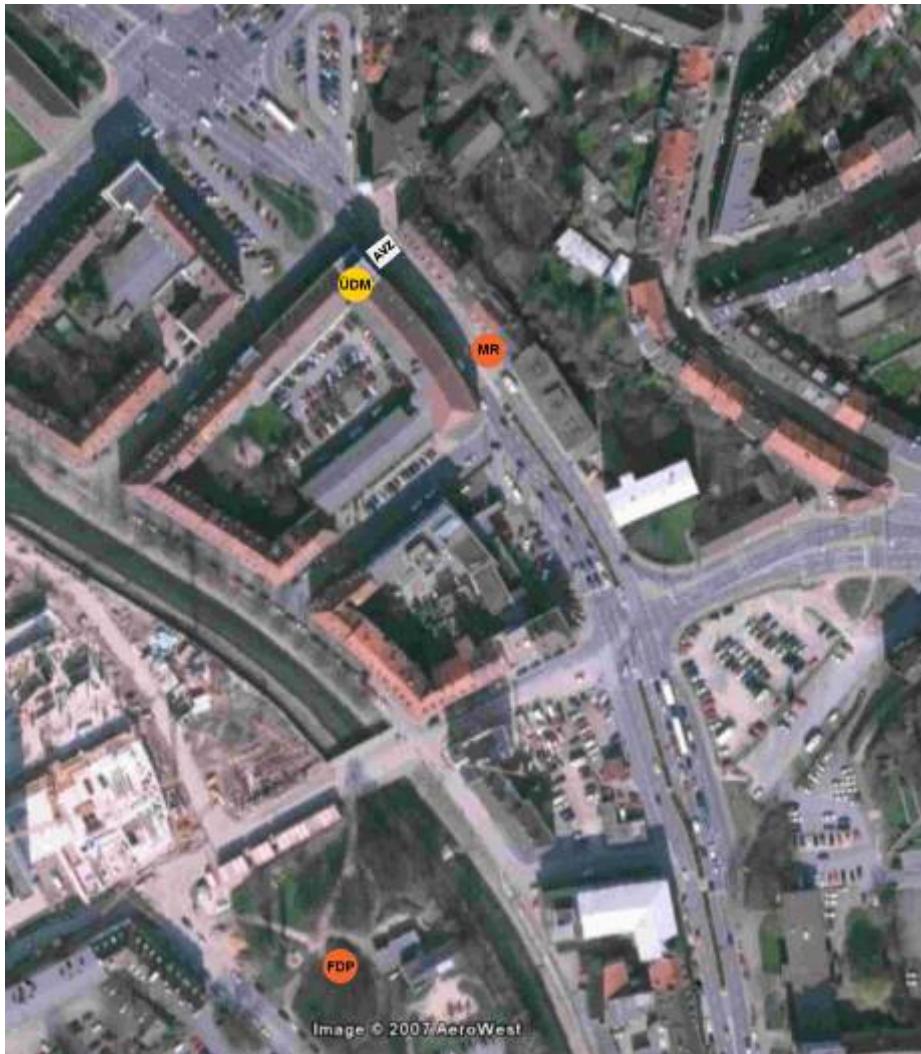


Abbildung 2.4: Lage der meteorologischen Stationen

FDP - Immissionsmessstelle im Ferdinand-David-Park zur Erfassung des städtischen Hintergrunds

MR - Immissionsmessstelle und Windmessung in der Straßenschlucht Märkischer Ring

ÜDM - Meteorologiestation auf dem Dach des Finanzamtes am Märkischen Ring

AVZ – Automatische Verkehrszählstation

Die Messstation MR befindet sich am Immissions-Messcontainer Märkischer Ring und erfasst hier mit Hilfe eines Ultraschall-Anemometers die durch die straßenschluchtartige Bebauung und die Fahrzeugbewegungen modifizierten Wind- und Turbulenzverhältnisse.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Die Station ÜDM befindet sich auf dem Dach des Finanzamtes und repräsentiert somit die Überdachwindverhältnisse im östlichen Bereich der Hagener Innenstadt (siehe Abbildung 2.4).

Die Station SW befindet sich ca. 2,2 km südwestlich vom Finanzamt an der Sternwarte (Eugen-Richter-Turm) auf einer Bergkuppe in einer Höhe von ca. 285 m über NN. Sie erfasst aufgrund ihrer exponierten Lage die übergeordneten Windverhältnisse von Hagen. Die Höhendifferenz zur Hagener Innenstadt beträgt ca. 170 m. Mit Hilfe eines Temperaturvergleiches mit der Überdachstation am Finanzamt kann das Auftreten und die zeitliche Andauer von Inversionen bestimmt werden.

2.2 Verkehr

Neben den meteorologischen Daten wurden für die Entwicklung und Prüfung des Algorithmus zur dynamischen Verkehrssteuerung Verkehrsdaten benötigt. Hierzu wurden Daten einer automatischen Verkehrszählstelle (AVZ) herangezogen, die im kritischen Bereich des Märkischen Rings von der Stadt Hagen kontinuierlich betrieben wird (siehe Abbildung 2.4, Kapitel 2.1).

Bei den Verkehrszählungen wurden die Fahrzeugbewegungen kontinuierlich in einer zeitlichen Auflösung von einer Minute fahrspurfein erfasst. Hierbei wird zwischen Pkw, Lkw und Lastzügen unterschieden. Neben den Verkehrsmengen wurden auch die Fahrzeuggeschwindigkeiten aufgezeichnet. Die Verkehrsdaten wurden zu Halbstundenmittelwerten aggregiert und als Zeitreihe in einer Datenbank abgespeichert.

Neben den automatischen Verkehrszählungen erfolgten ergänzende manuelle Zählungen [AVISO 2007], um Verlagerungseffekte des Schwerlastverkehrs durch Sperrungen zu dokumentieren.

2.3 Luftschadstoffmessungen

2.3.1 Messorte

Die Erhebung der Messdaten erfolgte an 3 verkehrsbezogenen Messorten:

Bergischer Ring (BR),

Märkischer Ring (MR)

und Graf-von-Galen-Ring (GvG),

sowie einer im städtischen Hintergrund gelegenen Station im Ferdinand-David-Park (FDP). Die Aufstellungsorte sind in der Abbildung 2.5 eingezeichnet; Fotografien der Messcontainer und ihrer unmittelbaren Umgebung zeigt Abbildung 2.6.



Abbildung 2.5: Aufstellungsorte der Messcontainer

Die messtechnische Ausstattung der Stationen und die gemessenen Parameter sind der Tabelle 2.2 zu entnehmen. Für die Station GvG wurden weiterhin Messdaten für PM₁₀ und Stickstoffoxide verwendet, die mit dem dort befindlichen LUQS-Messcontainer des LANUV erfasst werden. An dieser Station wurde zusätzlich zum kontinuierlichen Messgerät für PM_{2,5} auch ein diskontinuierlich arbeitender Filtriersammler (Referenzverfahren gem. 22. BImSchV) eingesetzt, um den auf die kontinuierlich erhobenen PM_{2,5}-Daten anzuwendenden Korrekturfaktor zu ermitteln. Dieser ergab sich zu 1,65 (Referenz zu TEOM)

Für die PM₁₀-Messungen wurde analog der vom LANUV für die im städtischen Bereich eingesetzten TEOM-Messgeräte verwendete Korrekturfaktor verwendet, der auf Basis der Messdaten von 2006 ermittelt worden war. Dieser betrug 1,24 (Referenz zu TEOM, LANUV 2007).

2.3.2 Qualitätssicherung und Datenaufbereitung

2.3.2.1 Technische Qualitätssicherungs-Maßnahmen

Mit Hilfe des Funk-Modems wurde der Betrieb der Messgeräte täglich per Fernabfrage überwacht. Alle Messgeräte wurden regelmäßig in ca. 2-wöchigem Abstand gemäß Herstellerangaben gewartet (Filterwechsel, Reinigung der Probeneinlässe, Kontrolle auf Leckagen, Volumenstrommessungen). Der Zeitpunkt der Wartung orientierte sich dabei zumeist an der Filterbeladung der TEOM-Systeme (Wechsel bei ca. 60% Beladung, je nach Belastung nach jeweils 10 bis 20 Tagen). Im Rahmen der Wartungen wurden die Funktion der Stickoxid-Monitore mittels Aktivkohlefilter (Nullpunkt) bzw. Aufgeben von

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

NO Prüfgas mit bekannter, durch den Hersteller zertifizierter Konzentration¹
(Span) überprüft.

Tabelle 2.2: Messparameter und -geräte der IUTA-Messcontainer

Station	Messparameter und –geräte
BR	Partikel: - Rupprecht & Patashnik, TEOM 1400 A, PM10, kontinuierlich Gase: - MLU, 200 A, NO / NO ₂ / NOx, kontinuierlich Meteorologie: - Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, kontinuierlich
MR	Partikel: - Rupprecht & Patashnik, TEOM 1400 A, PM2,5, kontinuierlich - Rupprecht & Patashnik, TEOM 1400 A, PM10, kontinuierlich - Gase: - MLU, 200 A, NO / NO ₂ / NOx, kontinuierlich Meteorologie: - Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, kontinuierlich
GVG	Partikel: - Rupprecht & Patashnik, TEOM 1400 A, PM2,5, kontinuierlich - Derenda, Kleinfiltergerät LVS3.1 mit Filterwechsler PNS15, PM2,5, diskontinuierlich (alle 2 Tage) Meteorologie: Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, Luftfeuchtigkeit, kontinuierlich
FDP	Partikel: - Rupprecht & Patashnik, TEOM 1400 A, PM2,5, kontinuierlich - Rupprecht & Patashnik, TEOM 1400 A, PM10, kontinuierlich Gase: - Ansyco, AC 31 M, NO / NO ₂ / NOx, kontinuierlich Meteorologie: - Umgebungstemperatur, Umgebungsdruck, kontinuierlich

¹ a) Konzentration: 0,678 ppm +- 5%; Hersteller: Air Liquide, Prüfgas-Zertifikat: 9117113001, Herstellung: 07.06.2006, verwendet bis 17.November 2006

b) Konzentration: 0,664 ppm +- 5%; Hersteller: Air Liquide, Prüfgas-Zertifikat: 9131310001, Herstellung: 2.11.2006, verwendet ab 17.November 2006

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

BR



MR



GVG



FDP



Abbildung 2.6: Fotografien der Messcontainer und ihrer unmittelbaren Umgebung

2.3.2.2 Datenprüfung und -aggregierung

Die Messdaten aller kontinuierlich betriebenen Geräte wurden als Kurzzeitwerte ausgelesen und anschließend mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel weiterbearbeitet. Messwerte, die z.B. aufgrund einer unmittelbar vorangegangenen Gerätewartung als nicht vertrauenswürdig anzusehen sind, wurden entfernt.

Zur weiteren laufenden Plausibilitätsprüfung wurden positive und negative Extremwerte betrachtet und ggf. nach weiteren Prüfungen (z.B. der zeitlichen Korrelation der am gleichen Standort erhobenen Messdaten) eliminiert.

Negative Messwerte, die bei den Stickoxid-Monitoren aufgrund der normalen Messwertschwankungen bei Konzentrationen im Bereich der instrumentellen Nachweisgrenzen bzw. bei den kontinuierlichen Partikelmessgeräten durch den Einfluss von Wasserdampf auf das Messsignal hervorgerufen werden, wurden vorläufig im Datensatz belassen.

Nach Mittelung der Messwerte (5-Minuten-, Halbstunden und Tagesmittel) erfolgte ein Vergleich mit den am GvG-Ring vom LANUV gemessenen und täglich im Internet als Halbstundenmittel (Stickoxide) bzw. 24h-Mittel (PM_{10}) bereitgestellten Messdaten. Bei auffälligen Abweichungen wurden erneut die Rohdaten einer Prüfung unterzogen und ggf. korrigiert.

Nach Abschluss des Messprogramms wurden alle 0,5h-Daten erneut gesichtet und auf Plausibilität geprüft. Dabei wurden insbesondere für PM_{10} und $PM_{2,5}$ einige Konzentrationsspitzen, die sich nicht mit gleichartigen Trends anderer Komponenten korrelieren ließen, aus der Datenmatrix entfernt. Weiterhin wurden insgesamt 4 vollständige Tage herausgenommen, deren auffällig hohe PM-Werte nachweisbar nicht verkehrsbedingt waren und daher im Hinblick auf die Fragestellung des Projektes möglicherweise zu Fehlbeurteilungen führen könnten. Dazu gehörte das Wochenende vom 24./25. März 2007, bei dem in der Nacht von Samstag auf Sonntag deutschlandweit ein grenzüberschreitender Eintrag von Wüstensand verzeichnet wurde. Weiterhin wurde das

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Oster-Wochenende wegen der merkbaren Erhöhung der Partikelkonzentrationen durch Osterfeuer eliminiert².

Auf die abschließend geprüften Halbstunden-Mittelwerte wurden im Falle vom PM₁₀ und PM_{2,5} die Korrekturfaktoren bezogen auf das Referenzverfahren angewendet. Für alle Komponenten wurden schließlich die Tagesmittel gebildet, wobei für einen validen Tagesmittelwert mindestens 36 Halbstundenwerte vorliegen mussten.

² Für die Berechnung der Jahresmittelwerte und der Überschreitungshäufigkeiten der Kurzzeitgrenzwerte wurden diese Tage allerdings berücksichtigt (vgl. Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4)

3 Messergebnisse

3.1 Meteorologie

3.1.1 Thermische Stabilität / Inversionen

Ein wesentlicher Faktor, der die Ausbreitung von Luftschaadstoffen in der bodennahen Atmosphäre beeinflusst, ist deren thermische Schichtung. Es wird zwischen einer stabilen, einer labilen und einer indifferenten (neutralen) Schichtung der Atmosphäre unterschieden.

Eine besondere stabile Schichtung bezeichnet man als Inversion, bei der die Temperatur in höheren Schichten höher ist als in niedrigeren Schichten. Da die bodennahe kalte Luft schwerer ist als die warme Luft, findet zwischen diesen unterschiedlich temperierten Luftmassen kein Austausch statt. Eine Temperaturinversion wirkt also als Sperrsicht, die den vertikalen Luftmassenaustausch verhindert. In der unten abgeschlossenen Kaltluft sammeln sich Feuchtigkeit, Staub und gasförmige Luftschaadstoffe an.

Inversionen sind daher meistens an grauem Dunst oder Nebel erkennbar, der sich unter blauem Himmel befindet. Oberhalb von Inversionen herrscht häufig eine sehr gute Fernsicht.

Man unterscheidet verschiedene Inversionen:

Bodeninversion: Wenn der Boden schnell abkühlt (durch starke Wärmeausstrahlung der Erdoberfläche), entsteht eine bodennahe Inversion. Diese kommt häufig bei klarem Himmel in windschwachen Winternächten vor und führt häufig zur Ausbildung von Bodennebel.

Absinkinversion: Bei hohem Luftdruck sinkt die Luft ab und erwärmt sich dabei. Sie lagert sich über die kältere Luft am Boden und ist im Winter an hochnebelartiger Bewölkung zu erkennen. Die Inversionsuntergrenze liegt in Höhen von ca. 300 m bis 2.000 m.

Abgleitinversion: Wenn Luft beim Überströmen von Gebirgen auf deren Rückseite abgleitet, bildet sich eine Inversion in meist höheren Schichten. Diese Inversion gibt es beispielsweise bei Föhn, wenn die Luft vom Gebirge abgleitet. Dabei bilden sich die Altocumulus lenticularis-Wolken ("Föhnfische", Föhnwolken).

Die Verdünnung bodennah freigesetzter Luftschaadstoffe ist besonders schlecht bei Bodenversionen. Großräumig hohe Feinstaubimmissionen aufgrund von Ferntransporten sind aber auch bei lang andauernden Hochdruckwetterlagen im Winter zu beobachten. Hierbei bilden sich häufig Absinkversionen, die für alle Quellen, die sich unterhalb der Inversionsuntergrenze befinden, als Sperrsicht wirken. Bei diesen Wetterlagen kommt es unterhalb der Inversion zu einer über mehrere Tage ablaufenden Akkumulation von Luftschaadstoffen. Des Weiteren kann es bei diesen Wetterlagen aufgrund von Ferntransporten auch in ländlichen Gebieten zu hohen Feinstaubimmissionen kommen.

Mit Hilfe der Temperaturdifferenz zwischen dem Eugen-Richter-Turm und der Überdachmessstelle am Finanzamt lässt sich für die Hagener Innenstadt das zeitliche Auftreten von Bodenversionen und deren Andauer bestimmen.

Insgesamt waren an ca. 20% der Tage des Untersuchungszeitraumes Versionen zu beobachten. Diese relativ hohe Häufigkeit von Bodenversionen ist insbesondere auf die Talkessellage Hagens zurück zu führen. Die Inversionsobergrenze entspricht in der Regel der mittleren Höhe der an das Volme- und das Ennepetal angrenzenden Berge. Untersuchungen zu den thermischen Schichtungsverhältnissen (Sodar, Fesselballonaufstiege) im Bereich der Hagener Innenstadt, die im Rahmen der „Klimaanalyse Hagen“ [STADT HAGEN 1997] durchgeführt wurden, bestätigen diese Ergebnisse.

Im Bereich stark befahrener und dicht bebauter Straßen kommt es durch die Bebauung und die Fahrzeugbewegungen zu einer stärkeren vertikalen Luftvermischung, die eine Ausbildung von Versionen behindert. In Straßen schluchten wird die Ausbreitung von hier durch den Verkehr freigesetzten Schadstoffen daher nur unwesentlich durch Versionen beeinflusst.

Die Abbildung 3.1 stellt auf der Basis halbstündlicher Temperaturdaten dar, wie häufig Inversionen im Tagesverlauf auftraten. Hierbei wird zwischen starken und leichten Inversionen unterschieden. Erwartungsgemäß wurden Temperaturinversionen am häufigsten nachts beobachtet. Dies gilt insbesondere für starke Inversionen. Tagsüber sind Inversionen im Auswertezeitraum nur sehr selten zu beobachten.

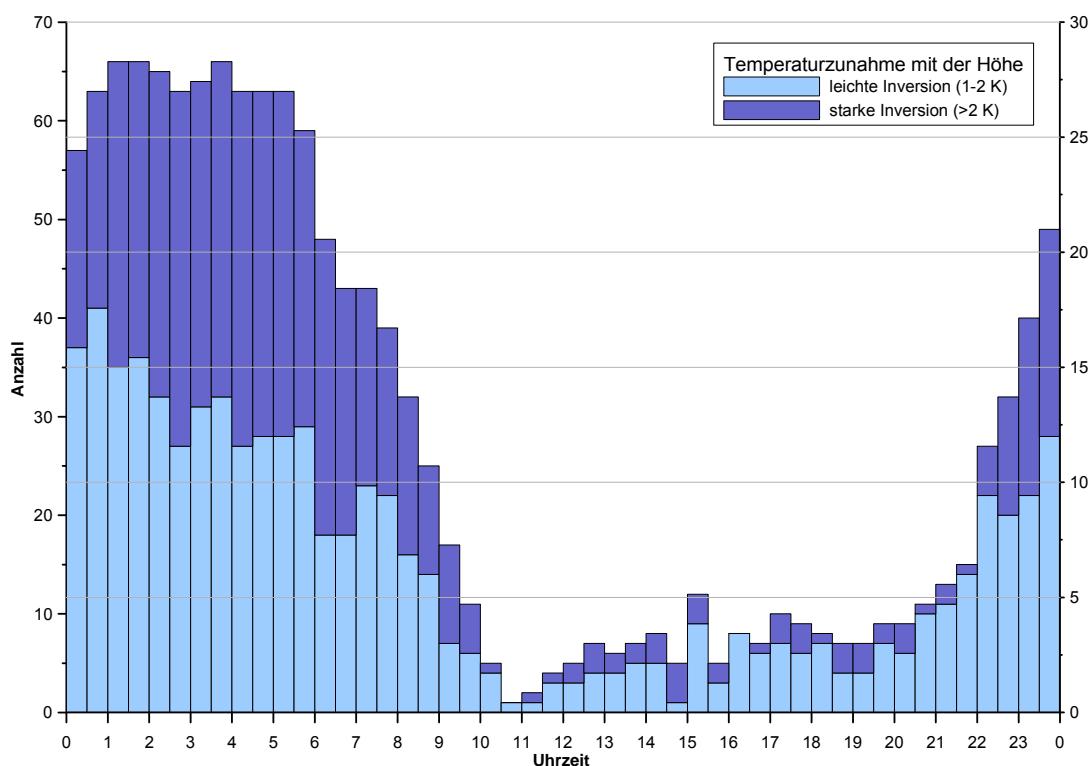


Abbildung 3.1: Häufigkeit des Auftretens von Inversionen im Tagesverlauf

3.1.2 Wind

Grafische Auswertungen zur Windgeschwindigkeit und zur Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen verdeutlichen den starken Einfluss der Faktoren Topographie, Bebauungsdichte (Rauhigkeit) und Straßengeometrie auf die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung.

Die Abbildung 3.2 stellt für die drei Windmess-Stationen die Häufigkeit des Auftretens bestimmter Windrichtungen für unterschiedliche Windstärkeklassen dar.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

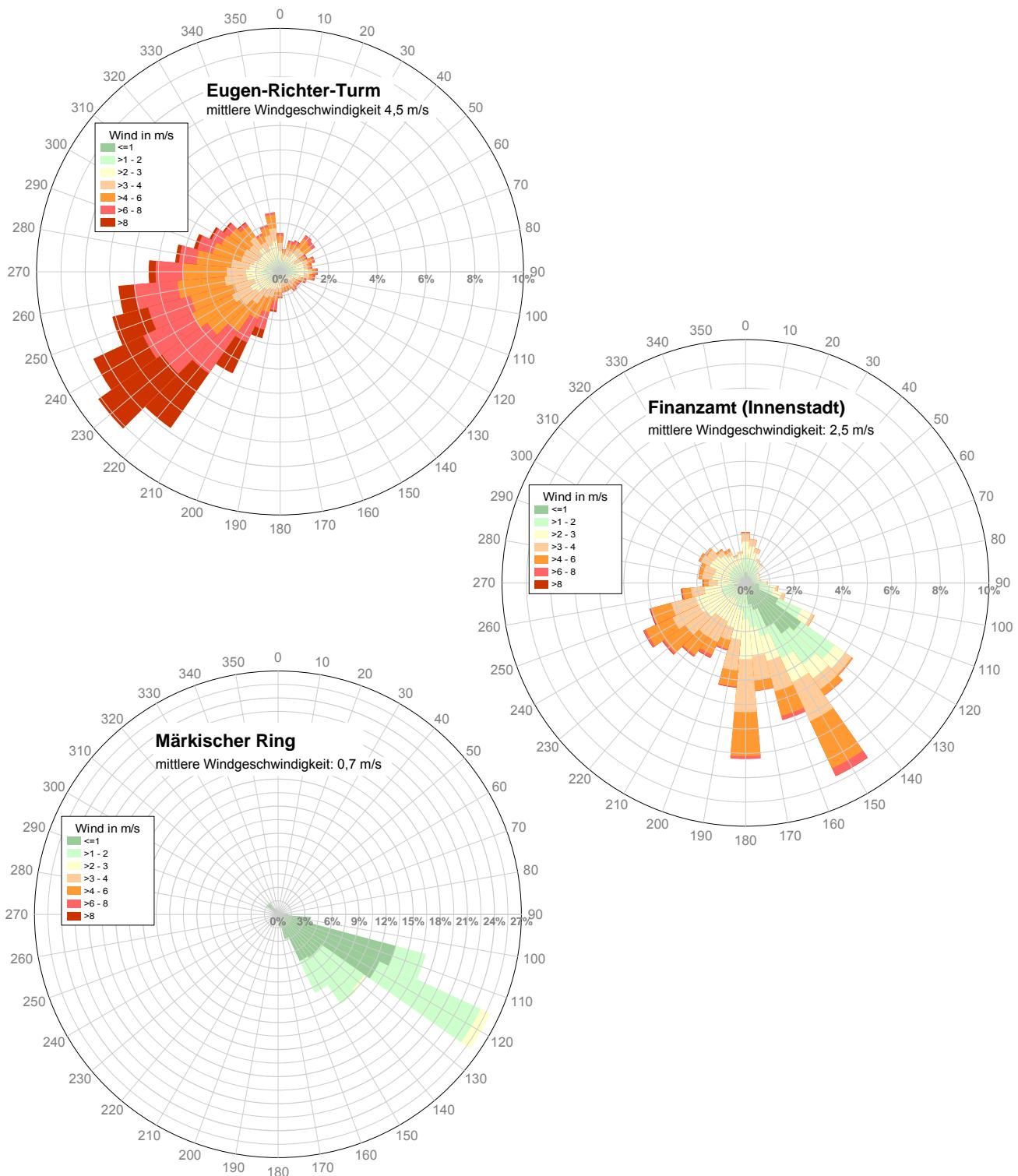


Abbildung 3.2: Windrichtungsverteilungen

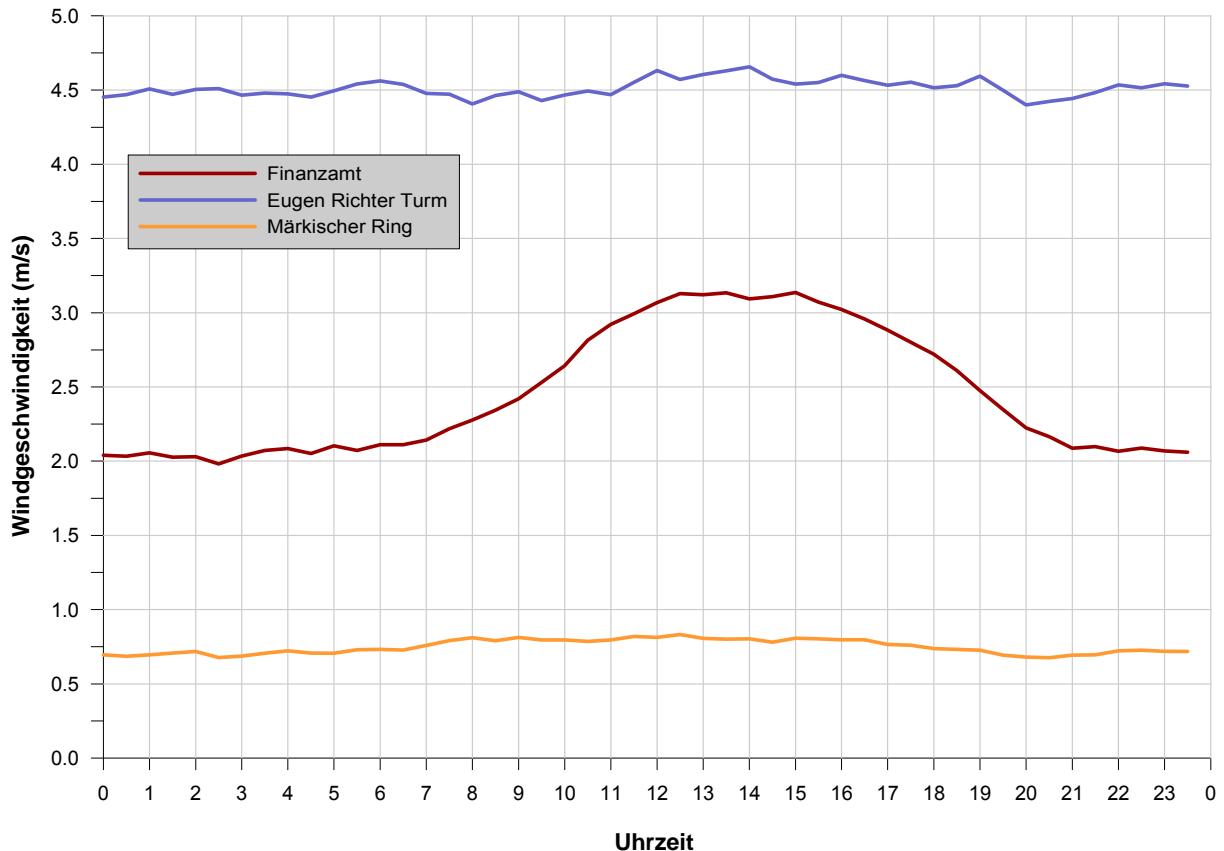


Abbildung 3.3: Mittlerer Tagesgang der Windgeschwindigkeiten

Die Abbildung 3.3 veranschaulicht den mittleren Tagesgang der Windgeschwindigkeit an den drei meteorologischen Stationen in Hagen.

Aus den Grafiken lassen sich folgende Aussagen ableiten:

Im Untersuchungszeitraum wehte der übergeordnete Wind vorwiegend aus südwestlichen Richtungen (siehe Abbildung 3.2, oben). Aufgrund der exponierten Kuppenlage der Messstation Eugen–Richter Turm traten hier häufig hohe Windgeschwindigkeiten auf.

