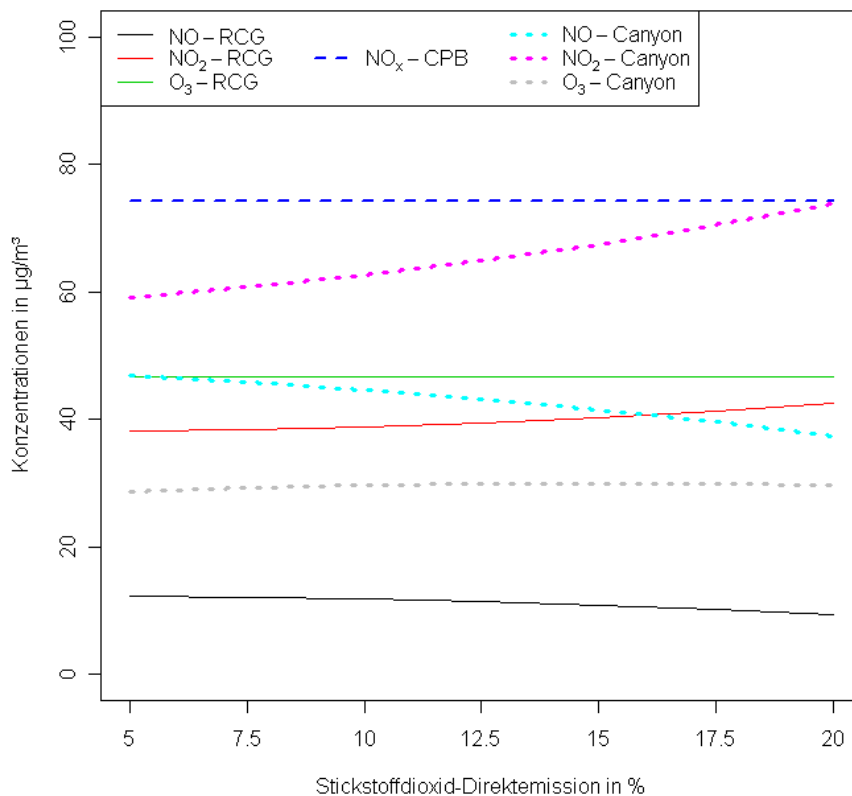


## Endbericht

### Ursachenanalyse für den Anstieg der NO<sub>2</sub>-Immissionen an verkehrsnahen Messstellen



für  
 Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie  
 Postfach 3209  
 Rheingaustraße 186  
 D-65022 Wiesbaden

erarbeitet von  
 IVU Umwelt GmbH  
 Burgweg 10 · D-79350 Sexau  
 Telefon: 07641 53046  
 Telefax: 07641 53047  
 URL: <http://www.ivu-umwelt.de>

Mai 2005



## INHALT

1	Das Problem .....	2
2	Ursachenanalyse .....	4
2.1	Luftchemie .....	4
2.2	NO <sub>2</sub> -Direktemission .....	6
2.2.1	Allgemeines .....	6
2.2.2	Literaturlauswertung .....	6
2.2.3	Emissionsfaktoren für NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis .....	7
3	Variation der NO <sub>2</sub> -Direktemission .....	8
3.1	Allgemeines .....	8
3.2	Zu untersuchende Szenarien .....	8
3.3	Das photochemische Modul von CPB .....	9
3.4	Ergebnisse .....	10
4	Bewertung .....	15
5	Literatur .....	16

# 1 Problemstellung

In den letzten Jahren ist an innerstädtischen Messstellen eine Abnahme der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen festzustellen. Abbildung 1 zeigt die Abnahme der Komponente NO. Die Station "Kleiner Feldberg" ist eine Bergmessstation und die Station "Frankfurt-Ost" ist eine urbane Hintergrundmessstation, die übrigen Stationen sind Verkehrsmessstationen.

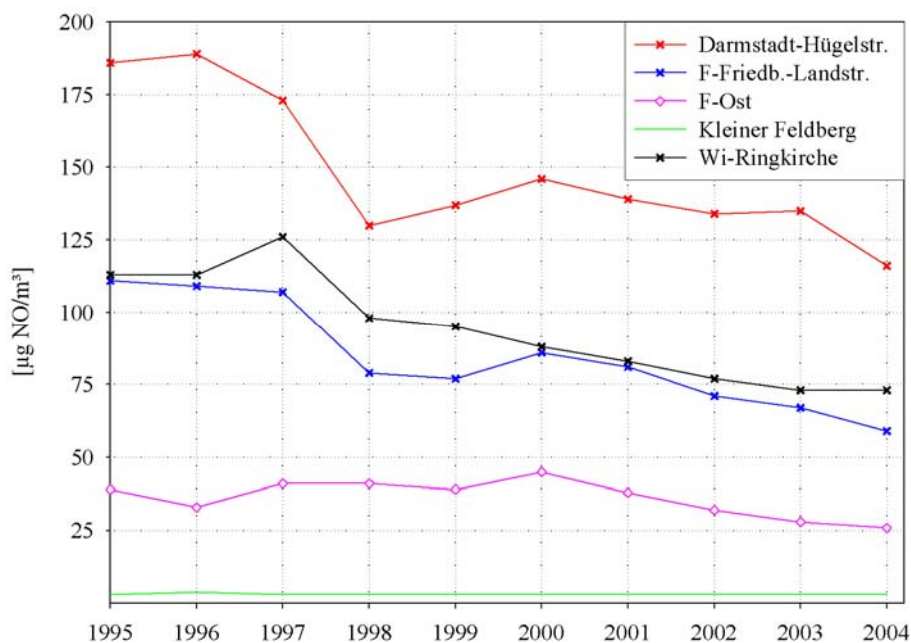


Abbildung 1 Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO-Massenkonzentration an einigen hessischen Messstellen während der letzten 10 Jahre. (Grafik von HLUg)

Während der gleichen Zeit nahm aber das NO<sub>2</sub>/NO-Verhältnis in Innenstädten zu (siehe Abbildung 2).

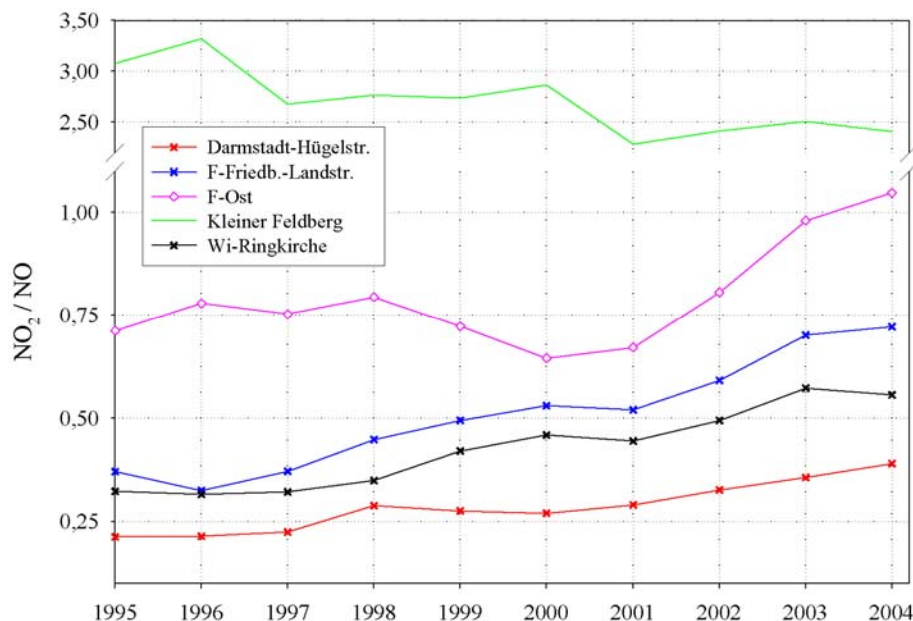


Abbildung 2 Entwicklung der Jahresmittelwerte des NO<sub>2</sub>/NO-Volumenverhältnisses an einigen hessischen Messstellen während der letzten 10 Jahre. (Grafik von HLUg)

Die NO<sub>2</sub>-Massekonzentration nahm im gleichen Zeitraum an einigen Messstellen absolut zu (siehe Abbildung 3). Diese Messstellen sind alle direkt verkehrsbezogen.