Im Überdachniveau des Finanzamtes herrschten hingegen aufgrund der Leitwirkung des Volmetales bevorzugt Süd-Südost-Winde (siehe Abbildung 3.2, Mitte). Niedrige Windgeschwindigkeiten sind hier gegenüber der Messstation am Eugen-Richter-Turm erheblich häufiger zu beobachten. Schwache Winde sind besonders oft mit einer südöstlichen Windrichtung verbunden.

In der Straßenschlucht ergibt sich aufgrund der Kanalisierung im Straßenraum und der Windsogeffekte durch die vorbeifahrenden Kfz eine extreme Häufung südöstlicher Windrichtungen. Bei deutlich erhöhter Turbulenz ist die mittlere Windgeschwindigkeit gegenüber der Überdachwindstation noch einmal um mehr als 70 % gemindert (siehe Abbildung 3.2, unten und Abbildung 3.3).

Die Stationen am Eugen-Richter-Turm und am Märkischen Ring lassen keinen signifikanten tageszeitlichen Wechsel der Windgeschwindigkeit erkennen.

Die Überdachstation auf dem Finanzamt hingegen weist einen deutlichen Tagesgang auf mit höheren Windgeschwindigkeiten am Tage und niedrigeren Geschwindigkeiten in der Nacht. Dieses Phänomen ist insbesondere bei der Ausbildung von Inversionen im Hagener Talkessel zu beobachten, bei denen aufgrund des mangelnden vertikalen Impulsaustausches die bodennahe Reibungsschicht von den darüber liegenden Schichten der Grenzschicht abkoppelt.

In der Innenstadt von Hagen herrschen somit aufgrund der Tallage insgesamt ungünstige Austauschbedingungen. Besonders betroffen sind Straßenzüge mit beidseitig geschlossener Randbebauung. Der Märkische Ring weist aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens und der engen Straßenschluchtgeometrie lufthygienisch extrem ungünstige Randbedingungen auf.

3.2 Verkehr

In der Tabelle 3.1 sind die mittleren täglichen Verkehrsbelastungen, die sich aus den Auswertungen der Automatischen Verkehrszählstelle (AVZ) der Stadt Hagen ergeben, für Werkstage, Samstage, Sonn- und Feiertage sowie der sich hieraus ergebende Mittelwert über alle Tage des Untersuchungszeitraumes aufgeführt.

Tabelle 3.1: Tägliches Verkehrsaufkommen auf dem Märkischen Ring

	Mittlere tägliche Verkehrsmengen			SNfz* [%]
	Kfz	Pkw	SNfz*	
Werkstage (Montag bis Freitag)	43.432	41.480	1.952	4,5
Samstage	36.712	35.819	893	2,4
Sonn- und Feiertage	25.885	25.521	374	1,4
Mittelwert über alle Tage	39.445	37.916	1.529	4,2

* SNfz (schwere Nutzfahrzeuge) = Lkw>3,5t, Last- und Sattelzüge (LzSz), Busse

Die Abbildung 3.4 stellt für den Straßenquerschnitt des Märkischen Rings die mittleren Tagesgänge der halbstündlichen Verkehrszahlen von Pkw (oben) und SNfz (unten) für Werkstage, Samstage und Sonn- bzw. Feiertage dar.

An Werktagen treten erwartungsgemäß für Pkw und SNfz die höchsten mittleren und maximalen Verkehrsbelastungen auf.

An Samstagen und vor allem an Sonn- und Feiertagen sind Gesamtverkehrsaufkommen und Schwerlastverkehre gegenüber Werktagen deutlich reduziert.

An Werktagen (Mo – Fr) treten im Mittel für Pkw die höchsten Belastungen am Nachmittag, für SNfz hingegen am Vormittag auf.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

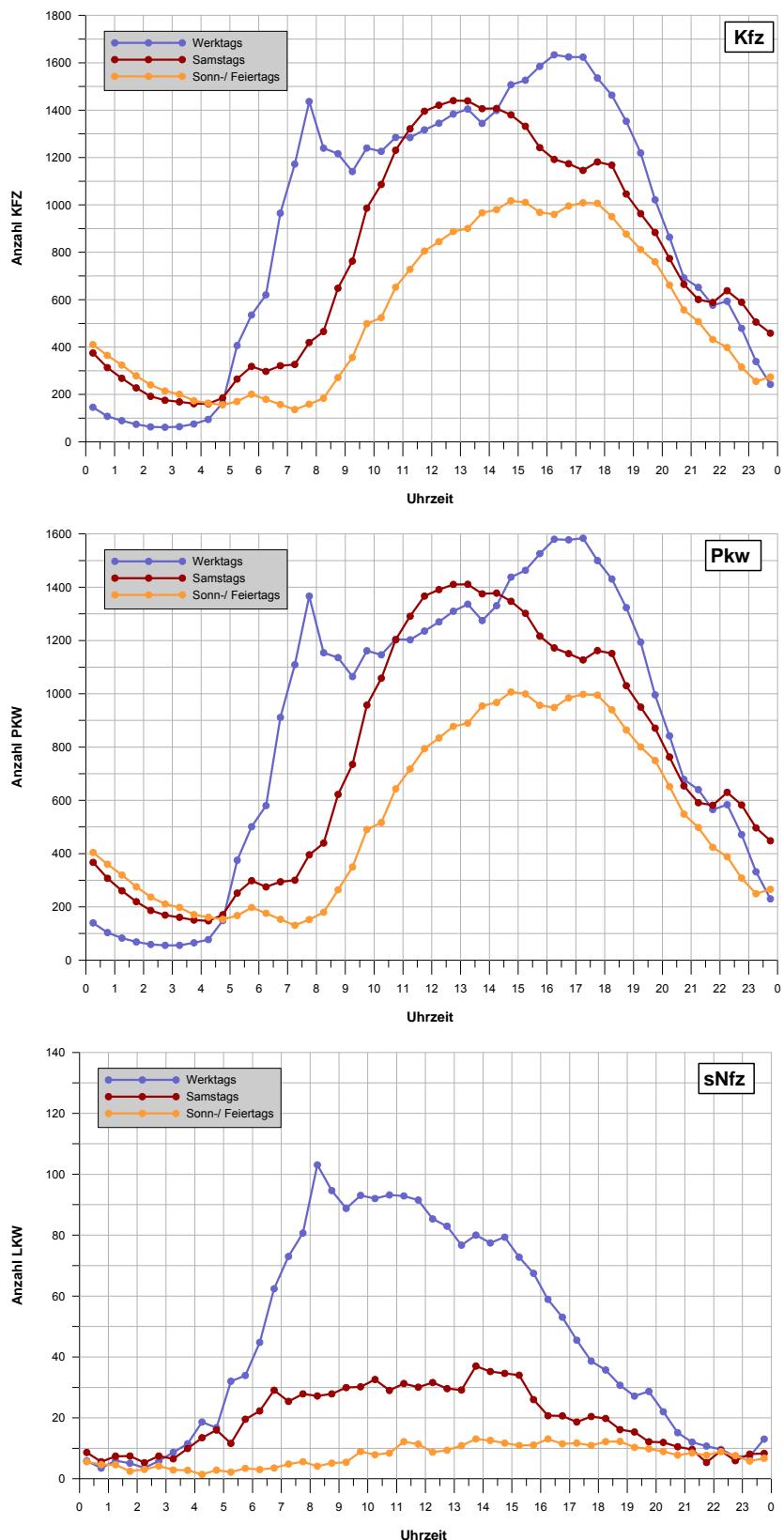


Abbildung 3.4: Mittlere Verkehrstagesgänge (Halbstundenmittelwerte) am
Märkischen Ring

3.3 Luftschadstoff-Konzentrationen (Gesamtzeitraum)

3.3.1 Bewertungsmaßstab

Durch die EU-Luftqualitätsrahmenrichtlinie [EU 1996] und die zugehörige Tochterrichtlinie [EU 1999] wurden europaweit gültige **Grenzwerte** für Immissionen durch Luftschadstoffe festgeschrieben, die auch kleinräumig einzuhalten sind. Durch eine Novellierung der 22. BImSchV [22. BImSchV 2002] wurden diese Grenzwerte in Nationales Recht überführt und sind seither als Bewertungsmaßstab heranzuziehen (siehe Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Grenzwerte der verkehrsrelevanten Schadstoffe zum Schutz der menschlichen Gesundheit nach der 22. BImSchV

PM ₁₀ [µg/m ³] Jahresmittel	PM ₁₀ [µg/m ³] Tagesmittel	NO ₂ [µg/m ³] Jahresmittel	NO ₂ [µg/m ³] Max. 1h-Wert
40	50*	40	200**

* Maximal 35 Überschreitungen im Kalenderjahr zulässig. Dies entspricht in etwa dem 90,4-Percentil der Tagesmittelwerte.

** Maximal 18 Überschreitungen im Kalenderjahr zulässig. Dies entspricht in etwa dem 99,8-Percentil der Stundenmittelwerte.

- Die Grenzwerte für NO₂ sind bis zum Jahr 2010, die Grenzwerte für PM₁₀ sind seit 2005 einzuhalten.
- Für den Jahresmittelwert der NO₂-Immissionen beträgt die Toleranzmarge gegenwärtig 6 µg/m³. Sie reduziert sich bis zum 1. Januar 2010 stufenweise um jährlich 2 µg/m³.
- Für den maximalen 1h-Wert der NO₂-Immissionen beträgt die Toleranzmarge zur Zeit 30 µg/m³. Sie reduziert sich bis zum 1. Januar 2010 stufenweise um jährlich 10 µg/m³.

Allgemein ist zu beachten, dass die oben genannten Grenzwerte nur für Bereiche gelten, in denen sich Menschen aufhalten. Aufgrund der unterschiedlichen gesundheitlichen Auswirkungen entfalten die oben genannten Grenzwerte erst dann ihre rechtliche Wirkung, wenn Menschen die Aufenthaltsdauer in dem Bereich mit Grenzwertüberschreitungen in etwa dem Mittelungszeitraum des betreffenden Grenzwertes entspricht.

Bei Überschreitungen bzw. der Gefahr des Überschreitens der Immissionsgrenzwerte ist im Einvernehmen mit den zuständigen Behörden

(Straßenverkehrsbehörde, Immissionsschutzbehörde, Regierungspräsident u. a.) ein Luftreinhalteplan und ggf. auch ein Aktionsplan aufzustellen. Luftreinhaltepläne legen die erforderlichen Maßnahmen zur dauerhaften Verminderung von Luftverunreinigungen fest. Aktionspläne hingegen definieren unmittelbar wirksame Maßnahmen zur kurzfristigen Senkung der Luftschadstoffimmissionen, um die Gefahr von Immissionsgrenzwertüberschreitungen zu verringern, oder den Zeitraum während dessen die Werte überschritten werden, zu verkürzen

Ein weiterer Grenzwert für die besonders gesundheitsgefährdenden Feinstäube mit einem Durchmesser von weniger als 2,5 µm ($PM_{2,5}$) ist derzeit auf EU-Ebene in der politischen Diskussion. Angedacht ist ein einzuhaltender Jahresmittelwert von 25 µg/m³ ab dem Jahr 2010.

3.3.2 Jahresmittelwerte der Luftschadstoff-Konzentrationen

Tabelle 3.3 zeigt die aus den Tagesmitteln gebildeten Jahresmittelwerte für die gemessenen Schadstoffe an den vier Messorten.

Hinzuweisen ist darauf, dass der Untersuchungszeitraum zwar ein gesamtes Jahr umfasst, aber nicht konform mit dem Zeitraum ist, der für die Beurteilung der Luftqualität nach 22. BlmschV gefordert ist. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich bei einer Messperiode gem. 22.BlmschV. keine wesentlichen Änderungen der Jahresmittelwerte gegenüber den hier gefundenen Werten ergeben.

Tabelle 3.3: Jahresmittelwerte der gemessenen Schadstoff-Konzentrationen

	NOx*)	NO	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
	µg/m ³				
MR	200	82	74	33	24
BR	105	40	44	25	n. e.
GvG	183	79	63	30	23
FDP	38	7	27	19	16

*) berechnet als NO₂; n. e.: nicht ermittelt

Die Variabilität der Konzentrations-Tagesmittelwerte ist zusätzlich in Abbildung 3.5 in Form von sog. Box-Whisker-Plots dargestellt. Dabei umfasst die Box jeweils 50% aller Messwerte (25- bis 75-Perzentil). Der in der Box eingezeichnete Querbalken indiziert den Wert, der von 50% aller Messwerte unter- bzw. überschritten wird (Median). Die Enden der senkrechten Striche indizieren Werte, die noch oberhalb von 1/3 der Boxhöhe bzw. noch unterhalb der dreifachen Boxhöhe liegen. Einzeln als Kreise bzw. Sternchen ausgewiesene Werte markieren Extrema mit noch größerer Abweichung vom Median. Die Abbildungen machen deutlich, dass die höchste Tag-zu-Tag Variabilität für Stickstoffoxide besteht und die höchsten Maximalwerte für diese Komponenten am Märkischen Ring zu verzeichnen sind.

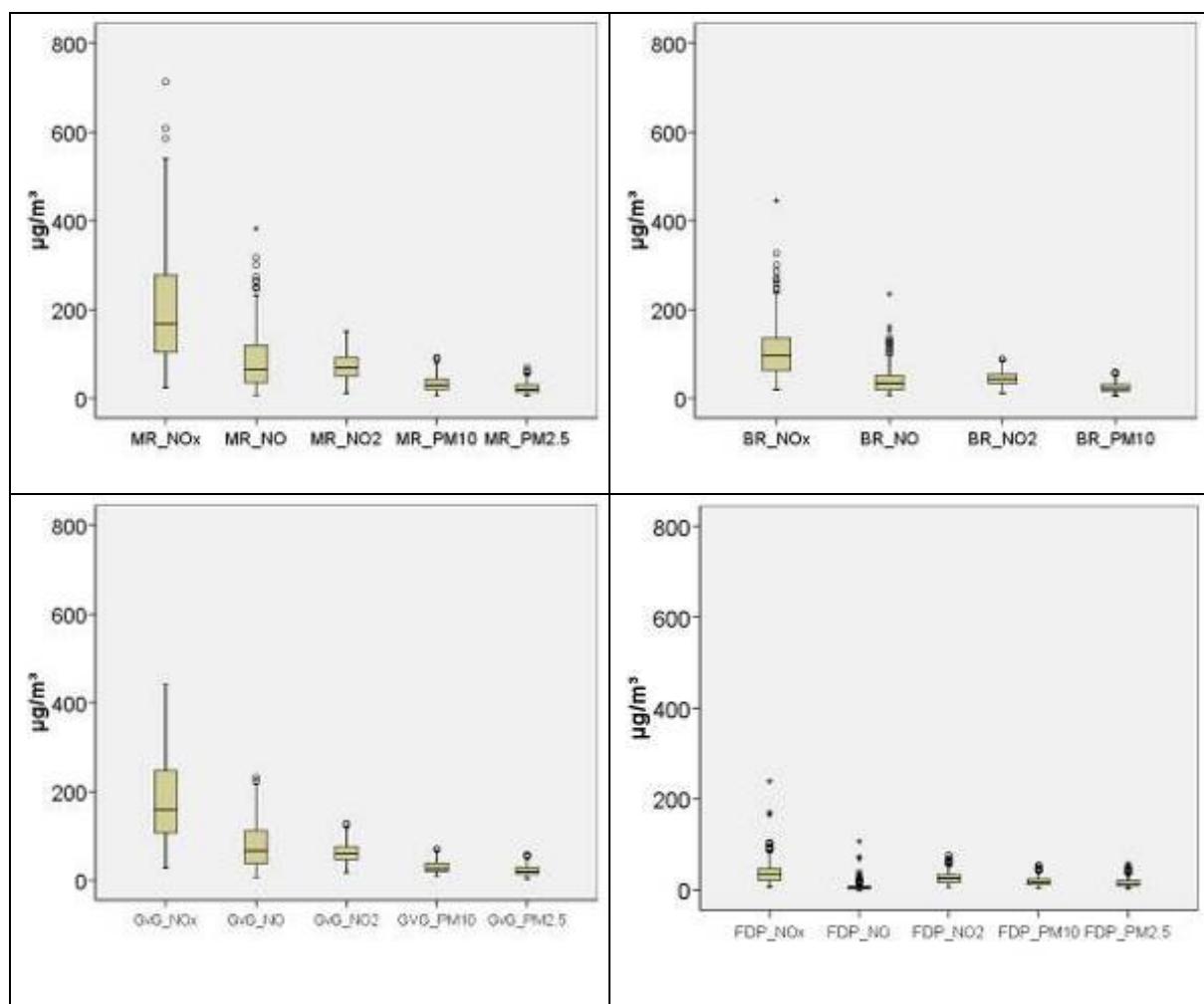


Abbildung 3.5: Boxplots der Schadstoffkonzentrationen (Tagesmittel, $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

3.3.2.1 NO₂

Der ab 2010 gültige Jahresgrenzwert von 40 µg/m³ für NO₂ wurde lediglich an der städtischen Hintergrundstation FDP eingehalten. Diese Station wies einen NO₂ Jahresmittelwert auf, der im bundesweiten Vergleich mit anderen städtischen Stationen (93 Messorte) knapp über dem dafür errechneten Mittelwert von 26 µg/m³ für 2006 liegt.

Für 2006 bzw. 2007 bestehen lt. Eu-Richtlinie noch Toleranzmargen von 8 bzw. 6 µg/m³ NO₂. Am Märkischen Ring und am Graf-von-Galen-Ring wurden auch die entsprechend höheren Beurteilungswerte von 48 bzw. 46 µg/m³ überschritten, während diese am Bergischen Ring knapp eingehalten wurden.

Der Vergleich zu anderen Messstationen in NRW [LANUV 2006] zeigt, dass im Jahr 2006 lediglich an zwei weiteren Stationen (Wuppertal Gathe und Münster Weseler Str.) ein gleich hoher NO₂-Jahresmittelwert wie am Märkischen Ring erreicht wurde. Am Graf-von-Galen Ring wurde ein gegenüber dem JMW 2006 von 68 µg/m³ etwas geringerer Wert gemessen.

Das Mittel aller in Deutschland im Jahre 2006 gemessener Jahresmittelwerte für NO₂ liegt bei 31 µg/m³. Der zukünftige Grenzwert von 40 µg/m³ wurde bundesweit insgesamt 98mal überschritten, die maximal gemessene Konzentration lag dabei bei 121 µg/m³. Bezogen auf die Messergebnisse an Verkehrsstationen übersteigt der am Märkischen Ring erhobene Jahresmittelwert 90% aller in 2006 gefundenen Werte.

3.3.2.2 PM₁₀

Das Maximum aller NRW-Messstationen für das PM₁₀-Jahresmittel lag in 2006 bei 39 µg/m³ und wurde an 3 Messstationen (Dortmund Brackeler Str., Duisburg-Marxloh 2 und Oberhausen Mülheimer Str.) ermittelt. Somit wurde an keiner NRW-Messstation der PM₁₀-Grenzwert für das Jahresmittel von 40 µg/m³ überschritten.

Die im vorliegenden Projekt in Hagen gemessenen Jahresmittel liegen deutlich darunter; insgesamt 11 Messstationen des NRW-Messnetzes wiesen in 2006 PM₁₀-Jahresmittelwerte auf, die gleich hoch oder höher als die am Märkischen Ring gemessenen Werte waren.

Bundesweit wiesen in 2006 ca. 15% aller Messstationen höhere Jahresmittelwerte auf als der am Märkischen Ring gefundene Wert von 33 µg/m³, und der Jahressgrenzwert für PM₁₀ wurde an insgesamt 7 Messstationen überschritten [UBA 2006b].

Im städtischen Hintergrund wurde mit 19 µg/m³ eine deutlich unter dem bundesweiten Mittelwert von 25 µg/m³ einzuordnende Belastung gefunden. Ähnliche Werte wurden im Jahr 2006 an lediglich 3 Stationen in Kiel, Mainz und Marburg gemessen. Die zu Hagen nächstgelegene städtische Station in Schwerte wies in 2006 ein PM₁₀-Jahresmittel von 23 µg/m³ auf.

3.3.2.3PM_{2,5}

Der zukünftige Grenzwert für den Jahresmittelwert für PM_{2,5} wurde an keiner der Messstationen in Hagen überschritten, am Märkischen Ring aber nahezu erreicht. Vergleichswerte aus dem NRW-Messnetz liegen nur für wenige Stationen vor; die Jahresmittelwerte für 2006 lagen dabei zwischen 12 µg/m³ (Eifel) und 25 µg/m³ (Düsseldorf Corneliusstr.). In Baden-Württemberg wurden an insgesamt 9 Messstandorten Werte zwischen 8 µg/m³ (Schwarzwald) und 32 µg/m³ (Stuttgart Neckartor) gemessen. Eine bundesweite Übersicht über Messergebnisse für PM_{2,5} existiert noch nicht.

3.3.3 Überschreitungshäufigkeiten der Kurzzeit-Grenzwerte

Die Anzahl der Stunden bzw. Tage, an denen die jeweiligen Kurzzeitgrenzwerte (1h-Mittel für NO₂ bzw. 24h-Mittel für PM₁₀) überschritten wurden ist in Tabelle 3.4 wiedergegeben.

**Tabelle 3.4: Überschreitungshäufigkeiten der Kurzzeit-Grenzwerte für NO₂ bzw.
PM₁₀ gem. 22. BlmSchV. inkl. und exkl. Überschreitungstage durch
grenzüberschreitenden Eintrag von Wüstensand**

	MR	BR	GvG	FDP
Überschreitung des NO ₂ -Grenzwertes für das Stundenmittel (200 µg/m ³ , zulässig 18 mal im Jahr)	32	1	2	0
Überschreitung des PM ₁₀ -Grenzwertes für das Tagesmittel (50 µg/m ³ , zulässig 35 mal im Jahr)	59	10	35	3
ohne Berücksichtigung des grenzüberschreitenden Eintrags am 24./25.03.2007	57	9	34	2

3.3.3.1 NO₂

Hinsichtlich der Überschreitungshäufigkeit des 1h-Grenzwertes für NO₂ liegt der am Märkischen Ring gefundene Wert von 32 Überschreitungen deutlich über den für 2006 berichteten Häufigkeiten anderer Stationen in NRW und bedeutet eine klare Überschreitung des Kurzzeitgrenzwertes. Die höchste in 2006 gefundene Zahl der Überschreitungen lag bei lediglich 4 und wurde ebenfalls in Hagen am Graf-von-Galen-Ring gemessen. Somit wurde in 2006 an keiner Messstation in NRW die zulässige Anzahl von 18 Überschreitungen überschritten. Dem gegenüber stehen bundesweit [UBA 2006a] insgesamt 11 Stationen, an denen mehr als 18 mal der 1h-Grenzwert überschritten wurde, wobei die maximale Häufigkeit bei 853 (Stuttgart Neckartor) lag.

3.3.3.2 PM₁₀

An der Station MR wurde mit 59 Überschreitungen die zulässige Häufigkeit von 35 Tagen für die Überschreitung des PM₁₀-Tagesmittels von 50 µg/m³ nicht eingehalten.

Der Vergleich mit Daten aus NRW [LANUV 2006] zeigt, dass an insgesamt 16 Stationen des NRW-Luftqualitätssmessnetzes Überschreitungen der maximal zulässigen Häufigkeit von 35 Tagen mit mehr als $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurden. Die maximale Häufigkeit wurde mit 85 Tagen an der Station Krefeld-Hafen gefunden. Vergleichbare oder höhere Überschreitungshäufigkeiten als am Märkischen Ring lagen an insgesamt 9 Stationen vor.

Bundesweit wurde in 2006 die zulässige Häufigkeit an 92 Stationen überschritten, die höchste Überschreitungszahl ergab sich dabei mit 175 Tagen für die Messstation Stuttgart Neckartor. Die Überschreitungshäufigkeit von 59 Tagen am Märkischen Ring entspricht ungefähr dem 67-Perzentil der an den 92 Messnetzstationen gefundenen Überschreitungen, d. h. 67% der Stationen haben geringere, 33% höhere Überschreitungshäufigkeiten als am Märkischen Ring.

3.3.4 Mittelwerte für Werkstage, Samstage und Sonntage

Die Konzentrationen der Luftschaadstoffe unterliegen einem ausgeprägten Wochengang mit deutlich höheren Werten an den Werktagen (Montag bis Freitag) im Vergleich zu den Wochenendtagen. Die entsprechenden Mittelwerte (ermittelt aus den Halbstundenmesswerten) sowie Maximalwerte und Überschreitungshäufigkeiten der Kurzzeit-Grenzwerte sind in Tabelle 3.5 wiedergegeben.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Tabelle 3.5: Kenndaten der Schadstoffkonzentrationen für Werk- und Wochenendtage;

		Märkischer Ring					Bergischer Ring				
		NOx	NO	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	NOx	NO	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
Mittelwert	Werktag	223	94	79	35	25	122	47	49	26	
	Samstage	158	61	65	30	23	74	25	36	23	
	Sonntage	114	41	52	24	19	54	17	29	19	
Maximum	Werktag	1.299	702	279	227	113	765	409	267	219	
	Samstage	737	392	193	132	117	357	180	101	209	
	Sonntage	523	224	199	129	109	292	148	102	121	
NO ₂ -1h-GW	Werktag			32					1		
	Samstage			0					0		
	Sonntage			0					0		
PM ₁₀ -TMGW *)	Werktag				48					7	
	Samstage				8					1	
	Sonntage				1					1	
		Graf-von-Galen-Ring					Ferdinand David Park				
		NOx	NO	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}	NOx	NO	NO ₂	PM ₁₀	PM _{2,5}
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³
Mittelwert	Werktag	208	91	68	31	24	44	9	30	19	16
	Samstage	140	55	56	28	21	31	5	24	18	17
	Sonntage	102	37	45	25	18	21	2	17	16	15
Maximum	Werktag	1205	651	213	123	140	343	169	180	150	111
	Samstage	580	303	144	102	97	180	78	102	101	94
	Sonntage	425	211	188	116	108	98	33	78	110	121
NO ₂ -1h-GW	Werktag			2					0		
	Samstage			0					0		
	Sonntage			0					0		
PM ₁₀ -TMGW *)	Werktag				26					1	
	Samstage				4					0	
	Sonntage				4					1	

*) ohne Osterfeuer/Ferneintrag

Daraus geht u. a. hervor, dass sämtliche im gesamten Messzeitraum vorgekommenen Überschreitungen des NO₂-Kurzzeitgrenzwertes und der Großteil der PM₁₀-TMW-Überschreitungen an Werktagen zu verzeichnen waren. Der PM₁₀-Grenzwert für das Jahresmittel wird aber auch bei Beschränkung auf die Werkstage nicht erreicht.

3.3.5 Fazit der Luftqualitätsmessungen

Die Messwerte der drei Verkehrsstationen im vorliegenden Projekt fügen sich hinsichtlich der Jahres- und Tagesmittelwerte in die Spektren der in NRW und bundesweit vorhandenen Spektren von Belastungen ein. Der Märkische Ring ist dabei im Vergleich zu anderen NRW-Messorten besonders hoch belastet anzusehen, was sich vor allem in den Überschreitungshäufigkeiten des Stundenmittels für NO₂ und des Tagesmittels für PM₁₀ niederschlägt. Das LANUV NRW führt daher derzeit zusätzliche eigene NO₂-Messungen mittels Passivsammlern durch.

Der zukünftige Jahresgrenzwert für PM_{2,5} von 25 µg/m³ wurde an allen Stationen unterschritten. Am Märkischen Ring betrug die Differenz nur 1 µg/m³, so dass dort eine Überschreitung in „ungünstigen“ Jahren möglich erscheint.

4 Luftschadstoffemissionen des Straßenverkehrs

4.1 Berechnungsmethodik

Die Emissionsberechnungen erfolgten mit dem vom Ingenieurbüro simuPLAN entwickelten Emissionsmodell „KFZEMISS“. Dieses Programm entspricht den Vorgaben der Richtlinie [VDI 2003] und verwendet die im Handbuch für Emissionsfaktoren [INFRAS 2004] zusammengestellten Emissionsdaten.

Zur Berechnung der Hagen-spezifischen PKW-Emissionen wurde der im Hagener Fahrzeugregister gemeldete Bestand verwendet (vgl. Abbildung 4.1).

Da das Emissionsverhalten von schweren Nutzfahrzeugen stärker vom überregionalen als vom regionalen Bestand bestimmt wird, wurde die bundesmittlere Bestandszusammensetzung für das Bezugsjahr 2006 entsprechend [INFRAS 2004] den Berechnungen zugrunde gelegt.