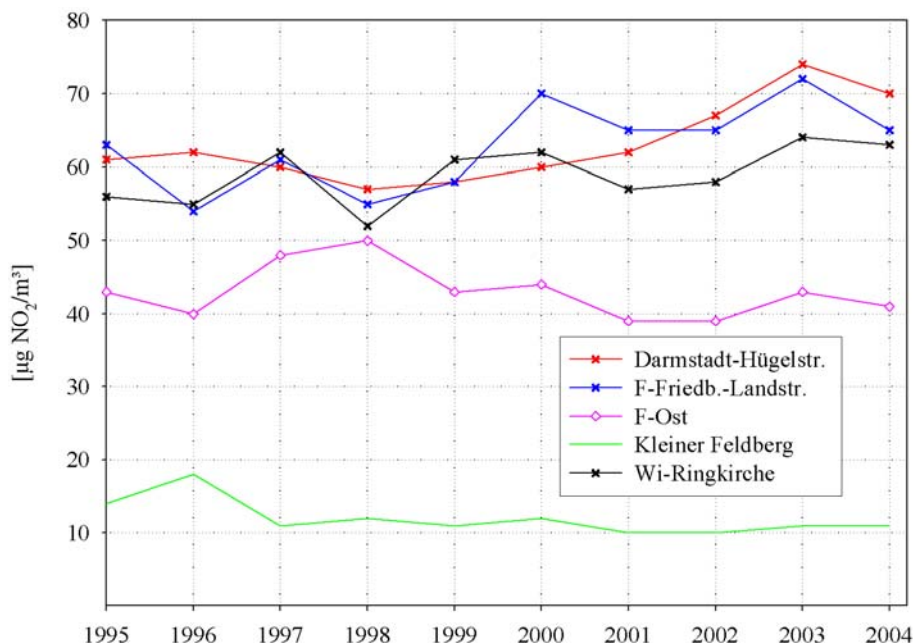


Abbildung 3 Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO<sub>2</sub>-Massekonzentration an einigen hessischen Messstellen während der letzten 10 Jahre. (Grafik von HLUg)

Auf Basis der letzten sieben Jahre könnte man annehmen, dass ein aufwärts gerichteter Trend existiert. Wenn man diesen Trend fortschreibt, so erkennt man für die nächsten Jahre ein Problem, denn in der 22. BImSchV ist unter anderem der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert und die Anzahl von Überschreitungen des NO<sub>2</sub>-Stundenmittelwertes limitiert.

Darum ist die Frage nach der Ursache dieses, nicht nur in Hessen zu beobachtenden, NO<sub>2</sub>-Anstiegs an verkehrsnahen Messstellen wichtig.

## 2 Ursachenanalyse

### 2.1 Luftchemie

Folgende drei Reaktionsgleichungen laufen im Wesentlichen im Straßenraum ab [25]:

- a: Photolyse des NO<sub>2</sub> in NO und O bei Strahlung mit Wellenlänge < 410 μm
- b: Rekombination von Sauerstoffatomen (O) mit O<sub>2</sub> zu O<sub>3</sub>
- c: Ozonabbau durch NO in NO<sub>2</sub> und O<sub>2</sub>

Im Folgenden sind Volumenkonzentrationen durch eckige Klammern gekennzeichnet.

In dem für die Ausbreitung in dem Straßenraum relevanten Zeitscale sind dies die entscheidenden Reaktionen, da sie unter den meisten Bedingungen um Größenordnungen schneller ablaufen als konkurrierende Reaktionen, an denen NO, NO<sub>2</sub> oder O<sub>3</sub> beteiligt sind. Als Folge der drei Prozesse a: bis c: stellt sich in kürzester Zeit ein photostationäres Gleichgewicht ein, das durch folgende Gleichgewichtsbeziehungen beschrieben wird:

$$\frac{[O_3] \cdot [NO]}{[NO_2]} = \frac{k_1}{k_3} \quad \text{Gleichung 1}$$

Mit  $k_1$  = NO<sub>2</sub>-Photolysefrequenz  
 $k_3$  = Reaktionskonstante für Reaktion c:

Wenn man diese Beziehung auf Straßenräume mit den halbstündlichen Messungen anwenden will, muss man folgende Probleme lösen:

- Die Beziehung der Gleichung 1 gilt nur am Tage und ist nur für momentane und nicht für zeitlich gemittelte Konzentrationswerte von NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> gültig. Daher kann nicht unbedingt davon ausgegangen werden, dass die Halbstundenmesswerte der Konzentrationen die Gleichgewichtsbeziehung exakt erfüllen, selbst wenn man annimmt, dass außer dem Reaktionszyklus a: bis c: keine anderen Reaktionen die Konzentrationen von NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> bestimmen.
- Die Photolysefrequenz ist im Allgemeinen nicht bekannt.