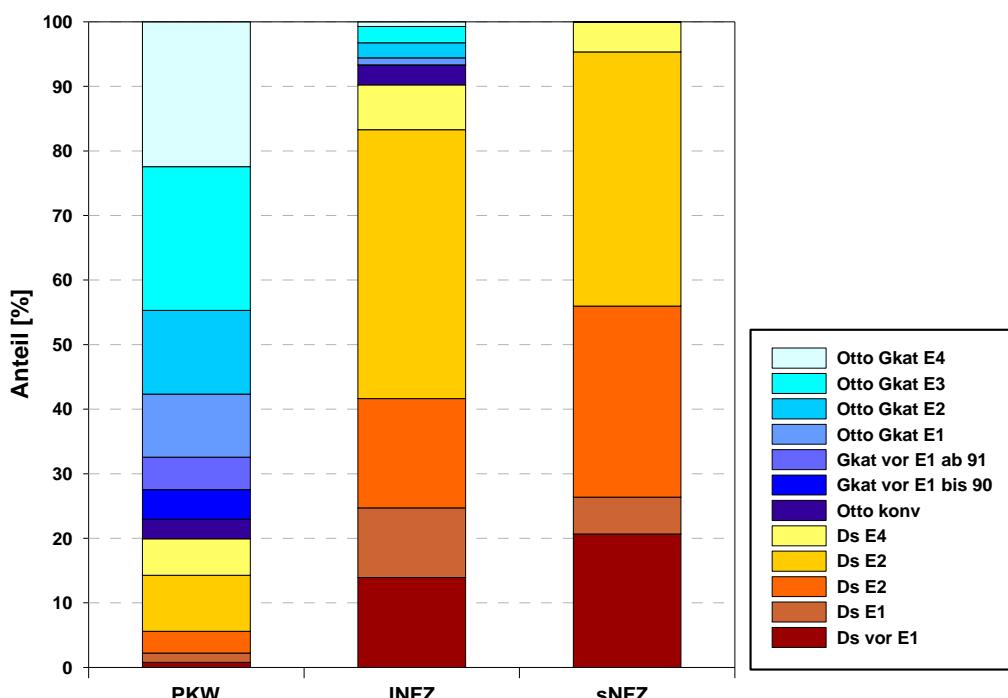


Abbildung 4.1: Aufteilung des PKW-Bestandes von Hagen auf die einzelnen Schadstoffklassen (Bezugsjahr 2006)

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Bei PM₁₀-Feinstäuben sind neben den Emissionen, die über das Abgas freigesetzt werden, auch Emissionen zu berücksichtigen, die durch das Aufwirbeln von Teilchen aus Reifen- und Straßenabrieb, Kupplungs- und Bremsverschleiß u. a. entstehen. Im Handbuch für Emissionsfaktoren sind keine Emissionsfaktoren für das Aufwirbeln von PM₁₀ enthalten. Auf der Grundlage neuer Untersuchungen [Schneider et al. 2006] und [Düring, Lohmeyer 2004] ergeben sich für das Aufwirbeln die in der Tabelle 4.1 aufgeführten Emissionsfaktoren, die bei der Bestimmung der PM₁₀-Emissionen verwendet wurden.

Tabelle 4.1: PM₁₀-Emissionsfaktoren für Aufwirbeln und Abrieb

Verkehrs-situation (nach HBEFA)	Störungsgrad	PM ₁₀ -Emissionsfaktoren Aufwirbelung und Abrieb [mg / (Fz·km)]	
		PKW u. LKW≤3,5t	LKW>3,5t
HVS>50 Hauptverkehrsstraße Tempolimit > 50 km/h	gering	22	200
	mittel	27	250
	groß	35	330
HVS Hauptverkehrsstraße Tempolimit 50 km/h	gering	22	200
	mittel	31	290
	groß	45	420
LSA Innerorts-Straße mit LSA	gering	29	260
	mittel	43	390
	groß	60	550
Kern Straße im Stadt kern	gering	31	280
	mittel	43	390
	groß	70	630
Nebenstraße	gering	29	260
	mittel	43	390
	groß	70	630
Stop&Go		90	800

Die Feinstaubpartikel im Abgas sind allesamt kleiner als 2,5 µm.

Die Feinstaub-Emissionen, die auf das Aufwirbeln von Teilchen aus Reifen- und Straßenabrieb, Kupplungs- und Bremsverschleiß u. a. zurückzuführen sind, entfallen hingegen größtenteils auf die Fraktion größer 2,5 µm. Eine aus den

Immissionsmessungen abgeleitete Berechnung des PM_{2,5}-Aufwirbelns wird im folgenden Kapitel dargestellt.

4.2 Ergebnisse

Auf der Grundlage der Verkehrszähldaten (Halbstundenwerte) wurden Emissionsberechnungen nach der unter Kapitel 4.1 beschriebenen Methodik durchgeführt. Der zu untersuchende Abschnitt des Märkischen Rings wurde hierbei als „Innerörtliche Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlagen“ (IO_LSA) betrachtet.

Die Tabelle 4.2 und Tabelle 4.3 stellen die Ergebnisse der Emissionsberechnungen dar.

Tabelle 4.2: Märkischer Ring: Mittlere und maximale NO_x-Emissionsraten

	Emissionsraten in µg/(m·s)					
	Mittelwerte			Maximalwerte*		
	SNfz	PKW	Gesamt	SNfz	PKW	Gesamt
Werktags (Montag bis Freitag)	161,9	133,4	295,3	353,2	248,9	536,1
Samstag	71,1	113,9	185	135,8	220,5	346,8
Sonn- und Feiertag	28,9	80,8	109,7	50,2	155,4	199,9
Mittelwert über alle Tage	127,6	122,6	250,2	269,9	228,7	451,1

* Maximalwerte der mittleren Emissionstagesgänge (siehe Abbildung 4.2)

Die Werte der Tabelle 4.2 verdeutlichen, dass an Werktagen ca. 55% der NO_x-Gesamtemissionen von schweren Nutzfahrzeugen verursacht werden, obwohl diese Fahrzeuggruppe einen Anteil von lediglich 4,5% am gesamten Verkehrsaufkommen ausmacht. Die verkehrsplanerische Maßnahme einer LKW-Durchfahrtsperre ist demnach besonders geeignet, um die NO_x-Gesamtemissionen wirksam zu mindern.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Die Werte der Tabelle 4.3 verdeutlichen, dass an Werktagen die schweren Nutzfahrzeuge einen Anteil von 37% an den ausgestossenen PM₁₀-Gesamtemissionen haben. Das Emissionsminderungspotenzial ist demnach geringer als bei NO_x. Das geringere Emissionsminderungspotenzial ist insbesondere bedingt durch den hohen Anteil der PKW an den Aufwirbel-Emissionsraten.

Tabelle 4.3: Märkischer Ring: Mittlere und maximale PM₁₀-Emissionsraten

	Mittlere Emissionsraten in µg/(m·s)								
	Abgas			Aufwirbeln			Gesamt		
	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe
Werktags (Mo bis Fr)	4,6	3,4	8,0	6,4	15,3	21,7	11,0	18,7	29,7
Samstag	2,0	2,9	4,9	2,8	12,6	15,4	4,8	15,5	20,3
Sonn- und Feiertag	0,8	2,1	2,9	1,1	8,7	9,8	1,9	10,8	12,7
Mittel über alle Tage	3,6	3,1	6,7	5,0	13,8	18,7	8,5	16,9	25,4
Maximale Emissionsraten in µg/(m·s)									
	Abgas			Aufwirbeln			Gesamt		
	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe
Werktags (Mo bis Fr)	10,2	6,4	15,0	14,1	30,5	40,0	24,3	36,9	54,1
Samstag	3,9	5,7	9,4	5,6	25,2	30,2	9,5	30,9	39,6
Sonn- und Feiertag	1,4	4,1	5,3	2,0	16,7	18,4	3,4	20,8	23,7
Mittel über alle Tage	7,8	5,9	12,5	10,8	27,4	34,9	18,6	33,3	46,8

* Maximalwerte der mittleren Emissionstagesgänge (siehe Abbildung 4.3)

Auf der Grundlage der PM₁₀-Emissionsraten aus Tabelle 4.3 und eines Vergleiches der lokalen PM₁₀- und PM_{2,5}-Immissionen am Märkischen Ring lassen sich die PM_{2,5}-Emissionsraten für den Märkischen Ring bestimmen.

Die Kausalkette zur Ableitung der PM_{2,5}-Emissionsraten lässt sich wie folgt beschreiben:

Die Abgas-Emissionsraten für PM_{2,5} und PM₁₀ sind identisch.

Der Anteil des PM₁₀-Abgases an der mittleren lokalen PM₁₀-Zusatzbelastung von 14,2 µg/m³ beträgt 4,8 µg/m³ (ca. 34 %). Der Rest von 9,4 µg/m³ wird durch das Aufwirbeln von PM₁₀-Teilchen verursacht.

Das PM_{2,5}-Abgas trägt ebenfalls 4,8 µg/m³ an der mittleren lokalen PM_{2,5}-Zusatzbelastung von 7,3 µg/m³ bei. Der relative Anteil beträgt somit im Mittel ca. 66 %. Der Rest von 2,5 µg/m³ wird im Mittel durch das Aufwirbeln von PM_{2,5}-Teilchen verursacht.

Das Verhältnis der Emissionsrate für das Aufwirbeln von PM_{2,5} zur Emissionsrate für das Aufwirbeln von PM₁₀ entspricht somit dem Verhältnis von 0,266 = 2,5 / 9,4 (vgl. Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4: Ableitung der Emissionsraten für PM_{2,5}

Zusatzbelastung	PM ₁₀	PM _{2,5}	PM _{2,5} / PM ₁₀
Gesamt	14,2	7,3	0,514
Abgas*	4,8	4,8	1,000
Aufwirbeln*	9,4	2,5	0,266

* Aufteilung der gesamten Zusatzbelastung auf Aufwirbeln und Abgas entsprechend der Anteile des Aufwirbelns und des Abgases an der mittleren PM₁₀-Emissionsrate (siehe Tabelle 4.3)

Mit Hilfe der so ermittelten Emissionsraten für das Aufwirbeln für PM_{2,5} lassen sich die PM_{2,5}-Emissionen für den Märkischen Ring bestimmen (siehe Tabelle 4.5).

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Tabelle 4.5: Märkischer Ring: Mittlere und maximale PM_{2,5}-Emissionsraten

	Mittlere Emissionsraten in µg/(m·s)									
	Abgas			Aufwirbeln			Gesamt			
	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe	
Werktags (Mo bis Fr)	4,6	3,4	8,0	1,7	4,1	5,8	6,3	7,5	13,8	
Samstag	2,0	2,9	4,9	0,7	3,4	4,1	2,7	6,3	9,0	
Sonn- und Feiertag	0,8	2,1	2,9	0,3	2,3	2,6	1,1	4,4	5,5	
Mittel über alle Tage	3,6	3,1	6,7	1,3	3,7	5,0	4,9	6,8	11,7	
Maximale Emissionsraten in µg/(m·s)										
	Abgas			Aufwirbeln			Gesamt			
	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe	SNfz	PKW	Summe	
Werktags (Mo bis Fr)	10,2	6,4	15,0	3,8	8,1	10,6	13,9	14,6	25,1	
Samstag	3,9	5,7	9,4	1,5	6,7	8,0	5,4	12,4	17,5	
Sonn- und Feiertag	1,4	4,1	5,3	0,5	4,4	4,9	1,9	8,6	10,2	
Mittel über alle Tage	7,8	5,9	12,5	2,9	7,3	10,2	10,7	13,2	22,7	

Die Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 stellen mittlere Tagesgänge der NO_x- und PM₁₀-Emissionsraten an Werktagen (Mo-Fr), Samstagen und Sonn- und Feiertagen dar.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

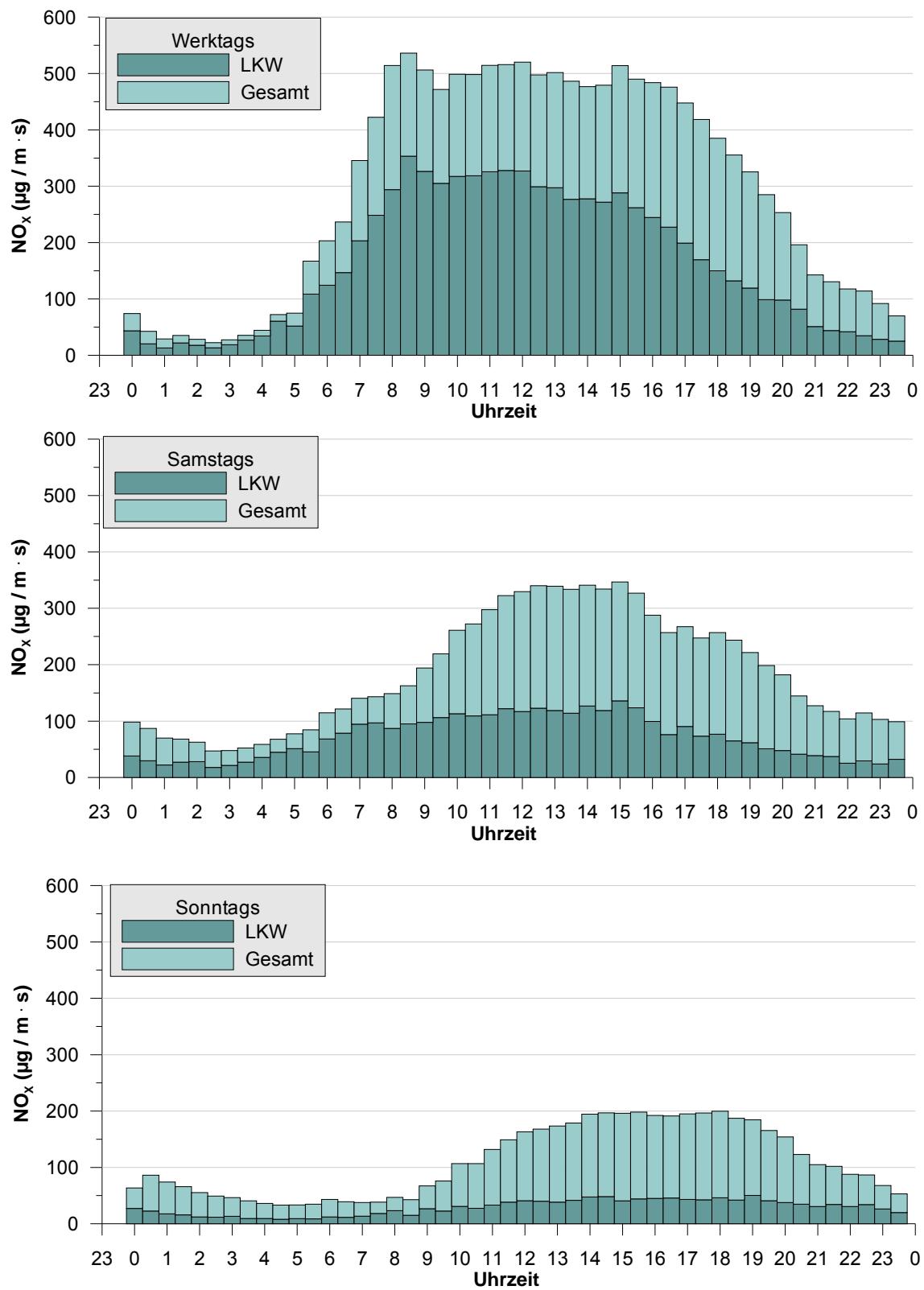


Abbildung 4.2: Märkischer Ring: Tagesgänge der NO_x -Verkehrsemissionen

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

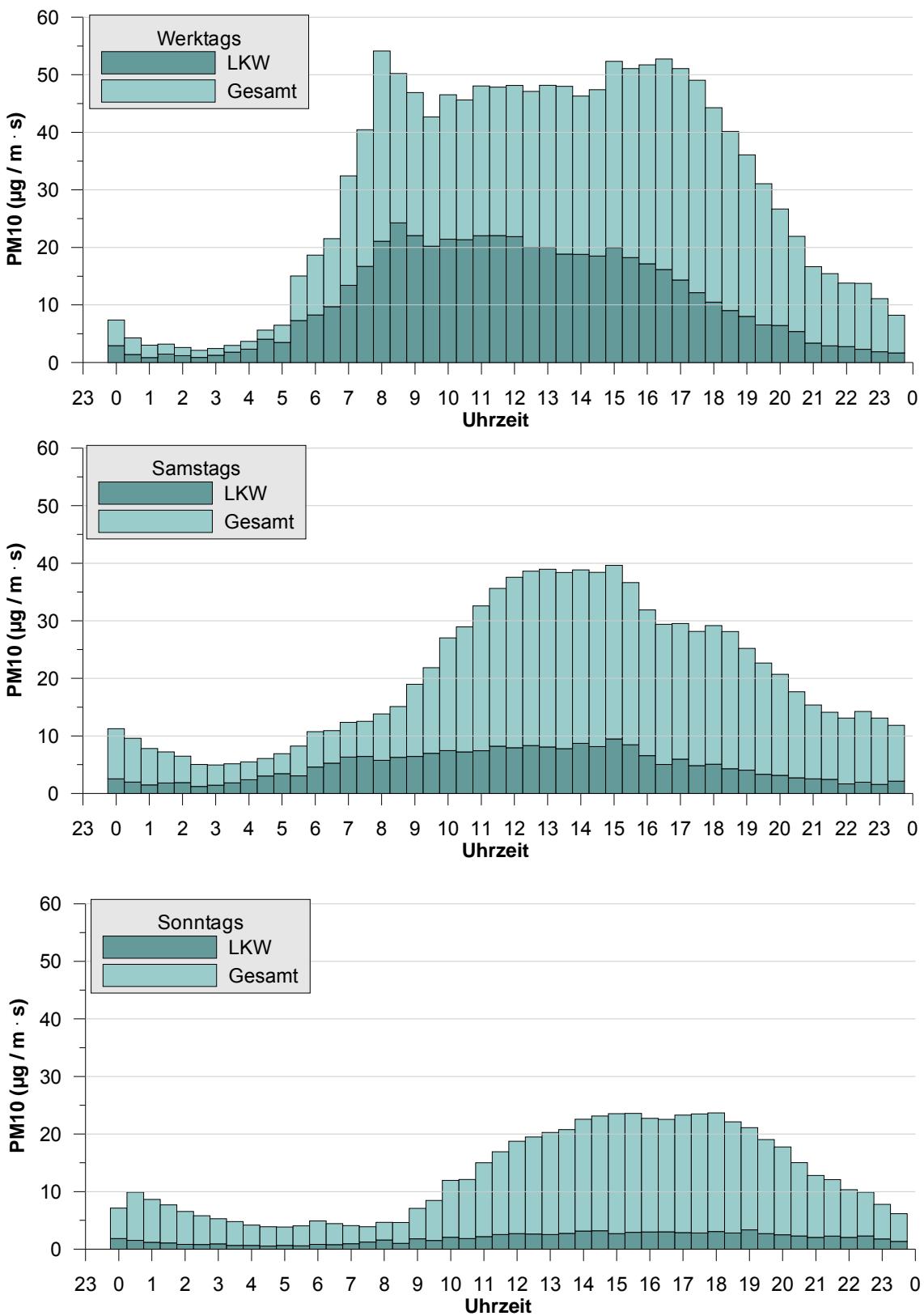


Abbildung 4.3: Märkischer Ring: Tagesgänge der PM_{10} -Verkehrsemissionen

Die Abbildung 4.4 vergleicht die Emissionen eines Fahrzeugs der Gruppe SNfz mit den Emissionen eines Fahrzeugs der Gruppe PKW. Die Emissionen des SNfz sind hierbei auf 100% normiert.

Es zeigt sich, dass ein LKW etwa 25-mal mehr NOx, 13-mal mehr PM₁₀ und 18-mal mehr PM_{2,5} emittiert als ein PKW. Diese Zahlen verdeutlichen nochmals das enorme Emissionsminderungspotenzial durch temporäre LKW-Sperrungen.

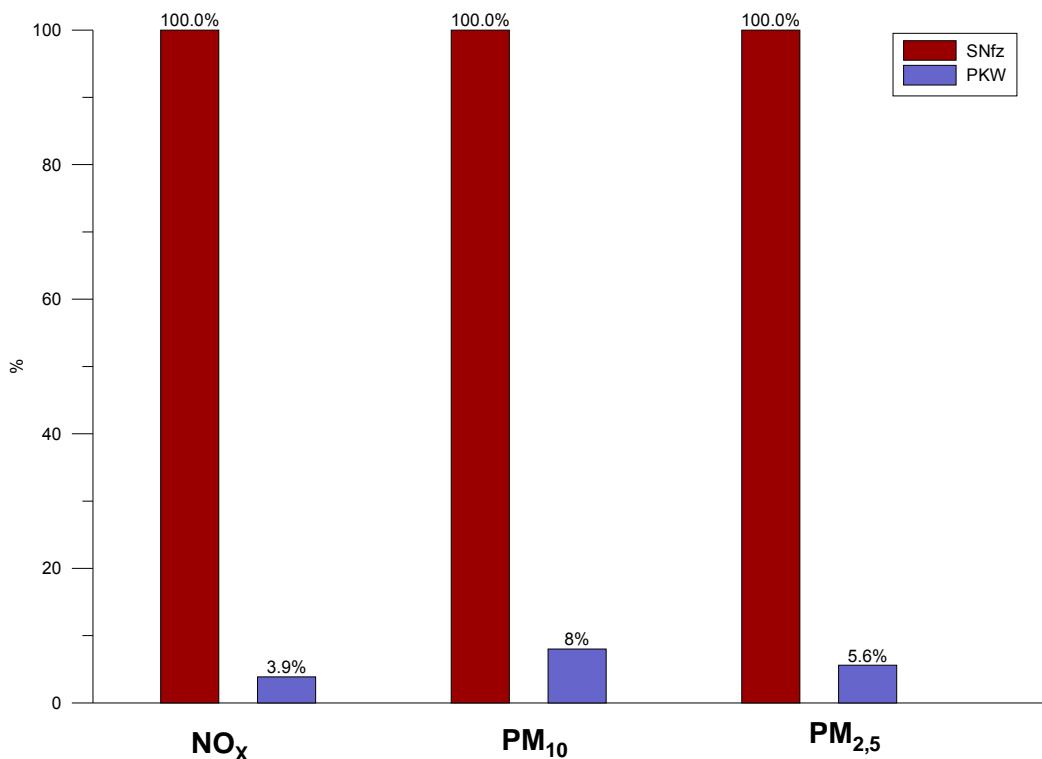


Abbildung 4.4: Vergleich der Emissionen eines Fahrzeugs der Gruppe SNfz mit den Emissionen eines Fahrzeugs der Gruppe PKW

Die Höhe der verkehrsbedingten Luftschadstoffimmissionen hängt bei gleichen Randbedingungen für die Ausbreitung direkt von der Intensität der Kfz-Emissionen ab. Der Anteil des Schwerlastverkehrs an den Immissionen des Straßenverkehrs wiederum lässt sich anhand des Verhältnisses der Lkw-Emissionen an den Gesamtemissionen bestimmen.

Die Ergebnisse der Emissionsberechnungen zeigen:

Das höchste Potenzial, durch zeitlich begrenzte Sperrungen des Schwerlastverkehrs die NO₂-, PM₁₀- und PM_{2,5}-Immissionen zu mindern,

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

besteht tagsüber an Werktagen (Mo - Fr) - insbesondere in den Vormittagsstunden.

Sperrungen für SNfz werden bei NO_x eine stärkere Emissions- und Immissionsminderung bewirken als bei PM₁₀ und PM_{2,5}.

Das Immissionsminderungspotenzial dynamisch ausgelöster, zeitlich begrenzter Durchfahrverbote für Schwerlastverkehre ist an Samstagen und vor allem an Sonn- und Feiertagen deutlich verringert. Dies gilt vor allem für NO_x.

5 Entwicklung des Steuerungs-Algorithmus

Aufgabe der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung ist es, bei Situationen mit hohen NO₂-Immissionen eine zeitlich befristete Sperrung des Märkischen Rings auszulösen und diese wieder aufzuheben, wenn sich die Immissionssituation aufgrund günstigerer Randbedingungen wieder entspannt.

Aufgrund des hohen Beitrages des Schwerlastverkehrs an den NO_x-Emissionen (vgl. Kapitel 4.2) sind durch diese bedarfsgerechten und zeitlich begrenzten Sperrungen signifikante Minderungen der NO₂-Immissionen zu erwarten. Eine Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass ein Großteil der betroffenen LKW-Fahrer das Durchfahrerverbot beachtet und einhält.

Im Folgenden wird die Entwicklung des Steuerungsalgorithmus auf Basis der zur Verfügung stehenden Messdaten (Verkehr / Emissionen / Meteorologie / Immissionen) beschrieben.

Die Entwicklung und die Überprüfung der Wirksamkeit der Methode erfolgte anhand der Meteorologie-, Verkehrs- und Immissionsdaten, die zwischen dem 01.09.2006 und 14.02.2007 sowie dem 01.05.2007 und 31.05.2007 ermittelt wurden. In diesen Projektphasen fand keine Steuerung des Schwerlastverkehrs am Märkischen Ring statt.

Während der Phase der Entwicklung und Validierung des Steuerungsmoduls wurde auch überprüft, ob und in welchem Maße das Verfahren geeignet ist, auch einen Beitrag zur Minderung von PM₁₀-Tagesmittelwerten zu leisten und somit die Anzahl der Tage mit Grenzwertüberschreitungen zu reduzieren.

Die Analyse und Bewertung der mit dem entwickelten Algorithmus durchgeführten LKW-Sperrungen am Märkischen Ring erfolgt in Kapitel 6.

5.1 Analyse der lufthygienisch relevanten Einflussgrößen

Die große Menge der im Rahmen des Forschungsprojektes angefallenen Messdaten (Verkehr, Meteorologie, Immissionen) erforderte eine sinnvolle Mittelwertbildung. Da die dynamische Verkehrslenkung in einem halbstündigen Takt gefahren werden sollte, wurden für alle Messparameter Halbstundenmittelwerte in einheitlichen Zeitabständen berechnet.

Zur weiteren Auswertung der Daten wurden alle gemessenen Zeitreihen in ein einheitliches Datenbanksystem übergeben, welches unter anderem das Setzen von Filterkriterien ermöglichte.

Alle Messparameter wurden fortlaufend einer grafischen Analyse (i.d.R. für den Zeitraum einer Woche) unterzogen, mit der die vermuteten Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Einflussgrößen überprüft wurden.

5.1.1 Zeitliche Verteilung hoher NO₂-Immissionen

Die Abbildung 5.1 stellt die mittleren Tagesgänge der NO₂-Immissionen für Werkstage (Mo – Fr), Samstage und Sonn- und Feiertage im gesamten Untersuchungszeitraum dar.

Die Grafik spiegelt die unterschiedlichen Zeitverläufe des Verkehrsaufkommens und der NO_x-Emissionen an Werktagen, Samstagen und Sonn- und Feiertagen wieder (vgl. Abbildung 3.4 und Abbildung 4.2).

An Werktagen treten deutliche NO₂-Immissionsmaxima am frühen Vormittag und am frühen Abend auf. An Samstagen und an Sonn- und Feiertagen hingegen steigen die Immissionen vom Morgen bis zum Abend kontinuierlich an und liegen tagsüber insgesamt auf einem geringeren Niveau.

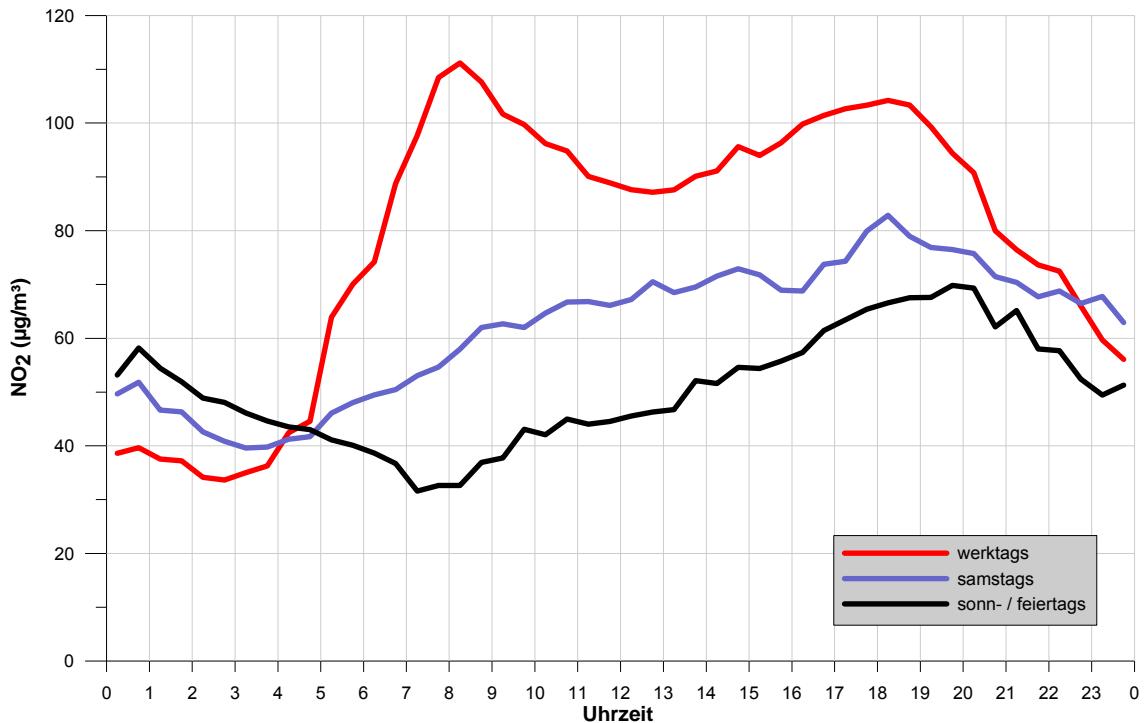


Abbildung 5.1: Märkischen Ring: Mittlere Tagesgänge der NO₂-Konzentrationen
Zeitraum: 01.09.2006 – 31.08.2007

Die unterschiedlichen Immissionsverhältnisse im Tages- und Wochenverlauf werden auch deutlich, wenn man die zeitliche Verteilung von hohen NO₂-Konzentrationen ($> 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$) analysiert.

Die Abbildung 5.2 belegt, dass Überschreitungen von 160 µg/m³ in einem Zeitfenster von 06:00 Uhr bis 24:00 Uhr auftraten. Die häufigsten Überschreitungen wurden in der Zeit von 08:00 bis 11:00 Uhr sowie zwischen 17:00 und 20:00 Uhr verzeichnet. Nach 20:00 Uhr treten hohe NO₂-Messwerte von mehr als 160 µg/m³ nur in den Sommermonaten (April bis September) auf. Dies ist auf zusätzlich wirkende photochemische Prozesse zurückzuführen (vgl. Kapitel 5.1.4).

Insgesamt lagen 689 NO₂-Halbstundenmittelwerte über dem Wert von 160 µg/m³. An Wochenenden und Feiertagen überschritten lediglich 27 mal die NO₂-Halbstundenmittelwerte diesen Wert. Von der Gesamtzahl der hohen NO₂-Halbstundenwerte treten an Wochenenden und Feiertagen somit lediglich 3,9% auf.

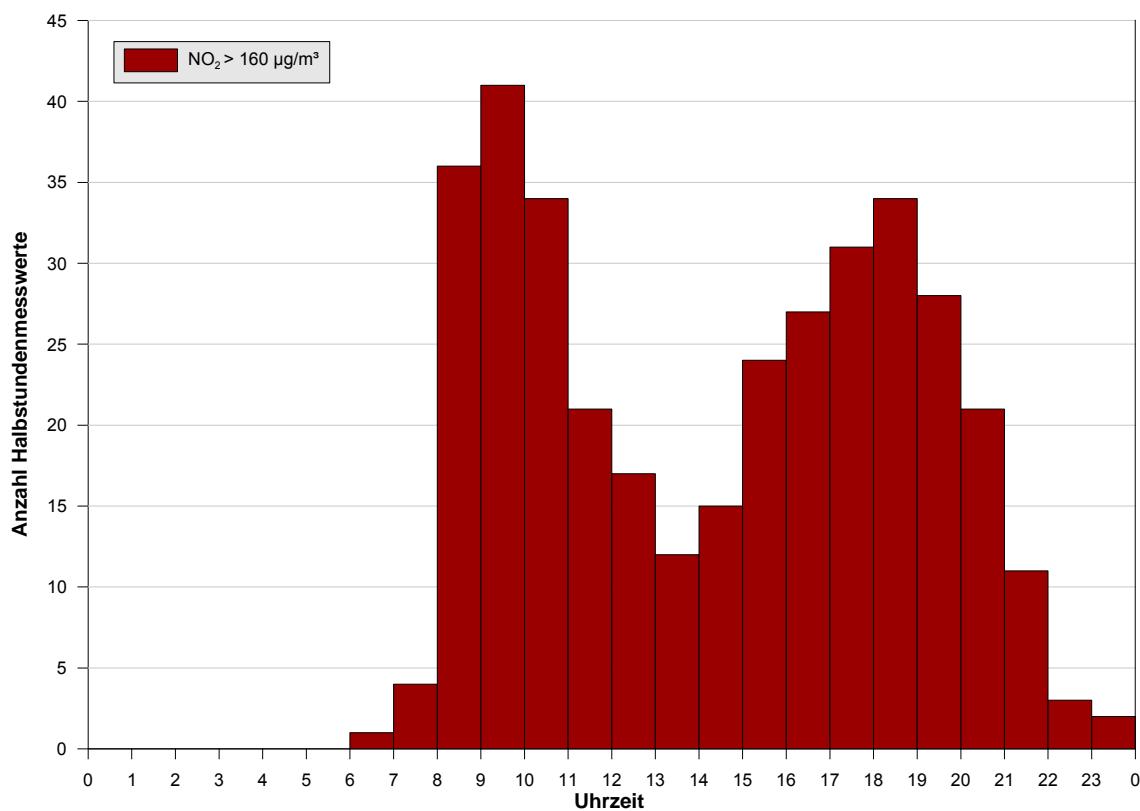


Abbildung 5.2: Häufigkeit des Auftretens von NO₂-Konzentrationen >160µg/m³ im Tagesverlauf
Zeitraum: 01.09.2006 – 31.08.2007

Die zeitliche Verteilung der hohen NO₂-Konzentrationen sowie das geringe Auftreten von NO₂-Konzentrationen mit mehr als 160µg/m³ an Wochenenden und Feiertagen ist durch die geringen nächtlichen Emissionen sowie die im Vergleich zu Werktagen deutlich verminderten Emissionen am Wochenende (vgl. Abbildung 4.2) zu erklären.

Im Rahmen einer möglichst effizienten Steuerung wurde daher festgelegt, dass potenzielle Sperrungen in den Monaten Oktober bis März nur werktags zwischen 06:00 und 20:00 Uhr und in den Monaten April bis September nur werktags zwischen 06:00 und 22:00 Uhr ausgelöst werden sollen. An Wochenenden und Feiertagen wird die Sperrung immer deaktiviert.

5.1.2 Windverhältnisse bei hohen NO₂-Immissionen

Um den Einfluss der Überdachwindverhältnisse auf die Immissionssituation am Märkischen Ring abzuschätzen, wurde eine Windrose für die Zeiten, in denen NO₂-Konzentrationen von mehr als 160 µg/m³ gemessen wurden, erstellt (vgl. Abbildung 5.3).

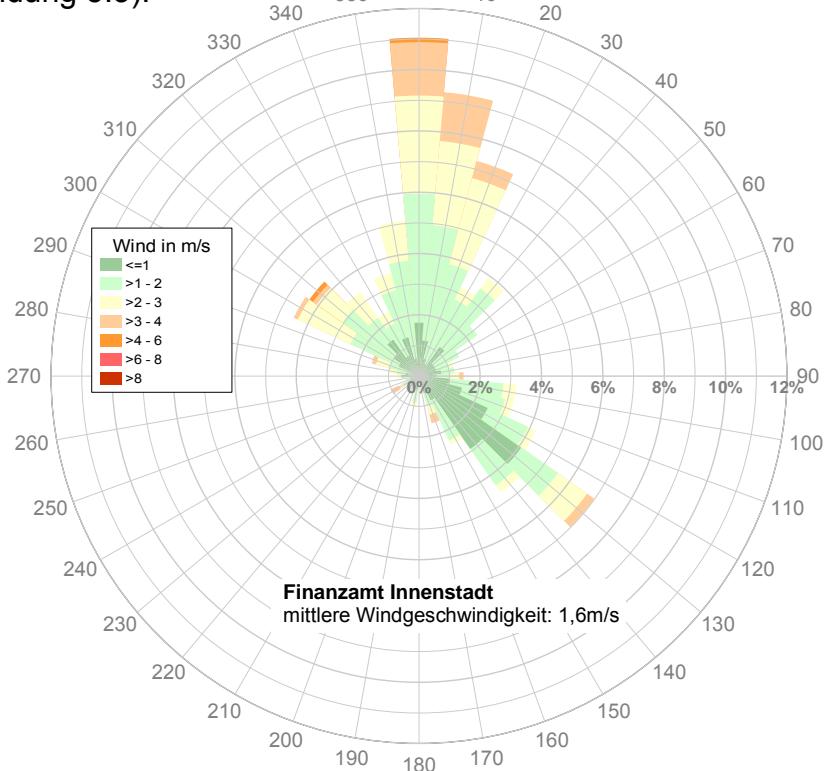


Abbildung 5.3: Windrichtungshäufigkeiten bei NO₂-Werten > 160 µg/m³
Zeitraum: 01.09.2006 – 31.08.2007

Die Abbildung veranschaulicht, dass sich die Windverhältnisse bei hohen NO₂-Konzentrationen signifikant von den mittleren Windverhältnissen des gesamten Zeitraumes (vgl. Abbildung 3.2, Mitte) unterscheiden. So lag die mittlere Windgeschwindigkeit bei hohen NO₂-Werten bei nur 1,6 m/s und somit deutlich niedriger als im gesamten Untersuchungszeitraum (2,5 m/s). Weiterhin fällt auf, dass bei hohen NO₂-Werten der Nordwest- Nord- und Nordost- Windrichtungssektor wesentlich ausgeprägter ist als im Gesamtzeitraum (vgl. Abbildung 5.3 mit Abbildung 3.2, Mitte).

Der im Mittel des gesamten Zeitraums dominierende Südostsektor ist wesentlich schwächer ausgeprägt. Bei übergeordneten Anströmungsrichtungen aus dem Sektor Süd bis West wurden keine hohen NO₂-Konzentrationen gemessen.

Zur weiteren Überprüfung dieser Wechselbeziehungen wurden die NO₂-Mittelwerte für windschwache Wetterlagen (Windgeschwindigkeit < 2 m/s) an Werktagen im Zeitraum von 06:00 bis 20:00 Uhr für jeweils 10° breite Windrichtungssektoren bestimmt und grafisch analysiert. Die Abbildung 5.4 veranschaulicht, dass bei Windrichtungen aus Nord im Mittel mit deutlich höheren Immissionen zu rechnen ist als bei südlichen Windrichtungen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte der zusätzliche Schadstoffeintrag aus Richtung des sich unmittelbar nördlich an den Untersuchungsraum angrenzenden Verkehrsknotenpunkt Emilienplatz sein.

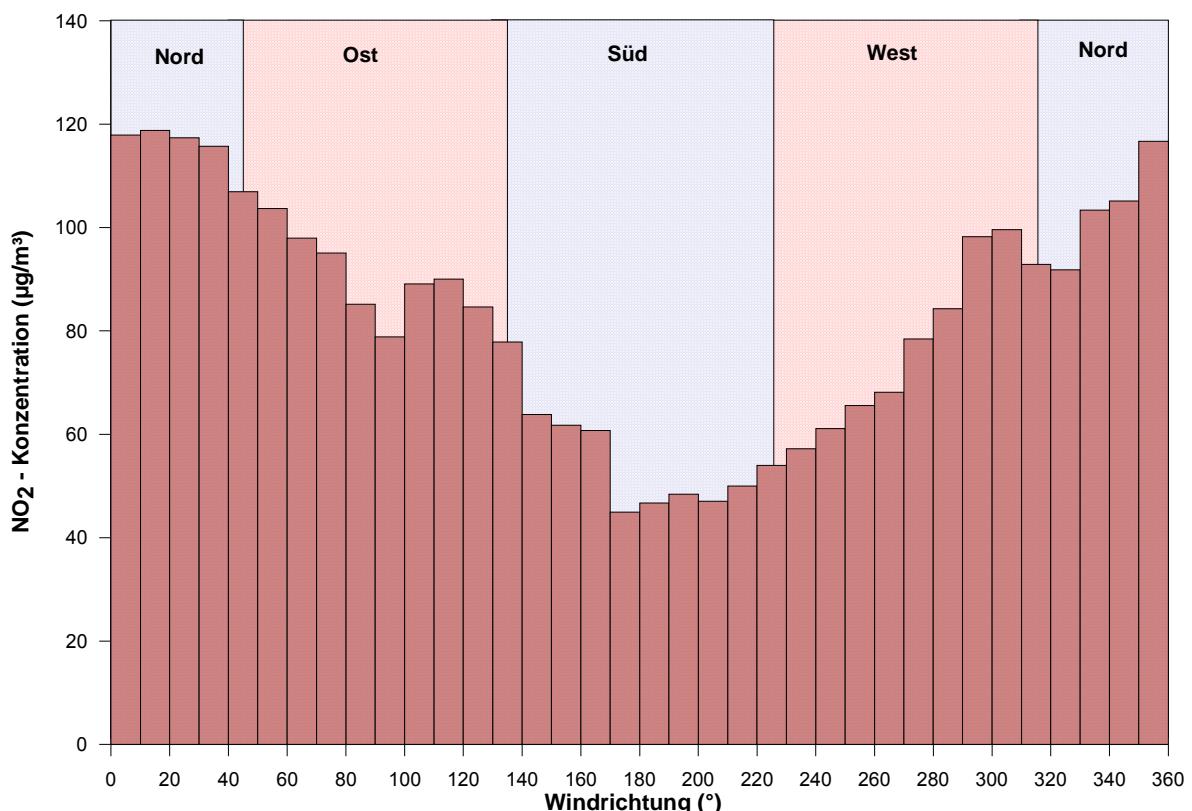


Abbildung 5.4: Mittlere NO₂-Konzentration bei Windgeschwindigkeiten < 2,0 m/s
Zeitraum: 01.09.2006 – 31.08.2007

5.1.3 Einfluss der atmosphärischen Schichtung

Zur Verdeutlichung des Einflusses der atmosphärischen Schichtung auf die Schadstoffentwicklung am Märkischen Ring wurde der mittlere Tagesgang der NO₂-Konzentrationen für Werkstage mit Inversionen sowie für Werkstage ohne Inversionen berechnet und dargestellt (siehe Abbildung 5.5).

Es wird deutlich, dass an Tagen mit Inversionsbedingungen im gesamten Tagesverlauf mit höheren Immissionen zu rechnen ist. An Tagen mit Inversion liegen die mittleren NO₂-Werte tagsüber etwa 20 µg/m³ bis 30 µg/m³ über den mittleren Werten an Tagen ohne Inversion. Auch nachts werden unter Inversionsbedingungen deutliche höhere Schadstoffkonzentrationen erreicht.

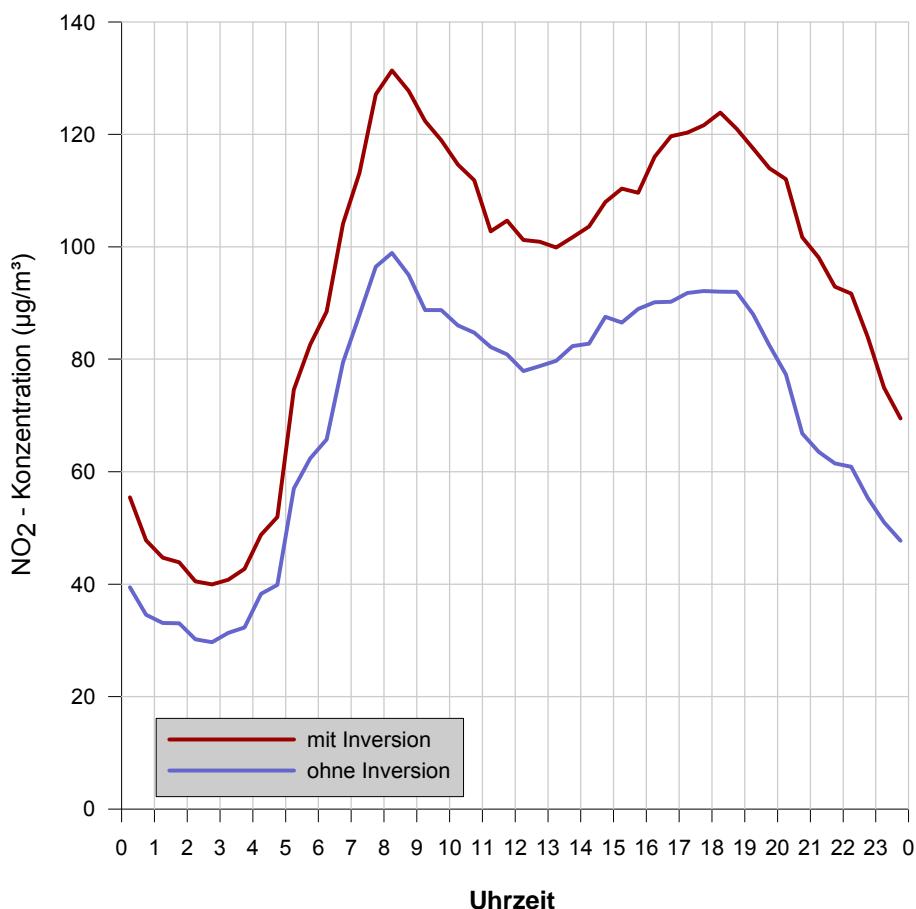


Abbildung 5.5: Mittlerer Tagesgang der NO₂-Konzentrationen an Werktagen mit und ohne Inversionen
Zeitraum: 01.09.2006 – 31.08.2007

Das morgendliche Immissionsmaximum fällt mit der Auflösung der Bodeninversion und dem gleichzeitig starken morgendlichen Verkehr zusammen (vgl. Abbildung 3.4 und Abbildung 5.5). Einem starken Immissionsanstieg bis zur Auflösung der Inversion folgt im Laufe des Morgens bei zunehmender Labilisierung und Durchmischung der Atmosphäre ein deutlicher Rückgang der NO₂-Immissionen. Als besonders kritisch sind somit die Zeiten kurz vor der Inversionsauflösung bei gleichzeitig hohem Berufsverkehrs-aufkommen einzuschätzen.

Das abendliche Immissionsmaximum tritt in der Zeit auf, in der sich an Strahlungstagen die bodennahe Atmosphäre aufgrund der abnehmenden solaren Einstrahlung wieder zunehmend stabilisiert. Der Rückgang der Immissionen nach 19 Uhr wird durch die nun deutlich gesunkenen Emissionen bewirkt (siehe Abbildung 4.2).

5.1.4 Strahlung und Photochemie

Im April 2007 wurden am Märkischen Ring besonders hohe NO₂-Immissionswerte (Mittelwert 108 µg/m³) gemessen, die mit den bereits bekannten Einflussgrößen allein nicht erklärt werden konnten. Zudem wurden erstmals seit Beginn der Immissionsmessungen hohe NO₂-Immissionen nach 20:00 Uhr registriert.

Der Monat April war ein überdurchschnittlich sonnenscheinreicher Monat (vgl. Abbildung 5.6). Es ist daher anzunehmen, dass photochemische Prozesse Mitverursacher der hohen NO₂-Immissionen gewesen sind.

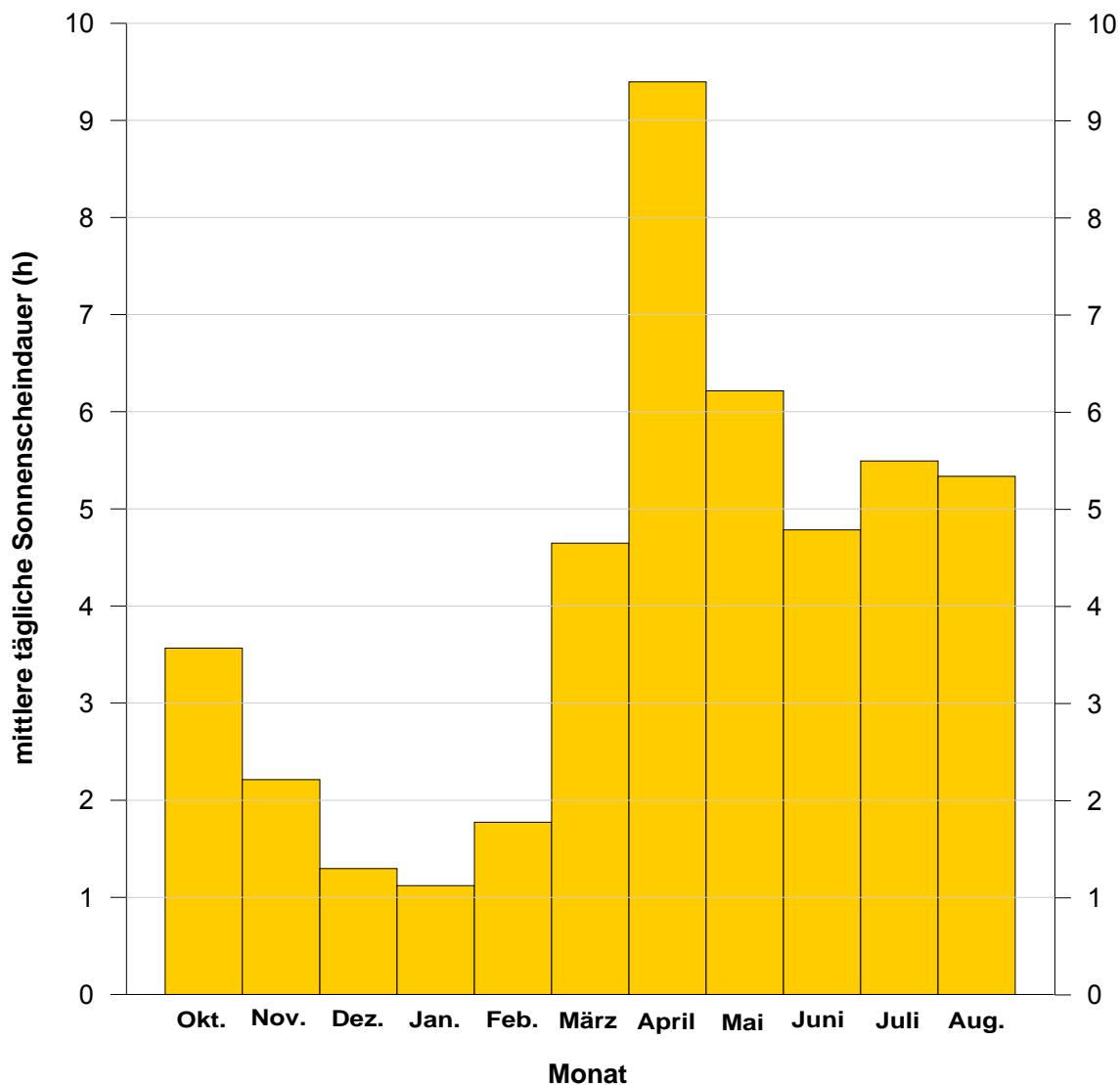


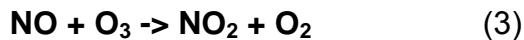
Abbildung 5.6: Mittlere tägliche Sonnenscheindauer im Untersuchungszeitraum

Photochemische Prozesse sind eng mit dem Auf- und Abbau von Ozon in verkehrsnahen Gebieten verknüpft. So wird NO₂ aus dem Straßenverkehr und anderen Quellen in einem auslösenden Schritt durch Sonnenlicht (in chemischen Formeln als *hv* geschrieben) in Stickstoffmonoxid (NO) und ein Sauerstoffatom gespalten. Letzteres reagiert mit Luftsauerstoff zu Ozon.



Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Das hierbei entstehende NO reagiert aber wieder mit O₃ zu Stickstoffdioxid und Sauerstoff, so dass sich weitgehend ein Gleichgewicht zwischen Ozonbildung und -abbau einstellt.



In diesen Reaktionsprozess können nun allerdings organische Luftverunreinigungen wie flüchtige organische Verbindungen und Kohlenmonoxid eingreifen und das natürliche Gleichgewicht von Entstehung und Vernichtung von Ozon empfindlich stören. Sie greifen nicht direkt in den Ozon-Zyklus ein, sondern werden zunächst in der Luft durch Oxidation abgebaut. Die dabei entstehenden Abbauprodukte fördern die Umwandlung von NO zu NO₂. Damit steht weniger NO zum Abbau und mehr NO₂ zur Bildung von Ozon zur Verfügung und die Rückreaktion des Ozons mit Stickstoffmonoxid wird geschwächt.

Die oben genannten photochemischen Prozesse finden bevorzugt an Tagen mit solarer Einstrahlung statt. Hierbei wird tagsüber Ozon gebildet (vgl. Gleichungen (1) und (2)). In Straßennähe kommt es tagsüber aufgrund der starken Freisetzung von NO_x (größtenteils als NO) zu einem lokalen Abbau von Ozon und einer vermehrten Umwandlung von NO nach NO₂ (Gleichung (3)).

In den Sommermonaten ist daher die Globalstrahlung als Steuerungsgröße zu berücksichtigen, um auch bei Strahlungswetterlagen eine hohe Prognosegüte des Algorithmus zu gewährleisten.

5.1.5 Wechselwirkung unterschiedlicher Einflussfaktoren

Das komplexe Zusammenspiel der auf die Immissionssituation einwirkenden Einflussfaktoren Verkehr, Wind und Inversion soll im Folgenden anhand eines ausgewählten Beispiels erläutert werden. Hierzu zeigt die Abbildung 5.7 die meteorologischen Randbedingungen sowie die zeitlichen Verläufe der NO_x-Emissionen und NO₂-Immissionen im Zeitraum von Montag, den 11.09.2006 bis zum Freitag, den 16.09.2006.

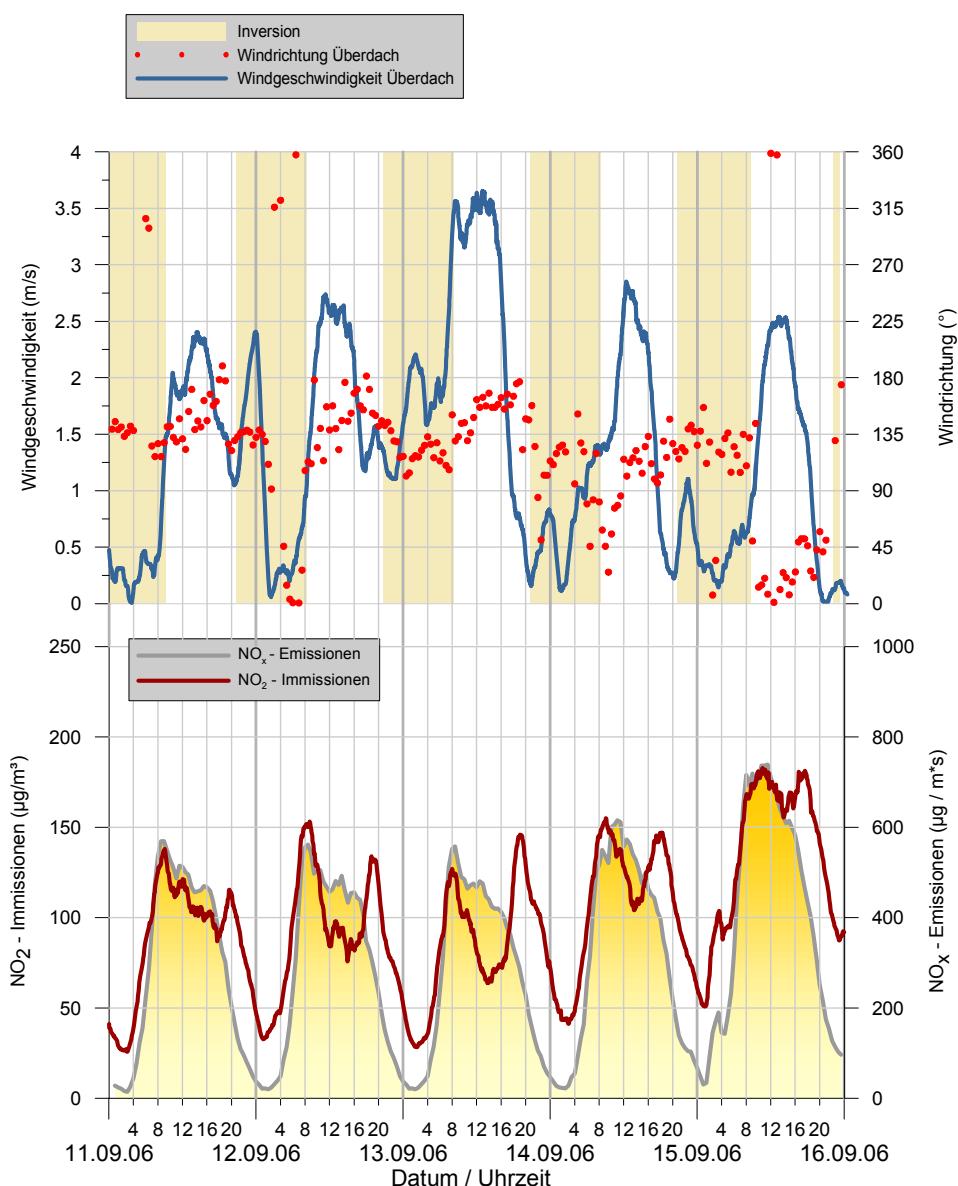


Abbildung 5.7: Zeitreihenanalyse - Wechselwirkungen der unterschiedlichen Einflussgrößen

Im ausgewählten Zeitraum lag eine Strahlungswetterlage mit ausgeprägtem Tagesgang der Temperatur und Windgeschwindigkeit vor. Im Laufe dieser Schönwetterperiode wurden an jedem Tag relativ hohe NO₂-Werte gemessen mit Maxima zwischen 140 µg/m³ und 180 µg/m³.