Deshalb wird die Gleichgewichtsbeziehung anstatt über das Verhältnis der Reaktionskonstanten  $k_1$  und  $k_3$  über eine empirische Größe "PCE"<sup>1</sup> definiert, die aus den Überdach-Konzentrationen<sup>2</sup>  $[NO]^B$ ,  $[NO_2]^B$  und  $[O_3]^B$  in Volumenkonzentrationen, z. B. ppb, bestimmt wird:

$$\frac{[O_3]^B \cdot [NO]^B}{[NO_2]^B} = PCE \quad \text{Gleichung 2}$$

<sup>1</sup> "PCE" = Photochemical Equilibrium

<sup>2</sup> Superscript "B" für Background

In der Abbildung 4 ist diese halbstündliche empirische Größe "PCE" an der urbanen Hintergrundmessstelle "Frankfurt-Ost" dargestellt, um einen Eindruck von der Größenordnung und der Variabilität dieser Gleichgewichtsbeziehung zu vermitteln. Die Station Frankfurt-Ost wurde ausgewählt, weil an dieser Station, im Gegensatz zu den ausgesprochenen Verkehrsmessstellen, alle an der Gleichgewichtsbeziehung beteiligten Größen gemessen wurden.

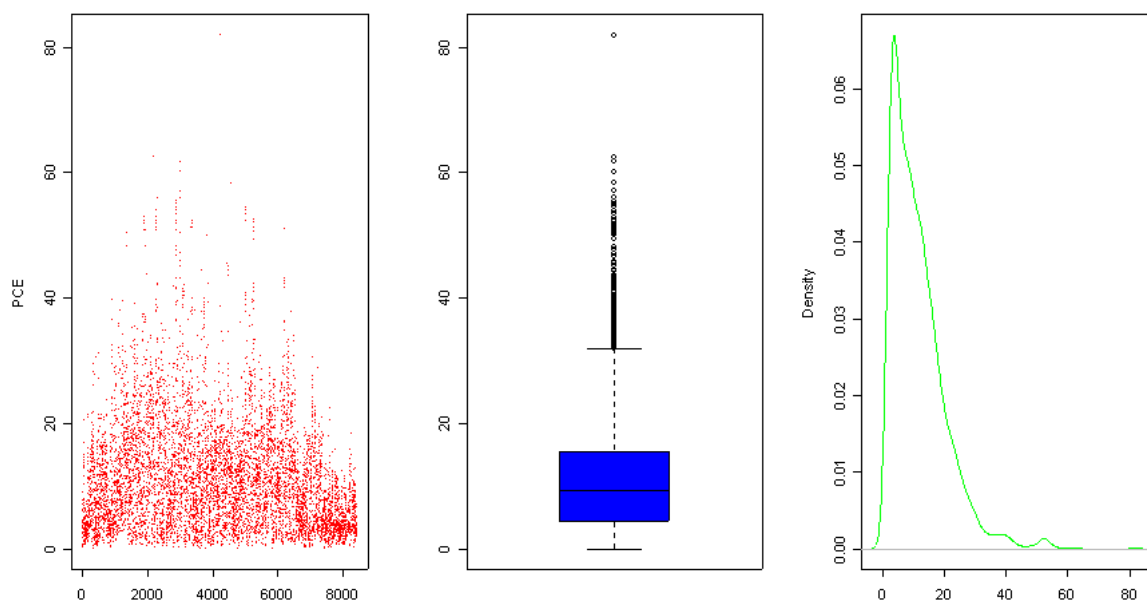


Abbildung 4 Halbstündliches photochemisches Gleichgewicht (PCE) an der Station Frankfurt-Ost im Jahr 2004 tagsüber.

links: PCE über der Zeit in Halbstunden (tagsüber)

mitte: PCE-Box-Plot (blaue Kasten enthält die Hälfte der PCE-Werte)

rechts: PCE-Häufigkeitsdichte

Während eines Jahres beträgt die Variabilität ungefähr zwei Größenordnungen. Man kann also nicht davon ausgehen, dass diese Gleichgewichtsbeziehung über das Jahr auch nur annähernd konstant ist. Diese Gleichgewichtsbeziehung ist nur momentan gültig.