Die Verkehrsbelastung und die hieraus resultierende Emissionsentwicklung stellte sich an den ersten vier Tagen relativ ähnlich dar, lediglich am letzten Tag der untersuchten Periode wurden deutlich höhere Emissionen infolge eines höheren Schwerlastverkehrsaufkommens ermittelt. Auch die Tagesgänge der Immissionen weisen große Ähnlichkeiten auf. So wird von 04:00 Uhr bis 08:00 Uhr morgens eine stetige Zunahme der NO₂-Konzentration gemessen. Diese Zunahme ist relativ leicht mit den in Folge des einsetzenden Berufsverkehrs ebenfalls stark steigenden Emissionen zu erklären. Ab 08:00 Uhr jedoch kam es an allen Tagen zu einem unterschiedlich stark ausgeprägten Rückgang der Immissionen, der alleine durch die Emissionsentwicklung nicht zu erklären ist (siehe Abbildung 5.7, unten).

Der teilweise deutliche Rückgang der NO₂-Immissionen ist vielmehr auf die zeitgleiche Verbesserung der Austauschbedingungen nach der Auflösung der nächtlichen Bodeninversion zurückzuführen. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung und der damit einher gehenden Labilisierung der Atmosphäre kam es zudem zu einer deutlichen Auffrischung des Windes. Der stärkste Immissionsrückgang wurde dementsprechend am 13.09.2006 verzeichnet, an dem die höchsten Windgeschwindigkeiten auftraten.

Ab etwa 16:00 Uhr war an jedem Tag nochmals ein deutlicher Anstieg der Immissionen zu beobachten, der im Gegensatz zur Emissionsentwicklung steht. Es fällt auf, dass dieser Immissionsanstieg mit dem Beginn des Rückgangs der Windgeschwindigkeit infolge der sich wieder stabilisierenden Atmosphäre einsetzt. Nach dem Erreichen des Immissionsmaximums um etwa 20:00 Uhr nimmt die Schadstoffbelastung infolge der nun nur noch sehr geringen Emissionen rapide ab.

Eine Besonderheit stellt der NO₂-Tagesgang am 15.09.06 dar. Anders als an den vorherigen Tagen findet der morgendliche Rückgang der Immissionen trotz auflebenden Windes nur deutlich abgeschwächt statt. Die Immissionswerte stagnieren dabei auf extrem hohem Niveau. Eine Erklärung hierfür liefert der Windrichtungswechsel von den vorherrschenden südöstlichen Windrichtungen auf Nordost (vgl. Kapitel 5.1.2) sowie die höheren Emissionswerte.

5.1.6 Zusammenfassung

Aufbauend auf den vorgenommenen Analysen und Auswertungen konnten die wesentlichen Einflussgrößen, die in ihrem Zusammenspiel zu hohen NO₂-Immissionen am Märkischen Ring führen, ausgemacht werden. Diese sind:

- Emissionen des Straßenverkehrs
- Windverhältnisse (Windrichtung und Windgeschwindigkeit) im Überdachniveau
- Strahlungsintensität

Hohe NO₂-Immissionen traten im Untersuchungszeitraum nur bei einem entsprechenden Emissionspotenzial (werktags zwischen 06:00 und 22:00 Uhr) auf (vgl. Abbildung 5.2).

Bei den Windverhältnissen stellten sich erwartungsgemäß Wetterlagen mit geringen Windgeschwindigkeiten als problematisch heraus. Überraschend war hingegen die deutliche Abhängigkeit der NO₂-Konzentration von der jeweiligen Windrichtung. So wurden insbesondere bei Windrichtungen aus dem nördlichen Sektor hohe NO₂-Konzentrationen gemessen. Ursache hierfür ist wahrscheinlich der zusätzliche Schadstoffeintrag aus Richtung des sich unmittelbar nördlich angrenzenden Verkehrsknotenpunktes Emilienplatz. Bei Windrichtungen aus Süd und West stellten sich hingegen selbst bei geringen Windgeschwindigkeiten keine hohen NO₂-Belastungen ein (vgl. Abbildung 5.4).

Die Strahlung spielt nur in den Sommermonaten (April bis September) bei entsprechender Strahlungsintensität eine entscheidende Rolle und kann bei austauscharmen Wetterlagen die Belastungssituation noch zusätzlich verschärfen.

5.2 Steuerungsmodul

5.2.1 Konzeption

Aufbauend auf den Zusammenhängen zwischen Verkehrstagesgang, meteorologischen Randbedingungen und Luftschadstoff-Immissionen wurde die endgültige Version eines Programmes zur immissionsabhängigen Verkehrssteuerung entwickelt. Die Funktionsfähigkeit und die Prognosegenauigkeit dieses Programm wurde rückwirkend anhand der in einer Datenbank abgespeicherten Halbstundenmesswerte für die Zeiträume 01.09.2006 bis 14.02.2007 und 01.05.2007 bis 31.05.2007 überprüft, in denen am Märkischen Ring keine Verkehrssperrungen durchgeführt wurden.

Der potenzielle Sperrzeitraum wurde aufgrund der zeitlichen Verteilung des Auftretens von hohen NO₂-Werten (vgl. Abbildung 5.2) in den Monaten Oktober bis März auf Werkstage in der Zeit zwischen 06:00 und 20:00 Uhr und in den Monaten April bis September auf Werkstage in der Zeit zwischen 06:00 und 22:00 Uhr beschränkt.

Die fortlaufende Überprüfung, ob innerhalb des potenziellen Sperrzeitraums eine Sperrung ausgelöst wird, erfolgte halbstündlich auf Grundlage der Messwerte der vergangenen halben Stunde.

Als meteorologische Steuerparameter wurden die Windrichtung und Windgeschwindigkeit der Station Finanzamt sowie die Strahlung an der Station Eugen-Richter Turm in den Steuerungsalgorithmus integriert.

Eine zusätzliche Berücksichtigung der atmosphärischen Schichtung mittels der Temperaturdifferenz zwischen Eugen-Richter Turm und Finanzamt führt zu keiner weiteren Verbesserung des Steuerungsalgorithmus, da das Auftreten

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

von Inversionen in der Regel mit niedrigen Windgeschwindigkeiten verbunden ist. Um den Steuerungsalgorithmus möglichst einfach zu halten, wurde daher auf einen Inversionsparameter verzichtet.

Zusätzlich wurden Immissionsdaten der LANUV Verkehrsstation Graf von Galen Ring herangezogen. Sehr hohe NO₂-Immissionen dieser Station lösen unabhängig von den anderen Kriterien eine Sperrung am Märkischen Ring aus.

Das Sperrkriterium „NO₂-Immissionen am Graf-von-Galen-Ring > 180 µg/m³“ kommt allerdings nur extrem selten zum Einsatz und ist eher als Sicherung im Fall eines Ausfalles der Meteorologiemesung anzusehen. Die Gesamtsteuerqualität wird durch dieses Kriterium nur unwesentlich beeinflusst.

Immissionswerte der Station am Märkischen Ring fließen nicht in den Steuerungsalgorithmus mit ein und werden im Folgenden lediglich zur Qualitätsüberprüfung genutzt.

Die nachfolgende Tabelle stellt die Steuerungsbedingungen zur zeitlich befristeten Sperrung des Märkischen Rings für den Schwerlastverkehr dar, die aus den detaillierten Datenanalysen und zahlreichen Testläufen abgeleitet wurden.

Zur Auslösung der Sperrung reicht es aus, dass eine der in der Tabelle 5.1 aufgeführten Bedingungen erfüllt ist.

Tabelle 5.1: Kriterien zur Aktivierung des Lkw-Durchfahrverbotes

Bedingungsnummer	Windrichtung (° gegen Nord)	Windgeschwindigkeit (m/s)	Globalstrahlung (W/m ²)	NO ₂ -Immissionen GvG (µg/m ³)
1	0 bis 65	< 4,0		
2	90 bis 170	< 1,5		
3	300 bis 360	< 3,0		
4	0 bis 170 oder 300 bis 360	< 3,5	> 400	
5				> 180

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Unter Berücksichtigung der oben angegebenen Steuerparameter wurden mit folgenden zeitlichen Steuerbedingungen die besten Ergebnisse erzielt:

Eine Steuerung des Schwerlastverkehrs kann lediglich an Werktagen in der Zeit von 06:00 Uhr bis 20:00 Uhr (im Sommerhalbjahr bis 22:00 Uhr) erfolgen.

Wird während der potenziellen Steuerungszeiten eines der in der Tabelle 5.1 genannten Sperrkriterien erkannt, so wird zunächst eine mindestens dreistündige Sperrung ausgelöst.

Innerhalb der dreistündigen Sperrung werden weiterhin halbstündlich Messdaten ausgewertet. Erfolgt in dieser Zeit keine Verbesserung der Austauschbedingungen (d.h. mindestens eins der Sperrkriterien wird weiterhin erfüllt), wird die Sperrzeit automatisch um 1,5 Stunden vom Zeitpunkt der Überschreitung des Sperrkriteriums verlängert. Beispiel: Um 06:00 Uhr wird eine Sperrung ausgelöst, sie dauert zunächst bis 09:00 Uhr. Um 08:00 Uhr herrschen wieder, bzw. immer noch Bedingungen, die eine Sperrung auslösen würden. Die Mindestsperrzeit wird daher bis 09:30 Uhr verlängert.

Diese Regelung hat zur Folge, dass an Tagen mit gleichbleibend schlechten Austauschbedingungen die Sperrzeit permanent verlängert wird. Im Extremfall bleibt der Märkische Ring somit in der Zeit von 06:00 Uhr bis 20:00 Uhr (im Sommer bis 22:00 Uhr) für SNFZ geschlossen.

Eine neue Sperrung muss mindestens zwei Stunden vor Ende des potenziellen Sperrzeitraums ausgelöst werden. Wird also im Winter um 19:30 Uhr ein Sperrkriterium erfüllt, bleibt der Märkische Ring für den Schwerlastverkehr geöffnet. Eine neue Sperrung kann demnach nur bis 18:00 Uhr (im Sommer bis 20:00 Uhr) erfolgen.

5.2.2 Beurteilung und qualitativer Vergleich im fiktiven Betrieb

Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung erfolgte durch einen Vergleich mit drei anderen Steuerungskonzepten, von denen die statische Steuerung I im Zeitraum vom 15.02.2007 bis 30.04.2007 am Märkischen Ring praktische Anwendung fand.

Folgende Steuerungskonzepte wurden neben der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung untersucht:

Statische Steuerung I: Eine Sperrung des Märkischen Rings für SNfz wird werktags jeden Morgen in der Zeit von 06:00 Uhr bis 10:00 Uhr ausgelöst. An Wochenenden und Feiertagen wird nicht gesteuert.

Statische Steuerung II: Eine Sperrung des Märkischen Rings für den Schwerlastverkehr wird werktags jeden Morgen in der Zeit von 06:00 Uhr bis 10:00 Uhr sowie nachmittags zwischen 15:00 Uhr bis 19:00 Uhr ausgelöst. An Wochenenden und Feiertagen wird nicht gesteuert.

Komplettsperrung: Der Märkische Ring wird komplett (also auch an Wochenenden und Feiertagen sowie nachts) für Schwerlastverkehre gesperrt.

Die Komplettsperrung ist hierbei nur als theoretische Lösung zu verstehen, die zeigt, welche maximalen Immissionsminderungen durch Lkw-Sperrungen am Märkischen Ring zu erreichen sind.

Für den Zeitraum vom 01.09.2006 bis 14.02.2007 und 01.05.2007 bis 31.05.2007 wurden rückwirkend die unterschiedlichen Steuerungskonzepte simuliert. Die folgende Tabelle listet unterschiedliche, zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Steuerungskonzepte relevante Kenngrößen auf.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Tabelle 5.2: Kenngrößen der unterschiedlichen Sperrkonzepte

Untersuchungszeitraum: 01.09.2006 bis 14.02.2007 und 01.05.2007 bis 31.05.2007

Bewertungsgröße	Dynamische Steuerung	Statische Steuerung I (6-10 Uhr)	Statische Steuerung II (6-10 u 15-19 Uhr)	Komplett-sperrung
Sperrdauer gesamt (h)	498	532	1064	4.752
Anteil v. Sperrungen am Gesamtzeitraum (%)	10,5	11,2	22,4	100,0
Anzahl der Sperrungen	82	134	268	1
Tage mit Sperrungen	63	134	134	198
Mittlere Sperrdauer (h)	6	4	4	4.752
Anteil erkannter NO ₂ -Werte > 200 µg/m ³ (%)	94	35	76	100
Anteil erkannter NO ₂ -Werte > 180 µg/m ³ (%)	88	36	70	100
Anteil erkannter NO ₂ -Werte > 160 µg/m ³ (%)	85	35	65	100
NO ₂ -Mittelwert während Sperrung (µg/m ³)	136	95	95	68
PM ₁₀ -Mittelwert während Sperrung (µg/m ³)	72	47	46	33

Ein Vergleich der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung mit den statischen Steuerungen I und II zeigt, dass

- die Gesamtsperrdauer der dynamischen Steuerung und der statischen Steuerung I während des Untersuchungszeitraumes in etwa gleich lang ist,
- die Anzahl der Sperrungen sowie die Anzahl der Tage mit Sperrungen bei der dynamischen Steuerung am geringsten sind,
- dementsprechend die mittlere Sperrdauer bei der dynamischen Steuerung länger ist als bei der statischen Steuerung I und II.

Als Qualitätsmerkmal der unterschiedlichen Steuerungskonzepte wurde zunächst bestimmt, wie viele der NO₂-Grenzwertüberschreitungen innerhalb der Sperrzeiten lagen und somit im realen Betrieb unter Umständen hätten verhindert werden können. Hier erzielt die dynamische Steuerung im Vergleich mit der statischen Steuerung I trotz der etwa gleich langen Sperrdauer mit 94% gegenüber 35% die deutlich besseren Ergebnisse. Selbst mit einer Verdoppelung der Sperrdauer (statische Steuerung II) werden nur 76% der Grenzwertüberschreitungen getroffen.

Ähnliche Ergebnisse werden für das Erkennen hoher NO₂-Werte (>180 µg/m³ bzw. >160 µg/m³) erzielt.

Als zusätzliches Qualitätsmerkmal wurde der Mittelwert der NO₂- und PM₁₀-Konzentrationen während der Sperrzeiten bestimmt. Je höher dieser Wert ist, umso effektiver können sowohl hohe Schadstoffkonzentrationen aber auch Mittelwerte gesenkt werden. Auch hier erzielt die dynamische Steuerung die besten Ergebnisse, so liegt der NO₂-Mittelwert mit 136 µg/m³ deutlich über den Mittelwerten der statischen Steuerkonzepte (95 µg/m³).

Auch für PM₁₀ lag der Mittelwert in den Sperrzeiten der dynamischen Steuerung mit 72 µg/m³ deutlich höher als bei den statischen Steuerkonzepten (47 µg/m³ bzw. 46 µg/m³).

Diese überzeugenden Ergebnisse werden auch durch die Abbildung 5.8 dokumentiert. In dieser Abbildung werden für ausgewählte Zeiträume die NO₂-Zeitreihen am Märkischen Ring und am Ferdinand David Park sowie die Sperrzeiten dargestellt. Eine Sperrung sollte nach Möglichkeit ausgelöst werden, wenn hohe NO₂-Werte (insbesondere > 200 µg/m³) gemessen werden. Zusätzlich werden mit grauen Balken die PM₁₀-Überschreitungstage gekennzeichnet.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

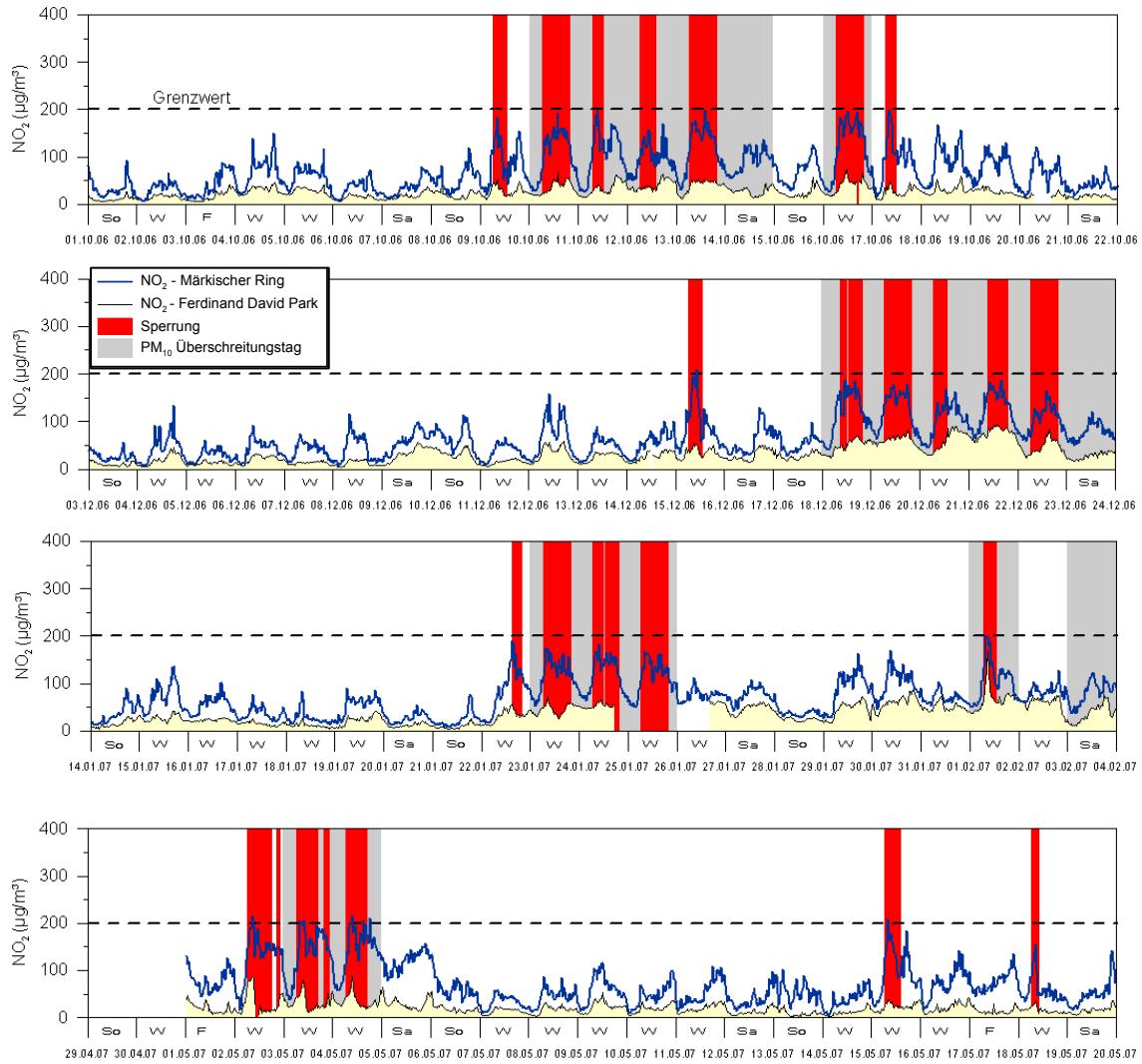


Abbildung 5.8: Fiktiver Betrieb der dynamischen Steuerung für exemplarische Zeiträume

Die grafische Analyse der Aktivierungszeiten zeigt, dass mit der dynamischen Steuerung die überwiegende Zahl der Schadstoff-„Peaks“ erkannt werden. Insbesondere Episoden mit anhaltend hohen Schadstoffkonzentrationen (z.B. vom 18.12.06 bis 22.12.06, oder 09.10.06 bis 13.10.06) werden sehr zuverlässig prognostiziert. Während dieser Episoden wird die Sperrung oftmals den ganzen Tag aufrecht erhalten. Somit wird eine optimale Minderungswirkung erzielt.

Die Abbildung 5.8 veranschaulicht auch, dass ein Großteil der kritischen PM₁₀-Tagesmittelwerte über die Steuerung erfasst wird. Ausnahmen hiervon beschränken sich zumeist auf Wochenenden.

5.2.3 Immissionsminderungspotenzial

5.2.3.1 Methodik zur Bestimmung des Minderungspotenzials

Nachfolgend soll für alle genannten Sperrkonzepte das jeweilige Minderungspotenzial basierend auf den Zeiträumen vom 01.09.2006 bis 14.02.2007 und 01.05.2007 bis 31.05.2007 bestimmt werden. Da die Minderungswirkung der Maßnahmen in erheblichem Maß von der Befolgsrate der Sperrung durch die LKW-Fahrer abhängt, wurden diese Berechnungen mit unterschiedlichen LKW-Reduktionsfaktoren durchgeführt.

Zur Berechnung des Minderungspotenzials für die Komponente NO₂ wurde zunächst für jeden Halbstundenwert aus der Differenz der zeitgleich erfassten Immissionswerte am Märkischen Ring (MR) und am Ferdinand David Park (FDP) die NO₂- und NO_x-Zusatzbelastung des Verkehrs am Märkischen Ring bestimmt, da nur dieser Anteil der Gesamtbelastung durch eine Lkw-Sperrung gemindert werden kann:

$$\text{NO}_2 \text{ Zusatz} = \text{NO}_2 \text{ MR} - \text{NO}_2 \text{ FDP} \quad (1)$$

$$\text{NO}_x \text{ Zusatz} = \text{NO}_x \text{ MR} - \text{NO}_x \text{ FDP} \quad (2)$$

Weiterhin wurde angenommen, dass die Halbstundenwerte der gemessenen verkehrsbedingten Zusatzimmissionen am Märkischen Ring und die zeitgleich auf der Grundlage der Verkehrsdaten errechneten Emissionsraten des Straßenverkehrs proportional sind. Da die Verkehrszählung am Märkischen Ring SNfz gesondert erfasst, kann der Anteil des Schwerlastverkehrs f_Q an den NO_x-Gesamtemissionen Q_{Gesamt} bestimmt werden:

$$f_Q(\text{NO}_x) = Q_{\text{SNfz}}(\text{NO}_x) / Q_{\text{Gesamt}}(\text{NO}_x) \quad (3)$$

Aufgrund luftchemischer Prozesse, die nach der NO_x-Emission das hauptsächlich freigesetzte NO teilweise zu NO₂ umwandeln, kann aus der Reduktion der NO_x-Emissionen nicht direkt auf die NO₂-Immissionen geschlossen werden. Hierzu muss zunächst das NO₂ / NO_x-Verhältnis bestimmt werden. Die Abbildung 5.9 stellt in Form eines Streudiagramms alle NO₂- und NO_x-Messwerte am Märkischen Ring im Zeitraum vom 01.09.2006 bis 31.08.2007 mit der entsprechenden Regressionskurve dar.

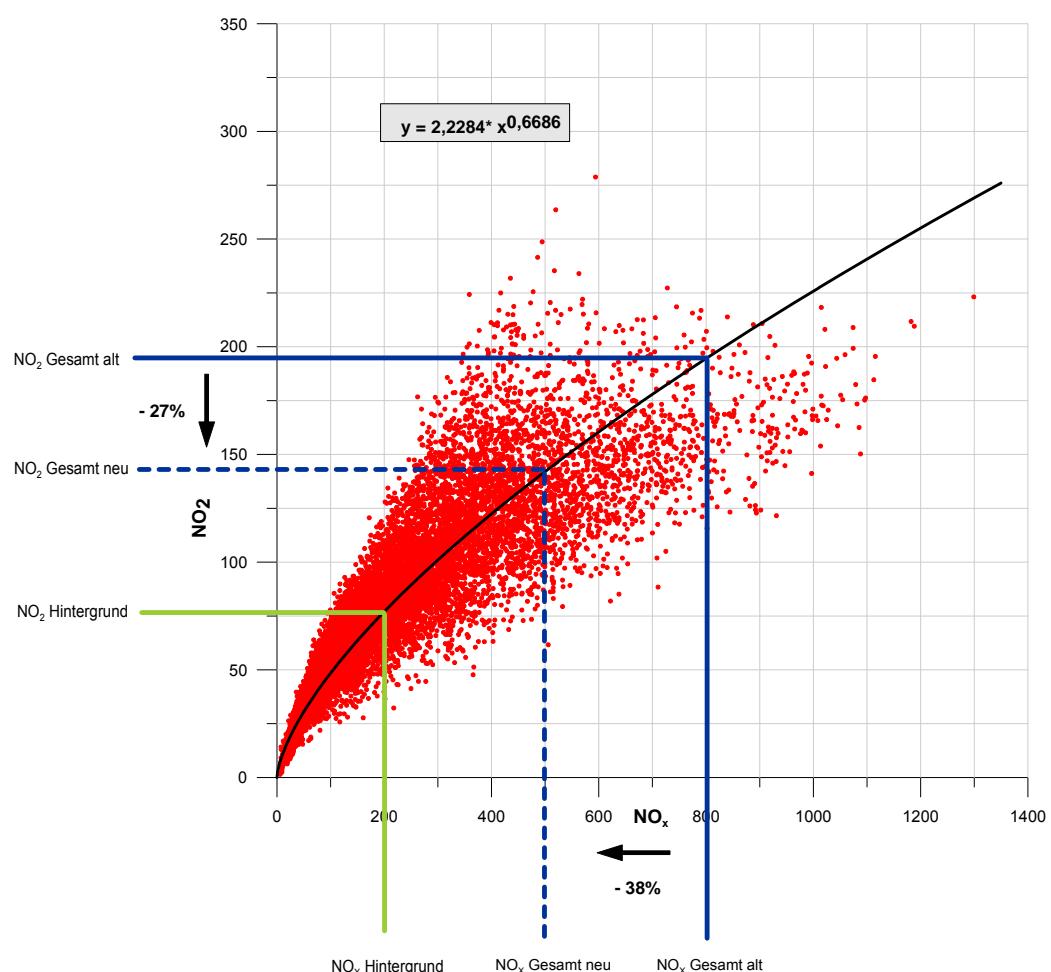


Abbildung 5.9: „Scatter“-Plot NO₂ gegen NO_x mit zugehöriger Regressionskurve
Beispiel zur Bestimmung der NO₂-Minderung durch LKW-Sperrung (siehe Text)

Der funktionale Zusammenhang zwischen NO_x und NO₂ am Märkischen Ring kann über die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$NO_{2\text{ MR}} = 2,2284 \cdot NO_{x\text{ MR}}^{0,6686} \quad (4)$$

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Auf Grundlage des Anteils der SNfz an den NO_x-Gesamtemissionen sowie einem angenommenen Reduktionsfaktor des Schwerlastverkehrs r_{SNfz} (1 = alle SNfz beachten das Durchfahrerbot, 0 = kein SNfz beachtet das Durchfahrerbot) kann die neue NO_x-Gesamtmission, die sich für den Fall einer LKW-Sperrung am Märkischen Ring ergibt, berechnet werden:

$$NO_{x\ MRneu} = NO_{x\ FDP} + NO_{x\ Zusatz} - NO_{x\ Zusatz} \cdot f_Q(NO_x) \cdot r_{SNfz} \quad (5)$$

Die gemessenen und die neu berechnete NO_x-Gesamtmissionen können dann in Gleichung (4) eingesetzt werden. Aus den Ergebnissen der beiden Rechnungen kann nun das Verhältnis der NO₂-Immissionen mit und ohne Sperrung f_{NO_2} gebildet werden. Der neue NO₂-Gesamtwert der konkreten halben Stunde wird dann über die folgende Gleichung ermittelt:

$$NO_{2\ MRneu} = NO_{2\ MRalt} \cdot f_{NO_2} \quad (6)$$

Die vorgenommenen Berechnungen verdeutlicht beispielhaft die Abbildung 5.9. Eine Reduktion der NO_x-Emissionen (und dementsprechend auch der NO_x-Zusatzmissionen) um 50 % führt zu einem Rückgang der NO_x-Zusatzmissionen von 600 µg/m³ auf 300 µg/m³. Dies entspricht einem Rückgang der Gesamtmissionen um 38 %. Nach der Regressionsfunktion (4) ergibt sich hieraus für die NO₂-Zusatzmission eine Reduktion von 45 %. Die NO₂-Gesamtmission kann um 27% gesenkt werden.

Der betreffende, für den Fall ohne Sperrung gemessene NO₂-Halbstundenmittelwert würde somit mit dem Faktor 0,73 auf den Fall mit Sperrung umgerechnet.

Die Minderungsberechnung für PM₁₀ und PM_{2,5} gestaltet sich einfacher, da sich hier die Emissionsreduktionen direkt proportional in Minderungen der Immissionszusatzbelastung auswirken. Zur Berechnung der PM₁₀-Minderung sind folgende Schritte notwendig:

$$PM_{10\ Zusatz} = PM_{10\ MR} - PM_{10\ FDP} \quad (7)$$

$$f_Q(PM_{10}) = Q_{SNfz}(PM_{10}) / Q_{Gesamt}(PM_{10}) \quad (8)$$

$$PM_{10\ neu} = PM_{10\ FDP} + PM_{10\ Zusatz} - PM_{10\ Zusatz} \cdot f_Q(PM_{10}) \cdot r_{SNfz} \quad (9)$$

Für PM_{2,5} gelten dieselben Zusammenhänge. Die genaue Berechnung des Minderungspotenzials erfolgt unter Berücksichtigung der in Kapitel 4.2 beschriebenen Methodik zur Bestimmung der PM_{2,5}-Emissionsraten.

5.2.3.2 Ergebnisse zum Minderungspotenzial

Mit der vorgestellten Vorgehensweise wurden die NO₂-, PM₁₀- und PM_{2,5}-Messwerte während der Sperrzeiten für alle vier Steuerungsszenarien mit unterschiedlichen LKW-Reduktionsfaktoren neu berechnet. Messwerte außerhalb der Sperrzeiten blieben unverändert. Anschließend wurden die bezüglich der 22. BImSchV relevanten Kenngrößen für den Untersuchungszeitraum neu ermittelt.

Die Abbildung 5.10 stellt die neu berechneten NO₂-Mittelwerte dar.

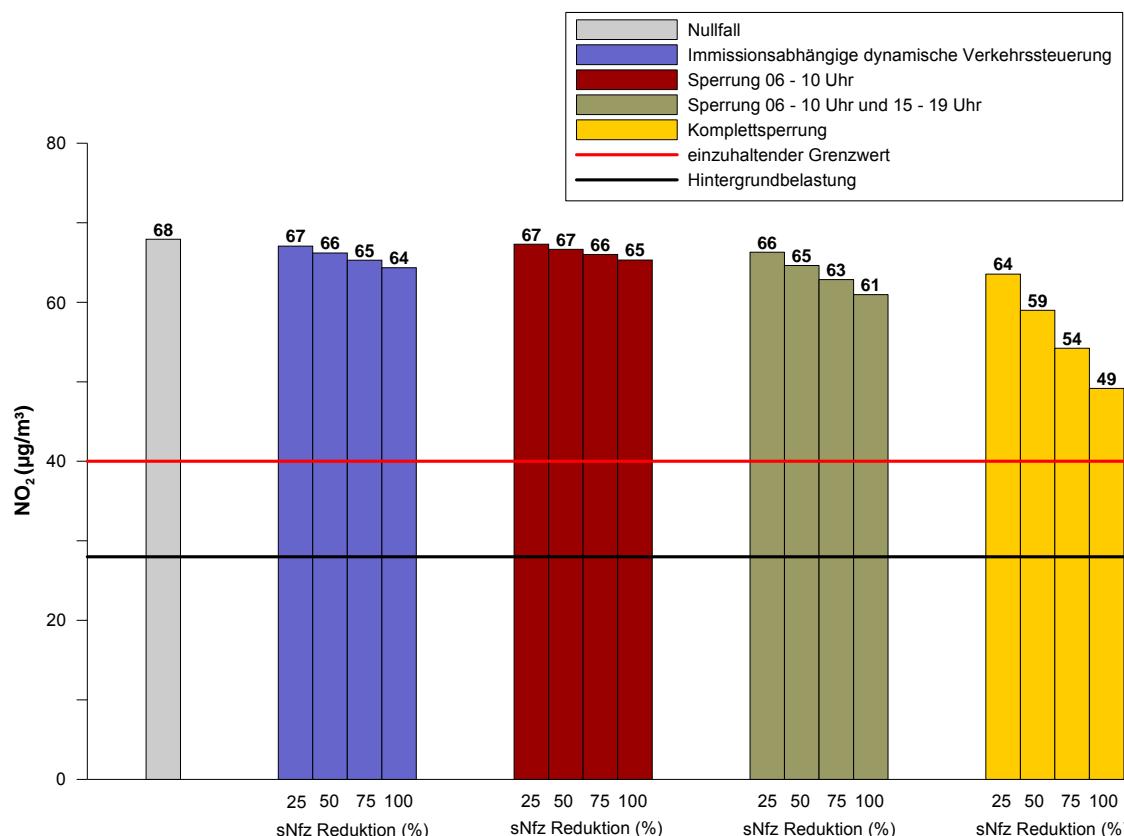


Abbildung 5.10: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf den NO₂-Mittelwert
Zeitraum: 01.09.2006 – 14.02.2007 und 01.05.2007 – 31.05.2007

Es wird deutlich, dass selbst mit einer zu 100% umgesetzten Komplettsperrung des Märkischen Rings für LKW der NO₂-Jahresmittelgrenzwert von 40 µg/m³ wahrscheinlich nicht erreicht werden kann. Mit der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung kann der Jahresmittelwert maximal um 6% gesenkt werden. Etwas schlechtere Ergebnisse erzielt die statische Steuerung I. Die statische Steuerung II führt hier zu besseren Ergebnissen - bei allerdings wesentlich längerer Sperrdauer.

Ein deutlich höheres Minderungspotenzial besteht bei der Überschreitungshäufigkeit des NO₂-Stundengrenzwertes (vgl. Abbildung 5.11). Hier erreicht die dynamische Steuerung bei einer vollständigen Einhaltung des Durchfahrverbots eine Reduktion der Überschreitungsstunden von 10 auf eine Stunde. Mit der statischen Steuerung II wird aufgrund der doppelt so langen Sperrdauer ebenfalls eine Reduktion auf eine Überschreitungsstunde erzielt.

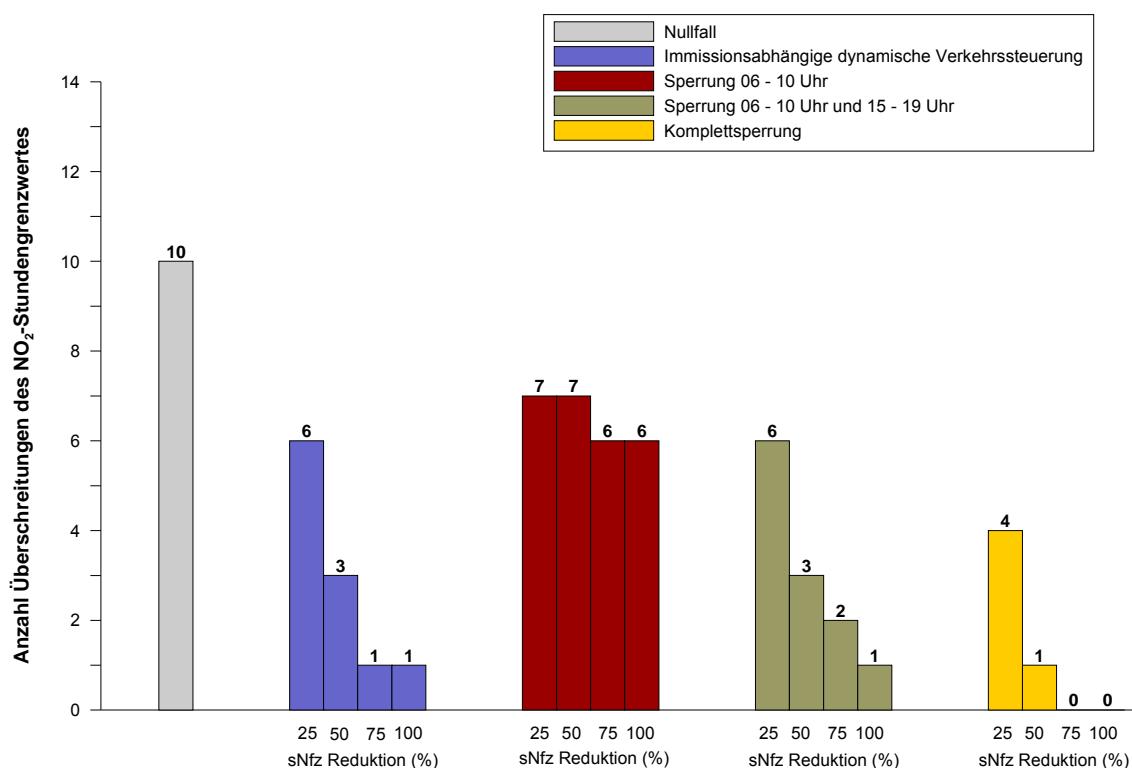


Abbildung 5.11: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf die Überschreitungshäufigkeit des NO₂ - Stundengrenzwertes
Zeitraum: 01.09.2006 – 14.02.2007 und 01.05.2007 – 31.05.2007

Wie die Immissionsmessungen am Märkischen Ring gezeigt haben (vgl. Kapitel 3.3.3.1), wird der NO₂-Stundengrenzwert am Märkischen Ring nicht eingehalten. Der Reduktion der Überschreitungsstunden durch geeignete Maßnahmen muss demnach eine hohe Priorität eingeräumt werden. Insgesamt zeigt sich, dass temporäre LKW-Sperrungen am Märkischen Ring ein geeignetes Mittel sein können, um den Grenzwert zur Überschreitungshäufigkeit des Stundengrenzwertes für NO₂ einzuhalten. Die Entlastungswirkungen auf den PM₁₀-Jahresmittelwert und die Überschreitungshäufigkeit des Tagesgrenzwertes verdeutlichen die Abbildung 5.12 und die Abbildung 5.13.

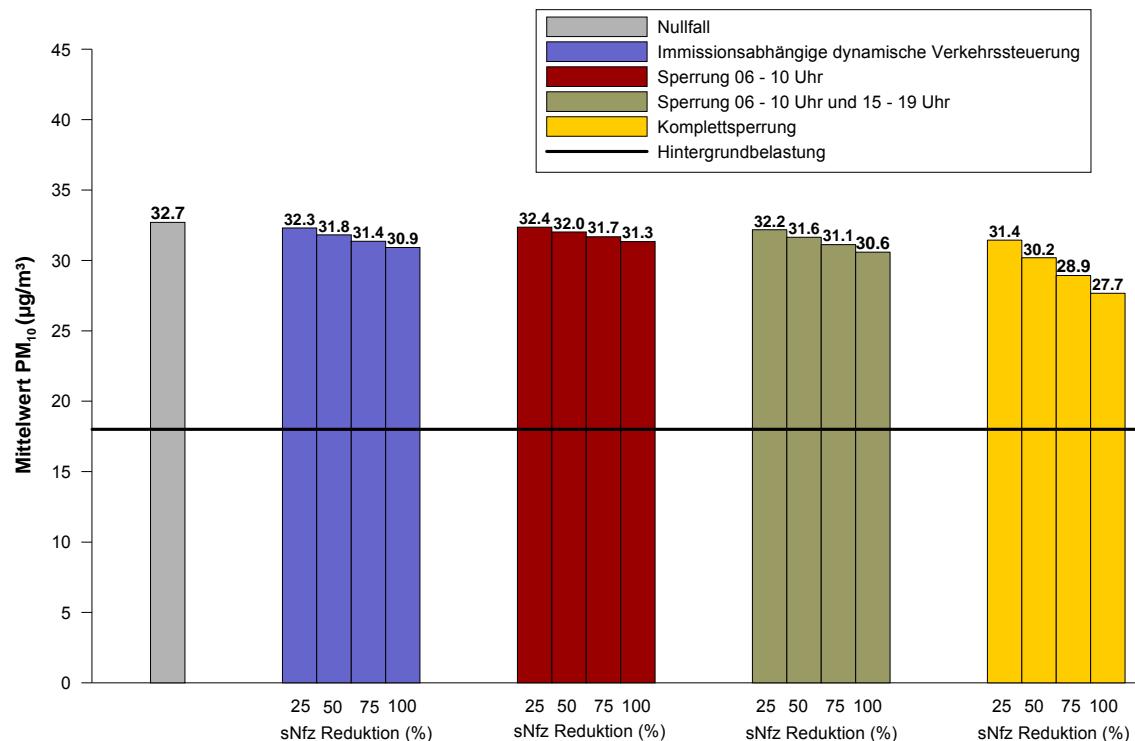


Abbildung 5.12: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf den PM₁₀-Mittelwert
Zeitraum: 01.09.2006 – 14.02.2007 und 01.05.2007 – 31.05.2007

Bei PM_{10} ist insbesondere die Reduktion der Überschreitungstage von Interesse, da der PM_{10} -Mittelwert am Märkischen Ring deutlich unter dem Grenzwert von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liegt, während die Anzahl der Überschreitungstage im Messjahr mit 59 Tagen deutlich über den erlaubten 35 Tagen lag (vgl. Kapitel 3.3.3.2).. Hier zeigt die dynamische Steuerung eine deutlich bessere Wirkung als die statischen Steuerungskonzepte. Aufgrund der ermittelten Emissionsminderungen kann maximal eine Reduktion von 38 auf 28 Überschreitungstage erreicht werden.

Bei den statischen Steuerungskonzepten wird auch bei 100%-iger Befolgung des Durchfahrerverbotes lediglich eine Reduktion auf 33 bzw. 32 Überschreitungstage prognostiziert.

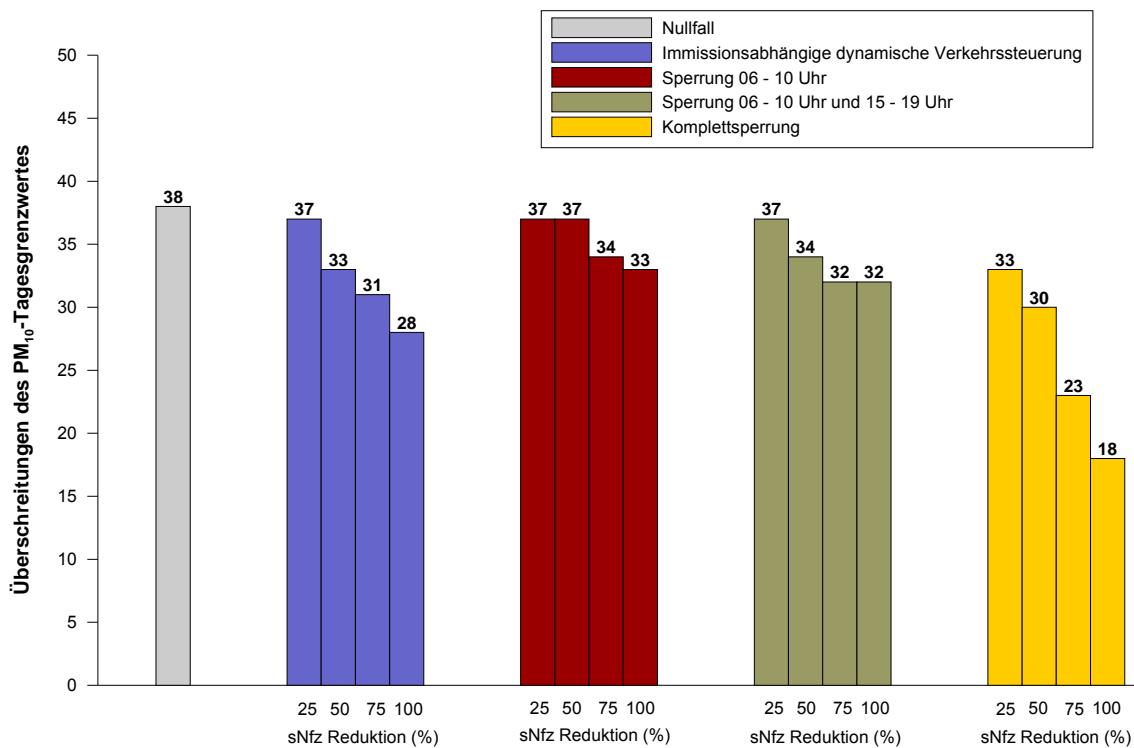


Abbildung 5.13: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf die Häufigkeit von PM_{10} -Tagesmittelwerten $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Zeitraum: 01.09.2006 – 14.02.2007 und 01.05.2007 – 31.05.2007

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Die unterschiedlichen Minderungswirkungen der Steuerungskonzepte für den PM_{2,5}-Jahresmittelwert sind in der Abbildung 5.14 dargestellt.

Es gelten im wesentlichen dieselben Aussagen wie auch beim PM₁₀-Mittelwert. Mit der dynamischen Lenkung lässt sich das PM_{2,5}-Mittel um ca. 1 µg/m³ reduzieren, wenn die Befolgsraten mehr als 50% betragen. Dies entspricht ca. 10% bis 20% der verkehrsbedingten Zusatzbelastung.

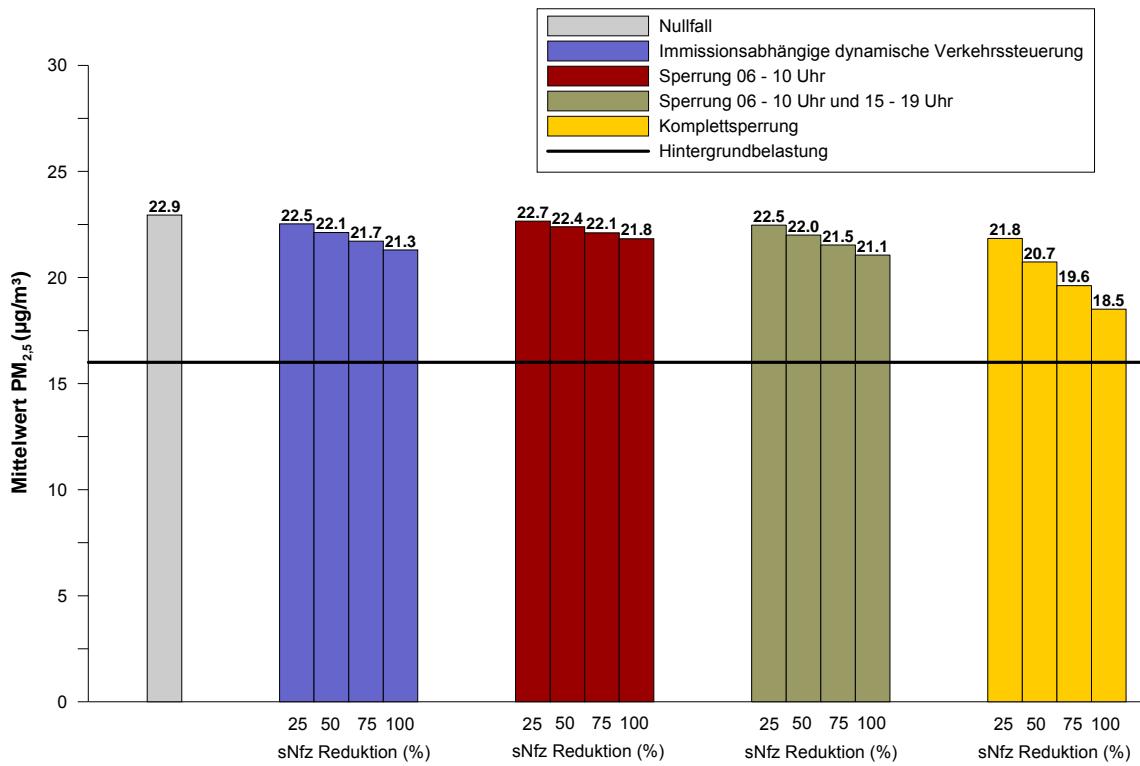


Abbildung 5.14: Auswirkung der unterschiedlichen Steuerungsarten auf den PM_{2,5}-Mittelwert
Zeitraum: 01.09.2006 – 14.02.2007 und 01.05.2007 – 31.05.2007

5.3 Rückschlüsse

Zusammenfassend lassen sich folgende Rückschlüsse ziehen:

- Die immissionsmindernde Wirkung zeitlich begrenzter Sperrungen ist erwartungsgemäß für die Jahresmittelwerte (NO₂, PM_{2,5} und PM₁₀) geringer als für PM₁₀-Tagesmittelwerte und für NO₂-Stundenmittelwerte.
- Die immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung liefert bei der Reduktion der Überschreitungen der PM₁₀-Tagesmittelwerte und für NO₂-Stundenmittelwerte die besten Ergebnisse, auch im Hinblick auf die im Vergleich zur statischen Steuerung II deutlich geringere Sperrdauer. Die Umsetzung der dynamischen Steuerung ist daher die sinnvollste Methodik zur Immissionsminderung.

- Die immissionsmindernde Wirkung zeitlich begrenzter Sperrungen des Schwerlastverkehrs hängt in starkem Maße von deren Akzeptanz durch die LKW-Fahrer sowie von der Kontrolle des Durchfahrverbots ab. Deutliche Immissionsreduzierungen sind erst zu erwarten, wenn mehr als 50 % der LKW-Fahrer das Durchfahrverbot befolgen.
- In ihrer ursprünglichen Zielsetzung sollte die immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung hohe NO₂-Immissionen wirksam mindern.
- Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde gezeigt, dass eine auf die Erkennung und „Bekämpfung“ hoher NO₂-Immissionen ausgerichtete Steuerungsstrategie automatisch auch einen wichtigen Beitrag zur Minderung der PM₁₀-Tagesmittelwerte leisten kann.
- Die Höhe der lokalen Feinstaub-Immissionen durch den Straßenverkehr wird mit Ausnahme der Globalstrahlung (Photochemie) im wesentlichen von denselben Einflussfaktoren (Verkehrsaufkommen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit) bestimmt wie die NO₂-Immissionen.
- Mit der Erkennung von hohen NO₂-Immissionen und hierdurch ausgelösten LKW-Sperrungen werden somit automatisch hohe PM₁₀- und PM_{2,5}- Immissionen des lokalen Straßenverkehrs erkannt und effektiv gemindert (vgl. auch Abbildung 5.8).
- Die Steuerung im Hinblick auf Feinstaub auf Samstage und Sonn- und Feiertage zeitlich zu erweitern, wird wegen des dann erheblich geringeren Beitrages des Schwerlastverkehrs an der Gesamtfeinstaubbelastung wenig Wirkung zeigen und sollte daher unterbleiben.

6 Ergebnisse

6.1 LKW-Sperrung im Betrieb

6.1.1 Statische Steuerung

Im Zeitraum vom 15.02.2007 bis zum 30.03.2007 wurde am Märkischen Ring ein statisches Steuerkonzept getestet. Hierzu wurde an Werktagen zwischen 06:00 und 10:00 Uhr mithilfe der dynamischen Verkehrsbeschilderung der Straßenabschnitt für den LKW-Verkehr gesperrt.

Diese Phase diente insbesondere zur ersten Erprobung der dynamischen Beschilderung und zu Vergleichszwecken zur dynamischen Verkehrslenkung.

6.1.2 Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung I

In der Zeit vom 01.04.2007 bis zum 30.04.2007 wurde in einer ersten Testphase die immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung in Betrieb genommen.

Zur Steuerung der dynamischen Verkehrsbeschilderung wurde das Steuerungsprogramm **simDriVe** vom Ingenieurbüro simuPLAN entwickelt und auf einem Rechner der Hagener Stadtverwaltung installiert. Während des Betriebs wurden kontinuierlich die zur Steuerung benötigten Daten (Meteorologie und Immissionswerte der Station Graf-von-Galen Ring) auf diesen Rechner übertragen, aufbereitet und halbstündlich ausgewertet. Wurde auf der Grundlage des in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Steuerungsalgorithmus eine immissionsseitig kritische Situation prognostiziert, erfolgte eine manuelle Weitergabe des Steuersignals an den Verkehrsleitrechner.

Wenn die Messdaten eine Verbesserung der lufthygienischen Randbedingungen erwarten ließen, wurde durch **simDriVe** die Aufhebung der Sperrung veranlasst.

Eine direkte Übertragung des Steuerungssignals an den Verkehrsleitrechner konnte aufgrund einer fehlenden Schnittstelle des Verkehrsleitrechners leider nicht bewerkstelligt werden.

Zur Kontrolle sowie zur späteren Analyse der vorgenommenen Sperrungen wurden alle Eingangsdaten sowie die Informationen zum Steuerstatus archiviert und in Excel-Dateien abgespeichert.

Das Ablaufschema des Steuerungsprogramms **simDriVe** ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:

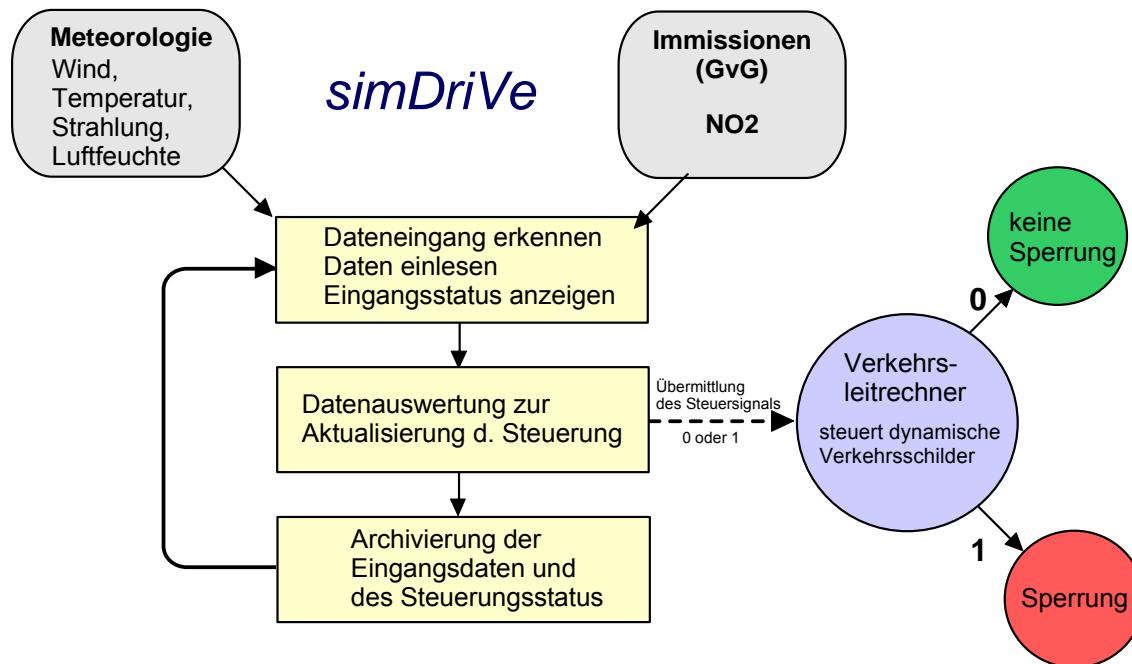


Abbildung 6.1: Aufbau des Programms zur dynamischen Verkehrslenkung

Da zum Zeitpunkt der ersten dynamischen Verkehrslenkung die Datenschnittstelle zur Messstation Eugen-Richter Turm noch nicht eingerichtet war, musste hierbei auf die Einbeziehung des Steuerparameters Strahlung (vgl. Kap. 5.2.1) verzichtet werden.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Als Steuerungsgrundlage dienten somit Winddaten der Überdach – Messstation Finanzamt sowie Immissionsdaten der Immissions-Messstelle Graf-von-Galen Ring.

Die vorgenommenen LKW-Sperrungen am Märkischen Ring sind der Abbildung 6.2 zu entnehmen. Aufgrund der im April 2007 vorherrschenden Strahlungswetterlagen mit austauscharmen Bedingungen wurde der Märkische Ring an fast jedem Tag zumindest kurzzeitig für den Schwerlastverkehr gesperrt.