In Städten beobachtet man ein Absinken des  $\text{NO}_x$ -Niveaus, gleichzeitig ein Anstieg des  $\text{O}_3$ -Niveaus, wegen des verminderten Abbaus durch verminderte Angebot an Vorläufersubstanzen, hier besonders das gesunkene  $\text{NO}_x$ -Niveau (Reaktionsgleichung c). Das vermehrte  $\text{NO}_2$ -Niveau lässt sich nach unserer Überzeugung nicht über den Jahresmittelwert der photochemischen Gleichgewichtsbeziehung erklären (siehe [1],[20]).

## 2.2 NO<sub>2</sub>-Direktemission

### 2.2.1 Allgemeines

Gegenwärtig wird allgemein angenommen, dass die Kfz-Auspuffemission von NO<sub>2</sub> bei 5% NO<sub>2</sub> am NO<sub>x</sub> liegt. Diese Annahme ist nach unserer Überzeugung aus zwei Gründen nach oben zu korrigieren:

- Zunahme des Diesel-Anteils und die
- beginnende Ausrüstung der Diesel-Kfz mit Partikelfiltern.

### 2.2.2 Literaturlauswertung

Seit über 20 Jahren findet man in der Literatur Hinweise auf erhöhte NO<sub>2</sub>-Direktemissionen, die vor allem mit der

- Art des Antriebs (Otto bzw. Diesel) und der
- Art der Abgasnachbehandlung

in Verbindung stehen.

Im Jahr 2004 erschien unter der Rubrik "New Directions" in Atmospheric Environment ein Artikel "Should road vehicle emissions legislation consider primary NO<sub>2</sub>?" [5]. Seitdem ist ein Anstieg der Anzahl von Veröffentlichungen zu verzeichnen.

Tabelle 1 gibt einen Eindruck von der Einschätzung des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses in direkten Auspuffemissionen von Kraftfahrzeugen mit Diesel- und Ottoantrieb in einigen veröffentlichten Artikeln. Die Veröffentlichungsliste ist nicht vollständig und bezieht sich auf modellierte Ergebnisse und empirische Untersuchungen.

Tabelle 1 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse der direkten Auspuffemissionen in % aus den Veröffentlichungen ausgewählter Autoren (1. Spalte), Erscheinungsjahr (Spalte 2) aufgeteilt nach Dieselmotoren (3. und 4. Spalte), Ottomotoren (5. und 6. Spalte) und alle Antriebsarten (7. und 8. Spalte).

Autor	Jahr	Dieselmotor		Ottomotor		alle Antriebe	
		von	bis	von	bis	von	bis
AECC	2005	5.0%	21.0%	-	-	-	-
Carslaw	2004a	-	-	-	-	3.2%	23.5%
Carslaw	2005a	12.7%	12.7%	0.6%	0.6%	-	-
Carslaw	2005b	1.0%	26.6%	0.6%	20.8%	-	-
Jenkin	2004b	-	-	-	-	1.2%	11.8%
Lenner	1983	-	-	2.5%	30.0%	-	-
Lenner	1987	20.0%	40.0%	-	-	-	-
Ling <sup>3</sup>	2003	10.0%	50.0%	-	-	-	-
Soltic <sup>4</sup>	2003	-	-	5.3%	38.0%	-	-
Yamartino	1986	-	-	-	-	8.7%	8.7%

Die NO<sub>2</sub>-Direktemissionsanteile aus Tabelle 1 liegen i.d.R. deutlich über den bisher in Modellrechnungen verwendeten 5%.

<sup>3</sup> Nur Busse mit Partikelfilter

<sup>4</sup> Leichte Nutzfahrzeuge

### 2.2.3 Emissionsfaktoren für $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis

Aus einer neueren Publikation in Atmospheric Environment [7] liegen geschwindigkeitsabhängige Emissionsfaktoren für das  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis von 6 Kfz-Typen und 3 Emissionsminderungsstufen (vor Euro 1, Euro 1, Euro 2) vor. Wenn man dieses Schema auf die Friedberger Landstrasse im Jahr 2000 anwenden will, muss man die neueren Emissionsminderungsstufen und die Diesel-PKW berücksichtigen. Dazu werden die neueren Emissionsminderungsstufen gleich den Euro 2-Fahrzeugen gesetzt und die Diesel-PKW vernachlässigt, weil für den Kfz-Typ Diesel-PKW keine Emissionsfaktoren angegeben werden.

In Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis und Geschwindigkeit mit der Verkehrszusammensetzung von 2000 auf der Friedberger Landstraße dargestellt.

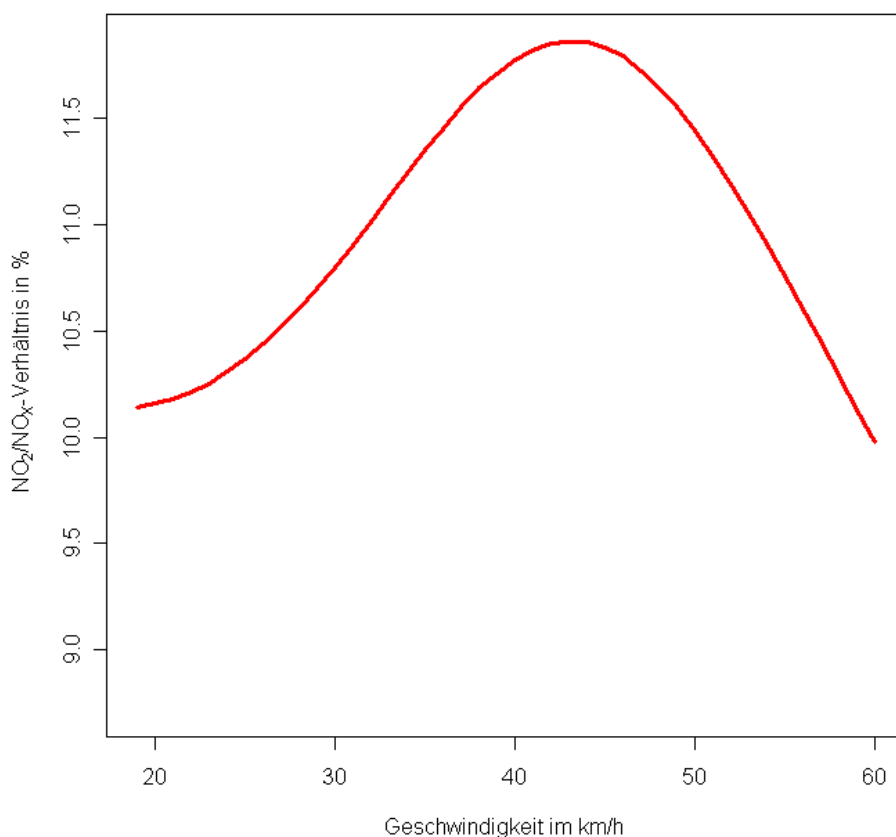


Abbildung 5  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis in der Friedberger Landstraße im Jahre 2000 über der Fahrgeschwindigkeit, modelliert nach [7].

Man erkennt in der Abbildung 5, dass das Verhältnis der  $\text{NO}_2$ - zu den  $\text{NO}_x$ -Emissionen mit der Geschwindigkeit zu- und dann wieder abnimmt. Das Maximum des Verhältnisses liegt zwischen 40 und 50 km/h, das heißt gerade in dem Geschwindigkeitsbereich, der in Innenstadtstraßen gefahren wird. Bei einer mittleren effektiven Geschwindigkeit von 40 km/h ergibt sich ein  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Masseverhältnis von im Mittel 11.6 %.



### 3 Variation der NO<sub>2</sub>-Direktemission

#### 3.1 Allgemeines

Im letzten Jahr wurde anlässlich der Erstellung des Luftreinhalteplans "Rhein-Main" mit Modellen eine Untersuchung der Luftschadstoff-Immissionen in 15 Straßenschluchten durchgeführt [11]. Es handelt sich hierbei um eine Kombination des RCG-Modells [24] für die Vorbelastung mit dem CPB-Modell [19] für die Straßenraum-Immissionen.

Hierbei wurde unter anderem die Friedberger Landstraße in Frankfurt untersucht. Auf diese Ergebnisse wird im Rahmen dieser Untersuchung zurückgegriffen.

#### 3.2 Zu untersuchende Szenarien

Der Basislauf wurde mit 8.66% primärer NO<sub>2</sub>-Emission durchgeführt, das ergibt eine Zeitreihe mit stündlichen NO<sub>2</sub>-Immissionen an dem Messrezeptor.