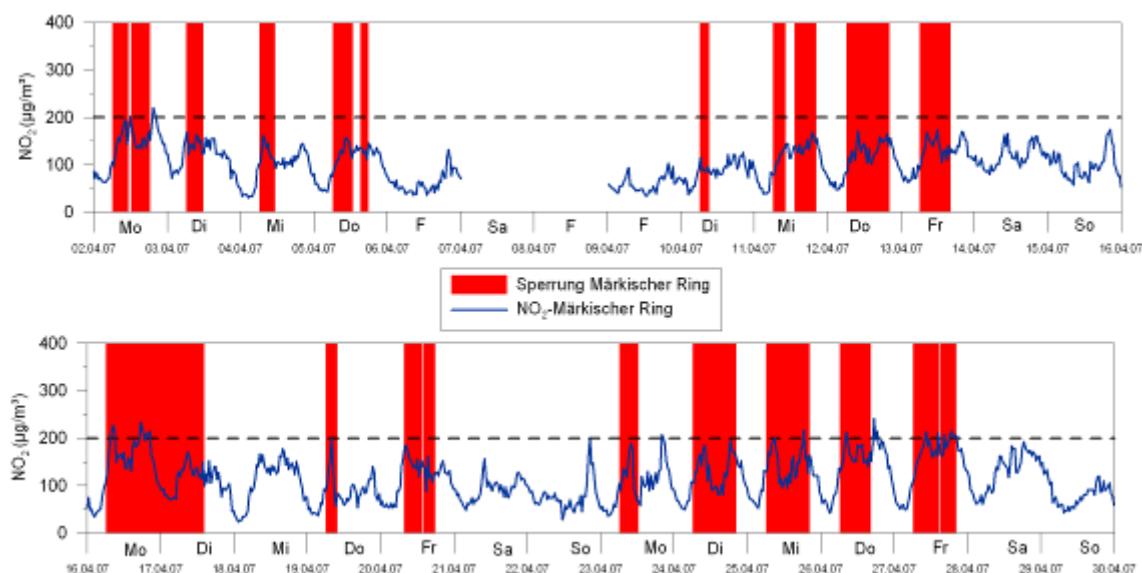


Abbildung 6.2: Sperrzeiten der dynamischen immissionsabhängigen Steuerung I

Ein Problem ergab sich aus der manuellen Weitergabe des Steuersignals an den Verkehrsleitrechner. Diese Vorgehensweise hatte zum Teil fehlerhafte Sperrungen zufolge. So blieb der Märkische Ring in der Nacht vom 16.04. auf den 17.04. gesperrt, an anderen Tagen (24.04.07 und 25.04.07) wurde die mittägliche Aufhebung der Sperrung von *simDRIVE* nicht an den Verkehrsleitrechner weitergegeben.

6.1.3 Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung II

In der Zeit vom 01.06.200 bis zum 31.08.2007 wurde die zweite Phase der dynamischen LKW-Verkehrslenkung in Betrieb genommen.

Gegenüber der ersten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrslenkung wurden zwei Neuerungen in den Programmablauf eingeführt. So konnte die Übertragung des Steuersignals an den Verkehrsleitrechner mittels eines automatischen Faxversandes optimiert werden, so dass nach einer ersten Phase der Programmumstellung keine nennenswerten Fehlsteuerungen mehr vorkamen. Zudem stand ab dem 01.06.2007 die Datenschnittstelle zur Meteorologiestation Eugen-Richter Turm zur Verfügung, so dass die Globalstrahlung als weiterer Steuerparameter in den Steuerungsalgorithmus mit einfloss.

Aufgrund der Änderungen im Programmablauf traten in den ersten drei Wochen der zweiten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung verschiedene Probleme (Messausfall von wichtigen Eingangsgrößen, Probleme beim automatischen Faxversand usw.) auf, so dass in dieser Phase nicht immer bedarfsgerecht gesperrt werden konnte.

Ab dem 23.06.2007 lief das Steuerprogramm **simDriVe** jedoch stabil und ohne weitere Ausfälle bis zum Ende der zweiten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrsteuerung am 31.08.2007.

6.2 Verkehrliche Auswirkungen

Wie im Kapitel 5.2.3.2 gezeigt wurde, hängt die immissionsmindernde Wirkung von LKW-Sperrungen in starkem Maße von der Befolgsrate durch die LKW-Fahrer ab. Zur Ermittlung der Befolgsrate während der tatsächlich vorgenommenen Sperrungen wurde der mittlere LKW-Werktagsgang der Nullphasen (01.09.2006 bis 30.09.2006, 01.01.2007 bis 14.02.2007 und 01.05.2007 bis 31.05.2007) als Referenztagsgang herangezogen und mit den mittleren Tagesgängen der unterschiedlichen Steuerphasen, in denen der Märkische Ring gesperrt war verglichen (siehe Abbildung 6.3).

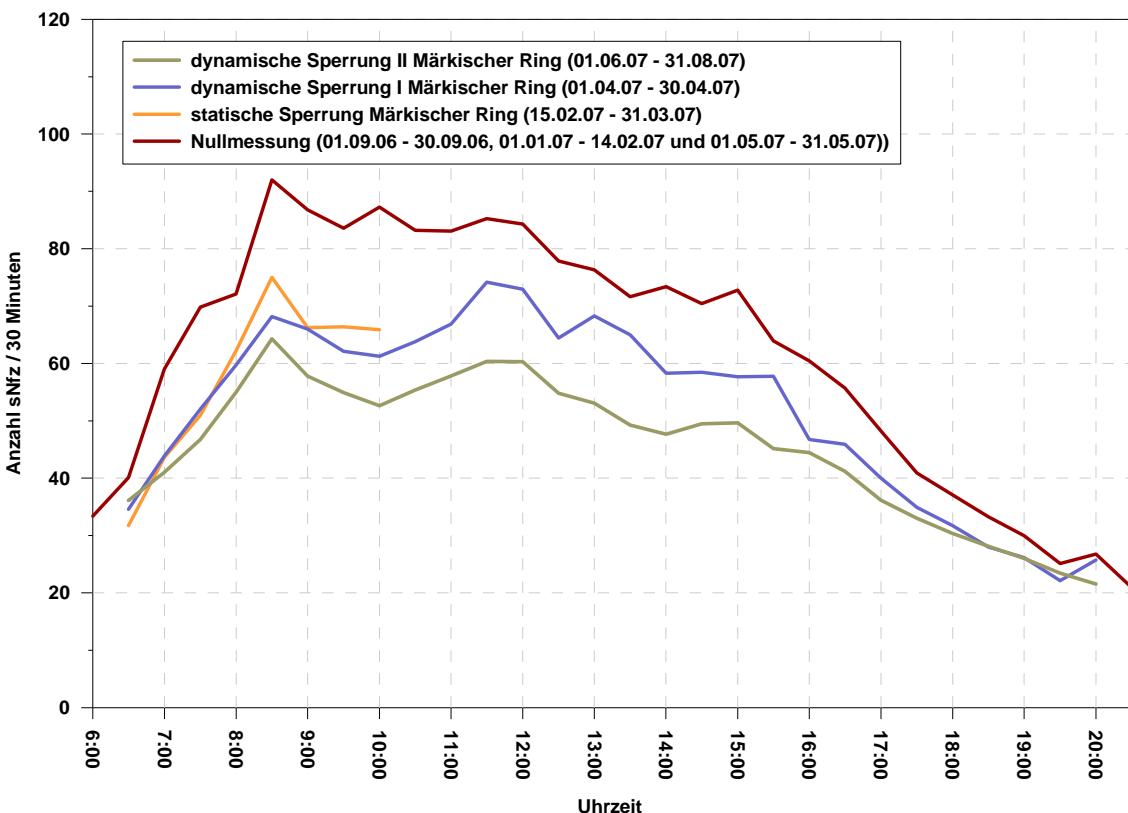


Abbildung 6.3: Mittleres LKW-Aufkommen während der Nullphasen sowie während der Phasen mit LKW-Sperrungen am Märkischen Ring

Die Abbildung 6.3 verdeutlicht, dass während der Sperrzeiten am Märkischen Ring eine deutliche Abnahme der LKW-Durchfahrten am Märkischen Ring zu beobachten war. Das Durchfahrverbot wurde jedoch längst nicht von allen LKW-Fahrern beachtet (siehe auch Abbildung 6.4).

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung



Abbildung 6.4: Missachtung des Durchfahrverbotes

Während der zweiten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung verstärkte die Hagener Polizei ihre Kontrollen im Bereich des Märkischen Rings. So wurden in der Zeit vom 01.06.2007 bis 31.08.2007 laut Polizeipräsidium 49 Kontrollaktionen durchgeführt bei denen insgesamt 521 Fahrzeuge überprüft wurden. 499 LKW-Fahrern wurde eine Verwarnung erteilt, 7 Fahrer erhielten eine Ordnungswidrigkeits-Anzeige. Der personelle Aufwand für die durchgeführten Kontrollaktionen belief sich auf 124,5 Mannstunden.

Durch diese Maßnahme wurde gegenüber der ersten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung eine deutlichere Reduzierung des LKW-Verkehrs erreicht (vgl. Abbildung 6.3 und

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Tabelle 6.1).

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Tabelle 6.1: LKW-Minderung gegenüber den Nullphasen in den unterschiedlichen Sperrphasen

Phase	Minderung LKW-Verkehr (%)	Bezugszeitraum
Statische Sperrung	22	06:00 Uhr bis 10:00 Uhr
Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung I	19	06:00 Uhr bis 20:00 Uhr
Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung II	29	06:00 Uhr bis 20:00 Uhr

6.3 Bestimmung der Auswirkungen anhand der Immissionsmessungen

Eine Auswirkung der durchgeführten Sperrungen auf die Immissionskonzentrationen ist anhand der gemessenen Werte sehr schwierig zu belegen, da

- die Reduktion des LKW-Aufkommens insgesamt nur maximal 29% (dynamische Sperrung II) betrug, folglich der Gesamtverkehr lediglich um 1-2% gemindert wurde,
- die aktuellen Immissionskonzentrationen insbesondere für NO₂ und PM₁₀, nicht ausschließlich durch den lokalen Verkehr, sondern auch durch die Hintergrundbelastung beeinflusst wird,
- die Phasen ohne Sperrung, die zum Vergleich herangezogen werden können, zu anderen Jahreszeiten stattfanden und daher die atmosphärische Durchmischung und Strahlungsaktivität nicht vergleichbar sind,
- innerhalb einer Phase die Sperrungen systembedingt bevorzugt bei Situationen mit hohen Schadstoffkonzentrationen einsetzen, während Zeiten ohne Sperrung bei günstigerer atmosphärischer Durchmischung auftreten,
- das Gesamtverkehrsaufkommen ebenfalls zwischen den Vergleichsphasen verschieden sein kann.

Es ist daher nicht weiter überraschend, dass bei einer zu Abbildung 6.3 analogen Auftragung der NO₂-Konzentrationen z. T. höhere Immissionen während der Sperrphase als in den Nullphasen zu verzeichnen sind (siehe Abbildung 6.5); entsprechendes gilt auch für die anderen Schadstoffe.

Um den vielfältigen Einflussfaktoren (Hintergrund, Meteorologie, Verkehrsaufkommen) Rechnung zu tragen, können entsprechende Differenzen bzw. Verhältnisse gebildet werden. So wird durch Abzug der Hintergrundbelastung zunächst die lokale Zusatzbelastung ermittelt. Durch Verhältnisbildung der Zusatzbelastung am Märkischen Ring zur zeitgleich gemessenen Zusatzbelastung an den anderen Verkehrsmessstellen (BR und GvG) lässt sich der Einfluss der Meteorologie minimieren. Allerdings ist dabei zu beachten, dass gleiche gesamtstädtische meteorologische Bedingungen sich an diesen drei Orten nicht unbedingt auch gleichsinnig auswirken müssen. Schließlich kann das so erhaltene Verhältnis der Zusatzbelastungen durch Division mit dem Gesamtverkehrsaufkommen unabhängig von einer ggf. vorhandenen gleichzeitigen Änderung des PKW-Verkehrs gemacht werden.

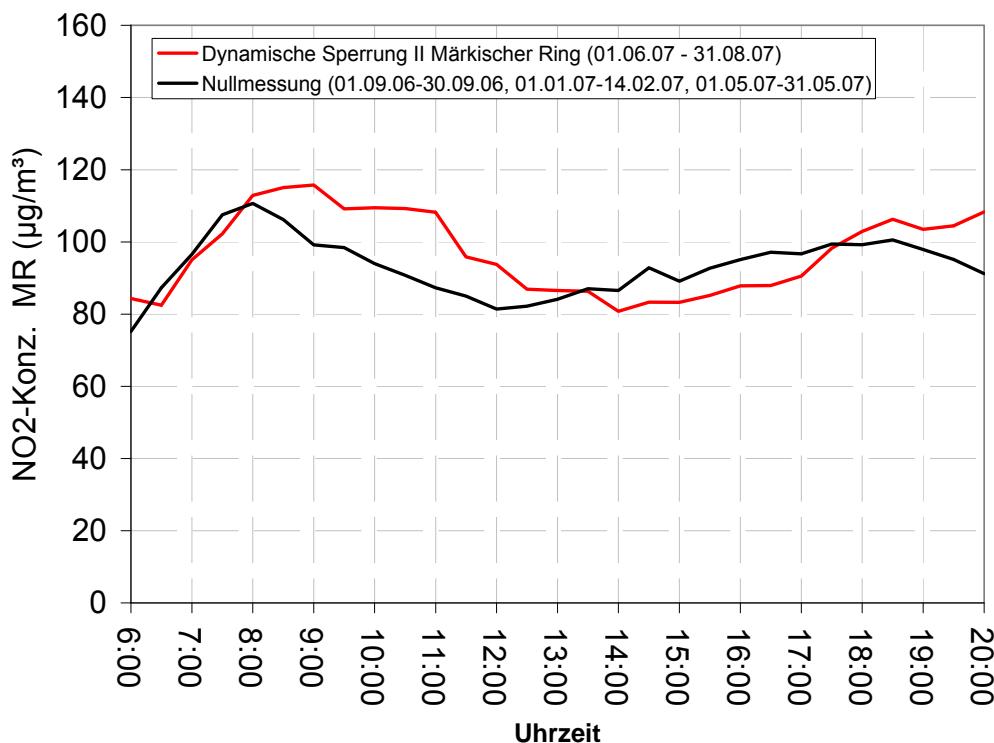


Abbildung 6.5: Mittlere NO₂-Immission während der Nullphase und der zweiten Phase der dynamischen Steuerung am Märkischen Ring³

³ Da in der zweiten der dynamischen Steuerung die maximale Reduktion des LKW-Aufkommens erzielt wurde, beschränken sich die Ausführungen hier auf diese Periode.

Die Abbildung 6.6 zeigt die mittleren Tagesgänge der gemäß

$$Spez.Zusatzbel.MR = \frac{Zusatzbel.MR}{\text{Mittelwert}(ZusatzbelBR; ZusatzbelGvG)} * \frac{1}{\text{Verkehrsaufkommen}}$$

berechneten Indikatorgröße für die Sperrphase „Dynamisch II“ und die Nullphasen. Eine geringe Reduktion der Spezifischen Zusatzbelastung am Märkischen Ring während der morgendlichen Verkehrs-Spitzenzeiten wird dabei ausgewiesen. Die Differenzen sind angesichts der Variabilität der zur Berechnung herangezogenen Größen sicherlich nicht signifikant. Somit kann festgestellt werden, dass eine Immissionsminderung durch die während der Phase „Dynamische Sperrung II“ erzielte LKW-Reduktion anhand der Messwerte nicht nachweisbar ist.

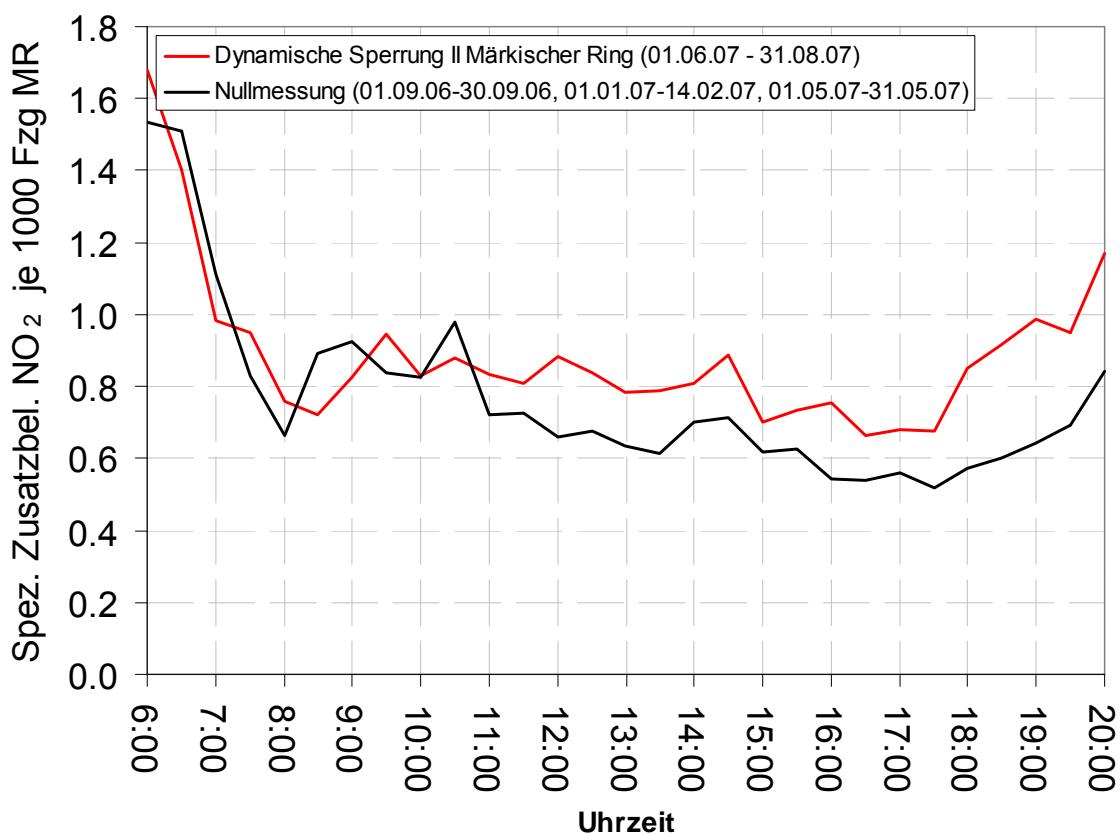


Abbildung 6.6: Spezifische Zusatzbelastung am Märkischen Ring während der dynamischen Sperrung II sowie der Nullphasen

6.4 Bestimmung der Auswirkungen anhand von Modellrechnungen

Wie das vorhergehende Kapitel zeigt, konnte auf Grundlage der Immissionsmessungen am Märkischen Ring keine immissionsmindernde Wirkung aus dem verringerten LKW-Aufkommen während der unterschiedlichen Steuerphasen nachgewiesen werden. Nach den Ergebnissen der vorhergegangenen Modellrechnungen (vgl. Kapitel 5.2.3.2) sind aufgrund der geringen Befolgsrate der LKW-Fahrer (19% bis 29%) sowie aufgrund der unterschiedlichen meteorologischen Verhältnisse in den einzelnen Steuerphasen auch keine messtechnisch nachweisbaren signifikanten Immissionsminderungen zu erwarten.

Es ist dennoch eindeutig davon auszugehen, dass die Immissionswerte ohne die LKW-reduzierende Wirkung der Sperrung des Märkischen Rings höher gewesen wären. Zur Abschätzung dieses Effektes auf die relevanten Immissionskenngrößen wurden analog zu der in Kapitel 5.2.3.1 vorgestellten Methodik Modellrechnungen für die einzelnen Steuerphasen vorgenommen.

6.4.1 Emissionen

Die Bestimmung der Immissionen, die ohne LKW-Sperrung zu erwarten gewesen wären, erfordert zunächst eine Neuberechnung der Emissionen für eine entsprechend höhere LKW-Zahl. Hierbei wurden die auf Basis der Verkehrszahlen der automatischen Verkehrszählung am Märkischen Ring ermittelten LKW-Emissionen während der Sperrzeiten mit den in Kapitel 6.2 ermittelten steuerphasenspezifischen LKW-Reduktionsfaktoren multipliziert.

Die emissionsmindernde Wirkung in Zeiträumen mit LKW-Sperrungen, die sich auf Basis dieser Berechnungen durch die Reduktion des LKW-Aufkommens ergibt, ist der Tabelle 6.2 und der Abbildung 6.7 zu entnehmen.

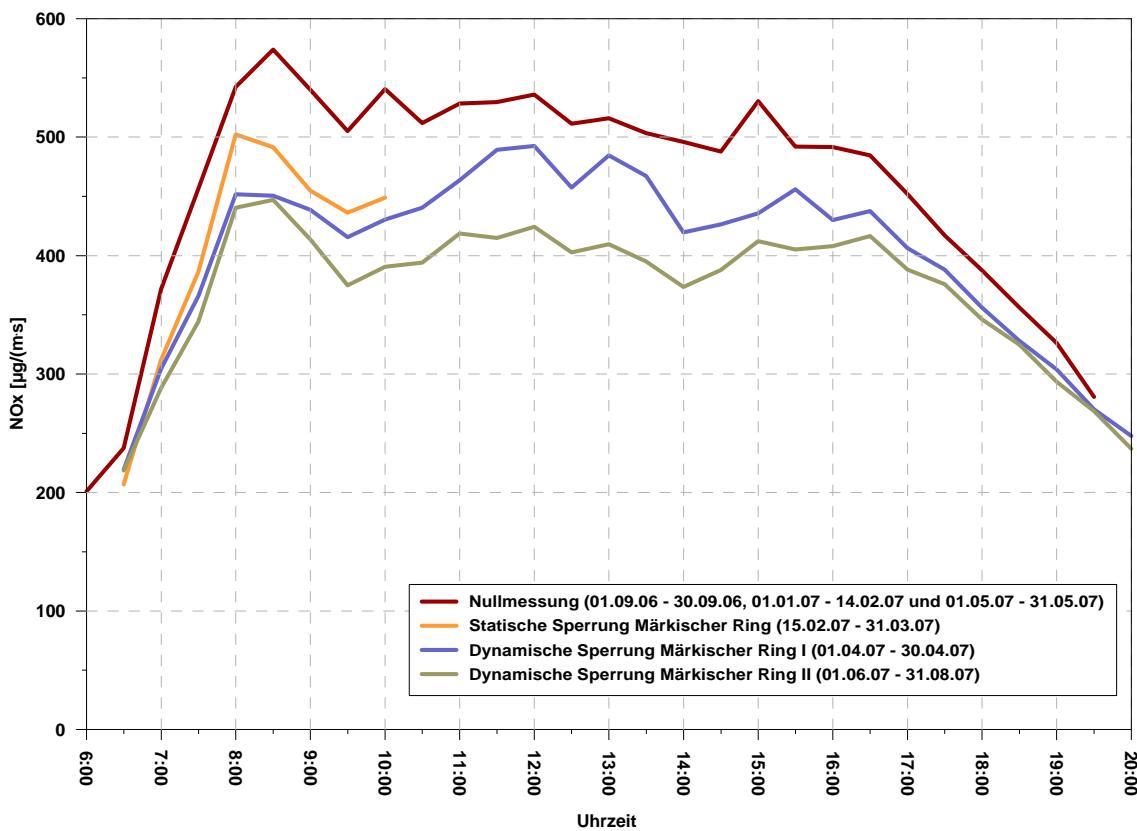


Abbildung 6.7: Reduktion der NO_x-Emissionen durch die LKW-Sperrungen während der Sperrzeiten

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Tabelle 6.2: Reduktion der Gesamtemissionen durch die LKW-Sperrungen während der Sperrzeiten

Phase	Bezugszeitraum	NO _x -Minderung (%)	PM ₁₀ -Minderung (%)
Statische Sperrung	06:00 Uhr bis 10:00 Uhr	-19,9	-16,9
Dynamische Sperrung I	06:00 Uhr bis 20:00 Uhr	-13,7	-11,0
Dynamische Sperrung II	06:00 Uhr bis 20:00 Uhr	-20,4	-15,7

Es zeigt sich, dass während der ersten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung die NO_x-Gesamtemissionen während der Sperrzeiten um ca. 14% gesenkt werden konnten. In der zweiten Phase lag die Minderung aufgrund der höheren Befolgsrate durch die LKW-Fahrer bei etwa 20%. Für PM₁₀ liegen die entsprechenden Minderungen bei 11% bzw. 16%.

6.4.2 Immissionen

Analog zu der in Kapitel 5.2.3.1 vorgestellten Vorgehensweise und auf Basis der in Kapitel 6.2 ermittelten Reduktionsfaktoren der LKW-Verkehre wurde halbstündlich für die unterschiedlichen Sperrzeiträume bestimmt, welche Immissionen zu erwarten gewesen wären, wenn keine Sperrungen stattgefunden hätten. Anschließend wurden für die einzelnen Steuerungsphasen die relevanten Immissionskenngrößen neu bestimmt (vgl.Tabelle 6.3).

Tabelle 6.3: Auswirkungen der LKW-Sperrungen auf die Immissionssituation am Märkischen Ring

Statische Steuerung (15.02.2007 bis 31.03.2007)		
Immissionskenngröße	Gemessene Werte mit Sperrung	Berechnete Werte ohne Sperrung
NO ₂ -Mittelwert µg/m ³	79,5	80,4
NO ₂ -Stundenwerte > 200 µg/m ³	2	5
PM ₁₀ -Mittelwert µg/m ³	34,9	35,2
PM ₁₀ -Tagesmittel > 50 µg/m ³	7	8
Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung I (01.04.2007 bis 30.04.2007)		
Immissionskenngröße	Gemessene Werte mit Sperrung	Berechnete Werte ohne Sperrung
NO ₂ -Mittelwert µg/m ³	108,3	110,7
NO ₂ -Stundenwerte > 200 µg/m ³	11	19
PM ₁₀ -Mittelwert µg/m ³	44,5	45,1
PM ₁₀ -Tagesmittel > 50 µg/m ³	8	9
Immissionsabhängige dynamische Verkehrssteuerung II (01.06.2007 bis 31.08.2007)		
Immissionskenngröße	Gemessene Werte mit Sperrung	Berechnete Werte ohne Sperrung
NO ₂ -Mittelwert µg/m ³	69,7	72,3
NO ₂ -Stundenwerte > 200 µg/m ³	10	16
PM ₁₀ -Mittelwert µg/m ³	27,4	27,9
PM ₁₀ -Tagesmittel > 50 µg/m ³	4	4

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Die Werte der Tabelle 6.3 verdeutlichen, dass aufgrund der niedrigen Befolgsrate während der Sperrphasen die NO₂- und PM₁₀-Mittelwerte nur geringfügig gesenkt werden konnten. Für den NO₂-Mittelwert wurde für die statische Steuerung eine Reduktion um etwa 1 µg/m³ und für die beiden Phasen der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung eine Minderung um ca. 2,5 µg/m³ ermittelt. Für den PM₁₀-Mittelwert beträgt die Reduktion 0,3 µg/m³ bis 0,6 µg/m³.

Die besten Effekte wurden erwartungsgemäß bei der Verringerung der NO₂-Stundenwerte > 200 µg/m³ erreicht. So wurde die Überschreitungshäufigkeit dieses Grenzwertes während der Phasen der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung um 42%, bzw. um 37% gesenkt.

Die Anzahl der Überschreitungen des PM₁₀-Tagesmittelwertes von 50 µg/m³ konnte während der statischen Steuerung sowie der ersten Phase der immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung jeweils um einen Tag reduziert werden.

7 Diskussion und Bewertung

7.1 Auswirkungen der Maßnahmen im Hagener Stadtgebiet

Werden Durchfahrtsverbote für den Schwerlastverkehr an einzelnen Straßen(abschnitten) eingerichtet, so führt dies zwangsläufig zu Verlagerungen des LKW-Verkehrs auf andere Straßen. Das Ausmaß hierdurch verursachter lufthygienischer Beeinträchtigungen wird im wesentlichen von der Veränderung des Schwerlastverkehrsaufkommens sowie von der Straßenbreite und der Geometrie der Straßenrandbebauung bestimmt.

7.1.1 Gesamtstädtische Auswirkungen durch Verlagerung

Nach einer ersten Nullphase vom 01.09.2006 bis 30.09.2006 trat am 01.10.2006 der Aktionsplan „Graf-von-Galen-Ring“ in Kraft. Hintergrund hierfür war das mehr als 35-malige Überschreiten des Grenzwertes für das PM₁₀-Tagesmittel von 50 µg/m³. Im Rahmen des Aktionsplanes wurde der Graf-von-Galen-Ring (GvGR) für den LKW-Verkehr > 3,5 t gesperrt.

Zum 01.01.2008 wurde in Abstimmung mit der Bezirksregierung Arnsberg das LKW-Durchfahrverbot am Graf-von-Galen-Ring wieder aufgehoben. Nach einer Nullphase ohne Sperrungen wurde im Zeitraum vom 15.02.2008 bis zum 31.03.2008 der Märkische Ring werktags zwischen 06:00 und 10:00 Uhr für den Schwerlastverkehr gesperrt (statische Sperrung).