In den zu untersuchenden Szenarien wurde dieser Prozentsatz folgendermaßen variiert:

$$pNO_{2,i}: 5\%, 7.5\%, 10\%, 12.5\%, 15\%, 17.5\% \text{ und } 20\%.$$

Diese Variation hat auch Auswirkungen auf den Hintergrund, eine Neuberechnung mit RCG scheidet aus Aufwandsgründen aus. Die RCG-Ergebnisse wurden darum folgendermaßen korrigiert.

Die RCG-Ausgangswerte bei 8.66% Primäremission NO<sub>2</sub> sind [NO]<sup>B</sup>, [NO<sub>2</sub>]<sup>B</sup> und [O<sub>3</sub>]<sup>B</sup>. Die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Hintergrund aus dem Verkehr machen 42.1% aus, sie werden mit dem subscript "V" gekennzeichnet:

$$[NO_2]_V^B = 0.421 \cdot [NO_2]^B$$

Es wird jetzt die Überdachkonzentration von NO<sub>2</sub>, die aus den Direktemissionen des Verkehr stammt, um den Betrag multiplikativ angehoben/abgesenkt um den in den Straßenschluchten mehr/weniger NO<sub>2</sub> emittiert wird.

$$[NO_2]_V^{B,Direkt_i} = [NO_2]_V^B \cdot pNO_{2,i}/8.66 \cdot pNO_{2,i}$$

Hierbei wird angenommen, dass der photochemisch gebildete Anteil sich nach der folgenden Formel ergibt.

$$[NO_2]_V^{B,Chemie_i} = [NO_2]_V^B \cdot (1-pNO_{2,i})$$

Dann ergibt sich

$$[NO_2]_i^B = [NO_2]_V^{B,Direkt_i} + [NO_2]_V^{B,Chemie_i} + (1-0.421) \cdot [NO_2]^B$$

Die [NO<sub>x</sub>]-Konzentration im Hintergrund bleibt gleich, d.h. es wird die [NO]-Konzentration um den entsprechenden Betrag angepasst.

Die O<sub>3</sub>-Konzentrationen bleiben unverändert.

Dieses Vorgehen ist selbstverständlich nur eine erste Approximation, eine korrekte Behandlung wäre über eine Neuberechnung mit RCG/CPB oder durch den Einsatz eines chemischen Box-Modells möglich.

### 3.3 Das photochemische Modul von CPB

Das CPB-Modell wurde ursprünglich für die Modellierung der Konzentrationsverteilung nicht-reaktiver Schadstoffe konzipiert. Da aber unter lufthygienischen Gesichtspunkten insbesondere das hochtoxische  $\text{NO}_2$  eine wichtige Rolle spielt, wurde zusätzlich ein dem CPB nachgeschaltetes Modul entwickelt, das aus berechneten  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen, als Summe aus  $\text{NO}$  und  $\text{NO}_2$ , und über Dach-Konzentrationen von  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$  eine Abschätzung der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen in der Straßenschlucht erlaubt.

Der Ansatz entspricht weitgehend dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Modell.

Die  $\text{NO}_2$ -Konzentration in der Straßenschlucht setzt sich zusammen aus der Hintergrundkonzentration  $[\text{NO}_2]^B$ , dem direkt von den Fahrzeugen emittierten Anteil  $[\text{NO}_2]^V$  und dem durch chemische Umwandlungen produzierten  $\text{NO}_2$ -Anteil  $[x]$ .

Der emittierte  $\text{NO}_2$ -Anteil kann direkt aus der mit dem CPB-Modell berechneten  $\text{NO}_x$ -Konzentration bestimmt werden (V für vehicle):

$$[\text{NO}_2]^V = f \cdot [\text{NO}_x]^V \quad \text{Gleichung 3}$$

Wobei  $f$  den Anteil des direkt emittierten  $\text{NO}_x$  angibt.

Die  $\text{NO}$ -Konzentration ergibt sich dann aus:

$$[\text{NO}]^V = (1-f) \cdot [\text{NO}_x]^V \quad \text{Gleichung 4}$$

Jetzt muss noch der durch chemische Reaktionen erzeugte  $\text{NO}_2$ -Anteil bestimmt werden. Unter der Voraussetzung, dass die in der Straßenschlucht ablaufenden chemischen Reaktionen durch den Reaktionszyklus a: bis c: beschrieben werden können und dass die aus den Überdachkonzentrationen abgeleitete Gleichgewichtsbeziehung zwischen  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_3$  auch innerhalb der Straßenschlucht gilt, lassen sich die Konzentrationen (T für Total) durch folgende Ausdrücke beschreiben:

$$\begin{aligned} [\text{NO}_2]^T &= [\text{NO}_2]^B + [\text{NO}_2]^V + [x] \\ [\text{NO}]^T &= [\text{NO}]^B + [\text{NO}]^V - [x] \\ [\text{O}_3]^T &= [\text{O}_3]^B - [x] \end{aligned} \quad \text{Gleichung 5}$$