Das Ingenieurbüro AVISO, Aachen untersuchte im Auftrag des LANUV Verlagerungseffekte des Schwerlastverkehrs während dieser Sperrphasen und bestimmte deren Auswirkungen auf die Emissionen des Straßenverkehrs [AVISO 2007].

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

Die Tabelle 7.1 und die Abbildung 7.1, veranschaulichen die Verlagerungseffekte des Schwerlastverkehrs, die sich während der Sperrzeiten auf dem Innenstadtring (Märkischer Ring, Graf-von-Galen-Ring und Bergischer Ring) ergeben. Bei der Interpretation dieser Daten, ist zu beachten, dass diese auf jeweils einwöchigen Verkehrzählungen beruhen und daher mit entsprechenden statistischen Unsicherheiten behaftet sind.

**Tabelle 7.1: Einfluss von Sperrungen auf das Schwerlastverkehrsaufkommen
an Werktagen (DTV_W-Werte - LKW-Anzahl pro 24 h)**

LKW-Durchfahrtsverbot am Graf-von-Galen-Ring (01.10.2006 bis 31.12.2006)			
	Märkischer Ring	Graf-von-Galen-Ring	Bergischer Ring
Nullfall	2.073	1.654	463
Mit Sperrung	2.336	1.212	772
Abs. Veränderung	+263	-442	+309
Rel. Veränderung	14%	-26%	+67%

Statische Steuerung am Märkischen Ring (15.02.2007 bis 31.03.2007)			
	Märkischer Ring	Graf-von-Galen-Ring	Bergischer Ring
Nullfall	2.073	1.645	463
Mit Sperrung	1.872	1.727	537
Abs. Veränderung	-201	+82	+74
Rel. Veränderung	-10%	+5%	+16%

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

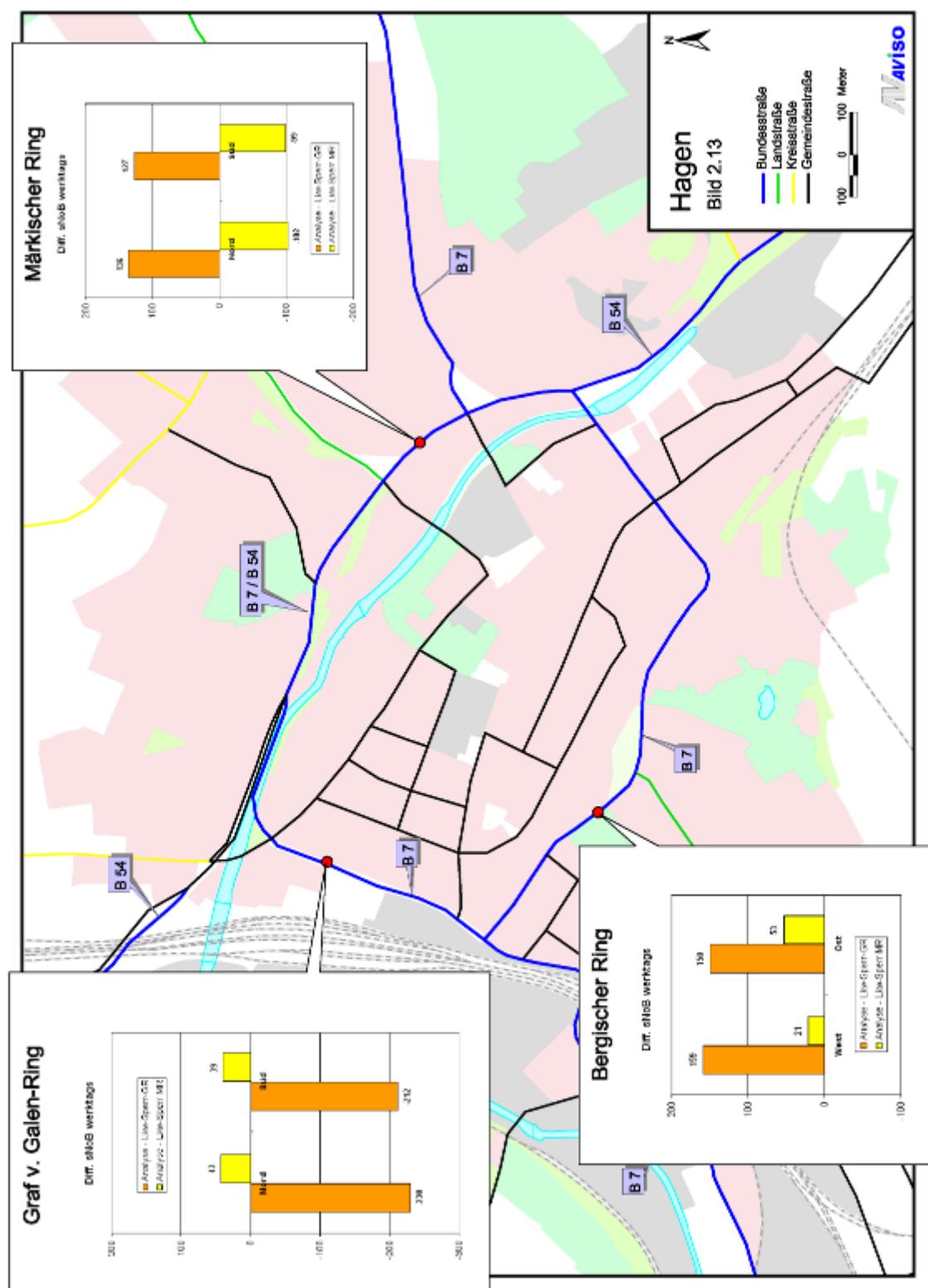


Abbildung 7.1: Verlagerungen des werktäglichen Schwerlastverkehrs auf dem Innenstadtring durch LKW-Sperrungen am GvG und MR
Quelle: [AVISO 2007]

Aus der Abbildung 7.1 und den Werten der Tabelle 7.1 lassen sich trotz gewisser statistischer Unsicherheiten, die sich aus der jeweils nur einwöchigen Dauer der Verkehrszählungen ergeben, folgende Rückschlüsse ziehen.

Sperrung Graf-von-Galen-Ring

Die durchgängige Sperrung des Graf-von-Galen-Rings führt hier zu einer deutlichen Reduktion des Schwerlastverkehrs. Gleichzeitig kommt es aber aufgrund von Verlagerungseffekten auf den anderen Bereichen des Innenstadtrings zu einer Zunahme des Schwerlastverkehrs. Hiervon ist besonders stark der Bergische Ring betroffen, für den sich eine Zunahme des LKW-Verkehrs um deutlich mehr als 50% nachgewiesen wurden.

Die Reduktion des Schwerlastverkehrs mit entsprechenden lufthygienischen Entlastungen am Graf-von-Galen-Ring gehen somit mit deutlichen Zusatzbelastungen des Bergischen Rings und des Märkischen Rings einher. Aufgrund der durch die Immissionsmessungen nachgewiesenen hohen lufthygienischen Belastungen an diesen Straßen sind die zusätzlichen LKW-Verkehre mit den hiermit verbundenen zusätzlichen Schadstoffemissionen als kritisch anzusehen.

Sperrung Märkischer Ring

Da der Märkische Ring im Falle der statischen Sperrung nur 4 Stunden an Werktagen mit einem LKW-Durchfahrtverbot versehen ist, ergeben sich hier geringere Minderungen des Schwerlastverkehrs. Als Folge hiervon werden aber auch die anderen Straßen des Innenstadtrings in geringerem Maße zusätzlich belastet.

Am Graf-von-Galen-Ring beträgt die Zunahme des Schwerlastverkehrs beispielsweise nur 5%. Aufgrund der verkehrlichen Wechselwirkungen und der ungünstigen lufthygienischen Belastungssituation auf dem gesamten Innenstadtring sind zeitlich befristete Sperrmaßnahmen somit bezüglich ihrer lufthygienischen Wirkung günstiger einzustufen als Dauersperrungen.

Dies gilt insbesondere für die immissionsabhängige dynamische Verkehrslenkung bei der die hinsichtlich lufthygienischer Effizienz optimierten Sperrungen im Bezug auf das Gesamtjahr eine geringere Gesamtsperrdauer ergeben als dies bei der statischen Sperrung der Fall ist (vgl. Tabelle 5.2).

7.1.2 Auswirkungen auf der Umgehungsstrecke

Zur Abschätzung der Verlagerungseffekte, die sich aus der LKW-Sperrung am Märkischen Ring für die Ausweichroute über die Rembergstraße (siehe Abbildung 7.2) ergeben, wurden mit Verkehrszählungen vom 20.03.07 bis zum 28.03.07 während der Phase der statischen Sperrung die durchschnittlichen Verkehrsmengen in der Rembergstraße erfasst. Aufbauend auf den ermittelten Verkehrsdaten wurde ein Grobscreening für den Fall „ohne Sperrung“ und den Fall „mit statischer Sperrung“ durchgeführt. Der untersuchte Streckenabschnitt der Rembergstraße ist in der nachfolgenden Abbildungen durch die grüne Linie gekennzeichnet.



Abbildung 7.2: Märkischer Ring mit Ausweichroute
Quelle: GoogleEarth

- rote Linie: Ausweichroute
- grüne Linie: mit Immis Luft untersuchter Straßenabschnitt der Rembergstraße
- gelbe Linie: Märkischer Ring



Abbildung 7.3: Untersuchter Bereich der Rembergstraße
Blickrichtung von Westen nach Osten

Die Abbildung 7.3 verdeutlicht, dass die Rembergstraße im untersuchten Bereich eine beidseitig geschlossene Randbebauung aufweist.

Die Bestimmung der Immissionskenngrößen wurde mit dem PC-Berechnungsverfahren *IMMIS Luft Version 3.2* [IVU 2005] durchgeführt.

Besondere Anmerkungen zur Bestimmung der PM₁₀-Tagesmittelwerte in IMMIS Luft

Für PM₁₀ entspricht die mehr als 35-malige Überschreitung des Tagesmittelwertes von 50 µg/m³ der Beurteilung des 90,4-Perzentils der Jahresverteilung von Tagesmittelwerten in einem Jahr von 365 Tagen. Liegt das 90,4-Perzentil über 50 µg/m³, so überschreiten die Tagesmittelwerte an mehr als 35 Tagen den zulässigen Grenzwert von 50 µg/m³. Die Bestimmung des 90,4-Perzentils erfolgt anhand des PM₁₀-Jahresmittelwertes [PM₁₀] mit Hilfe der linearen Regressionsgleichung:

$$90,4\%-PM_{10}=1,93 + 1,65 [PM_{10}]$$

Überschreitet der rechnerisch ermittelte PM₁₀-Jahresmittelwert den Wert von 29,1 µg/m³, so ergeben sich nach der oben genannten Gleichung an mehr als 35 Tagen Überschreitungen des Grenzwertes für das PM₁₀-Tagesmittel.

7.1.2.1 Eingangsdaten

Hintergrundbelastung

Auf der Grundlage der Immissionsmessergebnisse der Hintergrundstation im Ferdinand-David-Park wurde die Hintergrundbelastung für die Rembergstraße wie folgt angenommen:

Tabelle 7.2: Hintergrundbelastungswerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$

NO_x	NO₂	PM₁₀
Jahresmittelwert	Jahresmittelwert	Jahresmittelwert
38	27	19

Verkehrsdaten

Die durchschnittliche tägliche Verkehrsbelastung auf der Rembergstraße wurde während des Zeitraumes der statischen Sperrung des Märkischen Rings auf Grundlage einer einwöchigen Verkehrszählung ermittelt. Zur Ermittlung der Verkehrsbelastung bei freier Durchfahrt auf dem Märkischen Ring wurde angenommen, dass alle LKW, die die Sperrung am Märkischen Ring befolgen (22%, vgl. Kapitel 6.2) über die Rembergstraße fahren. Der entsprechende absolute Wert (177 LKW/Tag) wurde an Werktagen von den Zähldaten subtrahiert. Anschließend wurden der DTV-Wert sowie der LKW-Anteil neu berechnet.

Tabelle 7.3: Verkehrsdaten der Rembergstraße

	(ohne LKW-Sperrung Märkischer Ring)	(mit LKW-Sperrung Märkischer Ring)
DTV [Kfz pro Tag]	11.863	11.973
LKW-Anteil < 3,5t [%]	12,6	12,5
LKW-Anteil > 3,5t [%]	5,4	6,2

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Der untersuchte Straßenabschnitt wurde der Kategorie Hauptverkehrsstraße mit Lichtsignalanlage (IO_LSA1) sowie der Funktion „Wohngebietstraße“ zugeordnet.

Geometrie des Straßenraumes

Ausbreitungsrechnungen mit *IMMIS Luft* erfordern Eingaben zur Beschreibung der Straßenrandbebauung. Für die Rembergstraße wurden die in der Tabelle 7.4 aufgeführten Daten verwendet.

Tabelle 7.4: Daten zur Beschreibung der Straßengeometrie

Breite [m]	22
Höhe der Randbebauung [m]	18
Durchlässigkeit [%]	0
Steigung [%]	4

7.1.2.2 Ergebnisse

Emissionen

Für die Emissionsberechnungen wurde das Bezugsjahr 2007 zugrunde gelegt. In der Tabelle 7.5 sind die von *IMMIS Luft* ermittelten Emissionsraten aufgeführt.

Tabelle 7.5: Mittlere Emissionsraten

	ohne Sperrung	mit Sperrung
NO _x [g/(km·h)]	366	398
PM ₁₀ [g/(km·h)]	42,5	44,8

Immissionen

In der Tabelle 7.6 sind die berechneten Immissionskenngrößen zusammengestellt.

Tabelle 7.6: Berechnete Immissionskenngrößen

Straße	Rembergstraße ohne Sperrung am MR	Rembergstraße mit Sperrung am MR
Jahresmittelwert NO ₂ [$\mu\text{g}/(\text{m}^3)$]	37,9	39,0
Jahresmittelwert PM ₁₀ [$\mu\text{g}/(\text{m}^3)$]	22,9	23,2
90,4-Perz. Tagesmittelwert PM ₁₀ [$\mu\text{g}/(\text{m}^3)$]	39,9	40,4

Für NO₂ wird für den Fall ohne Sperrung des Märkischen Rings ein Jahresmittelwert von 37,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ausgewiesen. Für den Fall mit Sperrung des Märkischen Rings bewirken die resultierenden zusätzlichen LKW-Verkehre in der Rembergstraße eine Erhöhung des NO₂-Jahresmittelwertes auf 39,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Der nach der 22. BImSChV zulässige Grenzwert von 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ wird somit knapp eingehalten.

Für PM₁₀ ergibt sich aufgrund der LKW-Sperrung am Märkischen Ring in der Rembergstraße nur eine marginale Verschlechterung der Immissionssituation. Sowohl der Grenzwert für den Jahresmittelwert als auch der Grenzwert für die Überschreitungshäufigkeit des Tagesmittelwertes werden für beide Fälle deutlich unterschritten.

7.2 Übertragbarkeit der Methodik auf andere Standorte

Die unter Kapitel 5 vorgestellte Methodik zur immissionsabhängigen Steuerung des Schwerlastverkehrs ist grundsätzlich auch auf andere Standorte übertragbar.

Vor Inbetriebnahme ist es allerdings zwingend erforderlich, den Steuerungsalgorithmus an die besonderen Standortbedingungen anzupassen und anhand von Immissionsmessdaten zu validieren. Dies erfolgt auf der Grundlage von Messzeitreihen mit Meteorologie- und Immissionsdaten. Es werden mindestens die folgenden Parameter benötigt:

- repräsentative Überdachmeteorologie (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung),
- NO₂-Konzentration am „Hot Spot“

Bei besonderen topografischen Einflüssen kann die Überdachmeteorologie zudem durch Daten einer übergeordneten Meteorologiestation ergänzt werden.

Die Messdaten sollten über einen Zeitraum von einem Jahr vorliegen, um die jahreszeitlichen Variationen der Meteorologie und ihre Auswirkungen auf die Immissionssituation in ausreichendem Umfang berücksichtigen zu können.

Während des Messzeitraumes werden die Steuerungskriterien abgeleitet. Die Sperrhäufigkeit und das Immissionsminderungspotenzial, die sich durch die praktische Umsetzung des Steuerungsalgorithmus ergeben, können vor der Inbetriebnahme mit Hilfe eines fiktiven Probetreibes auf der Grundlage der in Kapitel 5.2.3 vorgestellten Methodik bestimmt werden. Hierzu werden folgende weitere Messdaten benötigt:

- NO₂-Konzentration des städtischen Hintergrundes
- Verkehrsmengen am „Hot Spot“ differenziert nach Pkw, LNfz, SNfz und Bussen.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Für den Online-Betrieb des Systems werden in der Regel meteorologische Messdaten (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung) ausreichen.

Die Festlegung des Messprogrammes und der Messstandorte muss unter besonderer Berücksichtigung der jeweils vorliegenden standortspezifischen lufthygienischen Randbedingungen erfolgen. Vorhandene Stationen können ggf. in das Messprogramm integriert werden.

Die ungefähren Investitionskosten für die unterschiedlichen Projektphasen (Ableitung des Steuerungsalgorithmus, Bestimmung des Immissionsminderungspotenzials und Online-Betrieb) sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Die angegebenen Kosten für die dynamische Beschilderung beziehen sich auf 18 große Schilder und 19 kleinere Orientierungsschilder.

Bei der Kostenabschätzung ist zu beachten, dass die tatsächlichen Kosten aufgrund differierender Rahmenbedingungen in anderen Kommunen stark von den hier angegebenen Kosten abweichen können. Deutliche Kosten senkungen sind vor allem durch die Implementierung bereits bestehender Messprogramme möglich. Das gesamte Investitionsvolumen wird vor allem von der Anzahl der benötigten dynamischen Verkehrsschilder abhängen. Zudem sind neben den Investitionskosten die Wartungskosten für die unterschiedlichen Messsysteme einzukalkulieren.

Tabelle 7.7: Investitionskosten zum Aufbau einer immissionsabhängigen dynamischen Verkehrslenkung

Ableitung des Steuerungsalgorithmus	
Leistungspunkt	Netto-Kosten (ca.)
NO ₂ -Messung am Hot Spot (1 Jahr)	30.000 – 35.000 Euro
Meteorologiemessung (Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Strahlung)	8.000 – 15.000 Euro
Datenauswertung / Entwicklung des Steuerungsalgorithmus	15.000 – 20.000 Euro
Bestimmung des Immissionsminderungspotenzials	
Leistungspunkt	Netto-Kosten (ca.)
NO ₂ -Messung städtischer Hintergrund (1 Jahr)	30.000 – 35.000 Euro
Automatische Verkehrszählung	40.000 – 50.000 Euro
Datenauswertung / Probefahrt	10.000 – 15.000 Euro
Dauerbetrieb der dynamischen Verkehrslenkung	
Leistungspunkt	Netto-Kosten (ca.)
Softwareentwicklung zur dynamischen Verkehrslenkung / Ausbau des lokalen Verkehrsleitrechners	300.000 Euro
Dynamische Beschilderung	250.000 Euro

Ein sinnvoller Einsatz einer immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung erfordert das Vorhandensein von Alternativrouten (z.B. Umgehungsstraßen), die lufthygienisch unkritische Verhältnisse aufweisen. Sind diese Voraussetzungen nicht gegeben, so ist vom Einsatz dieser Methode abzuraten.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Lufthygienisch hoch belastete Ortsdurchfahrten mit hohem Schwerlastanteil und gleichzeitig vorhandener Ausweichroute hingegen sind ideal für den Einsatz der dynamischen Lenkung geeignet.

Die Methodik der immissionsabhängigen dynamischen Steuerung des Schwerlastverkehrs kann aber prinzipiell auch auf großräumige Lenkungskonzepte übertragen werden.

7.3 Rückschlüsse für die Luftreinhalteplanung in Hagen

Für die zukünftige Luftreinhalteplanung in Hagen haben sich aus dem Forschungsprojekt folgende Erkenntnisse ergeben:

- Die Einhaltung der Grenzwerte am Märkischen Ring kann durch dynamische, zeitlich befristete LKW-Sperrungen alleine nicht erreicht werden. Aufgrund der besonderen Belastungssituation in der Hagener Innenstadt sind lokale verkehrliche Einzelmaßnahmen (Aktionsplan Graf-von-Galen-Ring, dynamische Verkehrslenkung am Märkischen Ring) wegen der negativen lufthygienischen Effekte, die aus Verkehrsverlagerungen resultieren, nur bedingt zielführend.
- Positive lufthygienische Effekte lassen sich hingegen durch eine großräumige Lenkung des Schwerlastverkehrs erreichen. Ein von der Stadt Hagen erarbeitetes „LKW-Routenkonzept“ liegt inzwischen vor. Ziel hierbei ist es, LKW-Verkehre großräumig um die Hagener Innenstadt herum zu leiten. In einer zukünftigen Eweiterungsstufe des LKW-Routenkonzeptes soll eine Beschilderung zur Lenkung des Schwerlastverkehrs bereits an den Autobahnausfahrten erfolgen.
- Zusätzlich sollte die immissionabhängige dynamische Verkehrssteuerung als zusätzliches Lenkungsinstrument in das großräumige Routenkonzept integriert werden, um im Falle hoher lufthygienischer Belastungen in der Hagener Innenstadt den LKW-Verkehr auf weniger belasteten Ausweichstrecken um die Innenstadt herumzuführen.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

- Mit der großräumigen Lenkung werden auf den lufthygienisch kritischen Straßenabschnitten nicht nur LKW-Ziel- und -Quellverkehre sondern insbesondere LKW-Durchgangsverkehre vermieden bzw. reduziert. Nach [AVISO 2005] beträgt deren Anteil am gesamten Schwerlastverkehr des Märkischen Rings ca. 18 %.

8 Fazit

Das Forschungsprojekt hat die Methodik und die Wirkungsweise eines einfachen und dennoch prognosegenauen EDV-Systems zur immissionsabhängigen dynamischen Steuerung des Schwerlastverkehrs an einem lufthygienisch extrem hoch belasteten Abschnitt des Märkischen Rings in der Hagener Innenstadt aufgezeigt.

In ihrer ursprünglichen Zielsetzung sollte die immissionsabhängige dynamische LKW-Verkehrssteuerung hohe NO₂-Immissionen wirksam mindern.

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde gezeigt, dass eine auf die Erkennung und „Bekämpfung“ hoher NO₂-Immissionen ausgerichtete Steuerungsstrategie automatisch auch einen wichtigen Beitrag zur Minderung der PM₁₀-Tagesmittelwerte leisten kann.

Die Höhe der lokalen Feinstaub-Immissionen durch den Straßenverkehr werden mit Ausnahme der Globalstrahlung (Photochemie) im wesentlichen von denselben Einflussfaktoren (Verkehrsaufkommen, Windrichtung und Windgeschwindigkeit) bestimmt wie die NO₂-Immissionen.

Mit der Erkennung von hohen NO₂-Immissionen und hierdurch ausgelösten LKW-Sperrungen werden somit automatisch hohe PM₁₀- und PM_{2,5}-Immissionen des lokalen Straßenverkehrs erkannt und effektiv gemindert (vgl. auch Abbildung 5.8).

Es konnte nachgewiesen werden, dass eine dynamische immissionsabhängige Steuerung des Schwerlastverkehrs das Potenzial aufweist

- hohe NO₂-Immissionswerte deutlich zu mindern,
- die Zahl der PM₁₀-Überschreitungstage zu verringern,
- NO₂-, PM₁₀- und PM_{2,5}-Mittelwerte geringfügig abzusenken.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen dynamischen Verkehrssteuerung

Ein Vergleich mit anderen Steuerungsstrategien zeigt, dass eine dynamische, der lufthygienischen Belastungssituation angepasste Steuerung von LKW-Durchfahrverboten deutlich effektiver ist als statische Sperrungen zu bestimmten festgelegten Zeiten.

Durch die insgesamt kürzere Sperrdauer werden einerseits Verlagerungseffekte und hierdurch verursachte lufthygienische Verschlechterungen auf anderen Straßen verringert und andererseits deutliche lufthygienische Verbesserungen am Märkischen Ring aufgrund des hohen Immissionsminderungspotenzials während der Sperrzeiten erzielt. Die Minderungswirkung hängt aber in starkem Maße von der Befolgsrate des Durchfahrverbotes während der Sperrzeiten ab.

Die in Hagen entwickelte Methodik zur immissionsabhängigen dynamischen Steuerung kann auf andere Städte und Straßen übertragen werden, weil hohe Immissionswerte auch an anderer Stelle im Prinzip von denselben Ursachen hervorgerufen werden.

Vor Inbetriebnahme des Steuerprogrammes *simDRIVE* muss dieses allerdings auf der Grundlage von Messungen an die besonderen Standortgegebenheiten angepasst werden.

Insgesamt hat das Forschungsprojekt vertiefende Erkenntnisse zur lufthygienischen Belastungssituation in der Stadt Hagen vermittelt und wichtige Grundlagendaten für die weitere gezielte Luftreinhalteplanung in Hagen geliefert.

9 Literaturverzeichnis

[ARTec/simuPlan 2002] Ludes, G. u. Beyer, U.: Bericht über eine neu entwickelte Methode zur dynamischen immissionsabhängigen Verkehrsbeeinflussung für den Märkischen Ring, 18.11.2002.

[AVISO 2005] Niederau et al.: Ermittlung des Durchgangsverkehrs schwerer Nutzfahrzeuge in Hagen und Abschätzung von Maßnahmenwirkungen. Aachen, 2005.

[AVISO 2007] Niederau et al.: Emissionsberechnungen für drei Wochen mit/ohne Maßnahmen am Innenstadtring Hagen. Aachen, 2007.

[Bezirksregierung Arnsberg 2004] Bezirksregierung Arnsberg: Luftreinhalteplan für den Bereich Hagen Innenstadt, 2004.

[Bezirksregierung Arnsberg 2005] Bezirksregierung Arnsberg: Luftreinhalteplan Hagen Innenstadt – 1. Fortschreibung und Aktionsplan Innenstadtring, Oktober 2005.

[22. BlmSchV 2002] 22. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissions- schutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft – 22. BlmSchV –) vom 11.09.2002, BGBl. I, S. 3626.

[Düring, Lohmeyer 2004] Düring, I., Lohmeyer, A.: Modellierung nicht motorbedingter PM10-Emissionen von Straßen, Kommission Reinhaltung der Luft - Schriftenreihe 33, 2004.

[EU 1996] Richtlinie 96/62/EG des Rates über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, vom 27. September 1996.

[EU 1999] Richtlinie 1999/30/EG des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft, 29.6.1999.

[INFRAS 2004] Keller, M.: Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßen- verkehrs, Version 2.1, Februar 2004.

Entwicklung und Validierung einer Methode zur immissionsabhängigen
dynamischen Verkehrssteuerung

- [STADT HAGEN 1997] Stock, P. et al: Klimaanalyse Hagen. Hagen, 1997
- [IVU 2005] Diegmann, V.: IMMIS Luft - Handbuch zur Version 3.2, Juli 2005.
- [LANUV 2006] Landesanstalt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz:
Messdaten der LUQS-Stationen für 2006
http://www.lanuv.nrw.de/luft/immissionen/ber_trend/kenn.htm
- [LANUV 2007] Landesanstalt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz:
Mitteilung per e-mail von Herrn Doppelfeld, 15.10.2007
- [LUA 2002] Landesumweltamt NRW, Modellprojekt zur Erstellung von
Luftreinhalteplänen nach Art. 8 der Richtlinie 96/62/EG des Rates über die
Beurteilung und Kontrolle der Luftqualität, Abschlussbericht, 1.10.2002.
- [MODUS CONSULT 2002] Gericke, F. et al.: Umweltabhängige Verkehrs-
beeinflussung, Prototyp für ein online-fähiges Managementsystem,
Abschlussbericht, November 2002.
- [MODUS CONSULT 2003] Gericke, F. et al.: Umweltabhängige Verkehrs-
beeinflussung, Maßnahmenbewertung, Karlsruhe, Juni 2003
- [Schneider et al. 2006] Schneider, C. et al.: Ermittlung der durch Aufwirbeln und
Abrieb im Straßenverkehr verursachten PM10-Emissionen, ein modifizierter
Ansatz, Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 66 (2006), Nr. 10, S. 436 - 439.
- [UBA 2006a]
http://www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/download/public/docs/pollutants/NO2/Jahr/NO2_2006.xls
- [UBA 2006b]
http://www.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/download/public/docs/pollutants/PM10/Jahr/PM10_2006.xls
- [VDI 2003] VDI 3782, Blatt 7 – Kfz-Emissionsbestimmung, Kommission
Reinhaltung der Luft: November 2003.