Die Produktion eines  $\text{NO}_2$ -Moleküls geht also Hand in Hand mit der Vernichtung eines  $\text{NO}$ - und eines  $\text{O}_3$ -Moleküls.

Die Gleichung 5 in 1 eingesetzt ergibt:

$$\frac{([\text{NO}]^B + [\text{NO}]^V - [x]) \cdot ([\text{O}_3]^B - [x])}{[\text{NO}_2]^B + [\text{NO}_2]^V + [x]} = PCE \quad \text{Gleichung 6}$$

Mit der Lösung:  $[x] = \frac{b}{2} - \sqrt{\frac{b^2}{4} - c}$  Gleichung 7

mit  $b = [\text{NO}]^B + [\text{O}_3]^B + R + [\text{NO}]^V$

und  $c = [\text{O}_3]^B \cdot [\text{NO}]^V - R \cdot [\text{NO}_2]^V$ .

Für  $c > 0$  (viel NO) ist  $[x]$  positiv, es wird also  $\text{NO}_2$  produziert. Dies wird in Straßenschluchten in der Regel der Fall sein. Für  $c < 0$  (wenig NO) bedeutet dagegen, dass sogar  $\text{NO}_2$  zerstört werden muss, um die Gleichgewichtsbeziehung zu erfüllen.

Exakterweise gelten die Beziehungen nur unter der Voraussetzung, dass das photochemische Gleichgewicht im Vergleich zur Verweilzeit der Moleküle in der Straßenschlucht schnell erreicht wird. Da dies nicht unbedingt der Fall ist, müsste die chemische Produktion von  $\text{NO}_2$  in Abhängigkeit von der Transportzeit der Moleküle behandelt werden. Sensitivitätsanalysen haben aber gezeigt, dass die Modellergebnisse nur unwesentlich von dieser Zeitabhängigkeit beeinflusst werden.

### 3.4 Ergebnisse

Die folgenden Tabellen und Grafiken enthalten Basisstatistiken der unten beschriebenen Größen:

- $\text{NO}_{\text{RCG}}^{\text{B}}$ : modifizierte (siehe Kapitel 3.2) NO-Konzentration über der Straße aus dem RCG-Modell
- $\text{NO}_{2,\text{RCG}}^{\text{B}}$ : modifizierte (siehe Kapitel 3.2)  $\text{NO}_2$ -Konzentration über der Straße aus dem RCG-Modell
- $\text{O}_{3,\text{RCG}}^{\text{B}}$ : modifizierte (siehe Kapitel 3.2)  $\text{O}_3$ -Konzentration über der Straße aus dem RCG-Modell
- $\text{NO}_{\text{X},\text{CPB}}^{\text{Z}}$ :  $\text{NO}_x$ -Konzentration in der Straßenschlucht aus dem Verkehr (Zusatzbelastung mit CPB)
- $\text{NO}_{\text{T}}$ : Gesamte modellierte NO-Konzentration an der Straßenmessstelle
- $\text{NO}_{2,\text{T}}$ : Gesamte modellierte  $\text{NO}_2$ -Konzentration an der Straßenmessstelle
- $\text{O}_{3,\text{T}}$ : Gesamte modellierte  $\text{O}_3$ -Konzentration an der Straßenmessstelle

Es sind die Ergebnisse für  $\text{NO}_2$ -Direktemissionen von 5%, 12.5% und 20% enthalten, denn die Zwischenstufen verändern sich annähernd linear.

Tabelle 2 Statistische Kennwerte der oben beschriebenen Größen mit 5%  $\text{NO}_2$ -Direktemission

	$\text{NO}_{\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{NO}_{2,\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{O}_{3,\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{NO}_{\text{X},\text{CPB}}^{\text{Z}}$	$\text{NO}_{\text{T}}$	$\text{NO}_{2,\text{T}}$	$\text{O}_{3,\text{T}}$
Minimum	0.7	2.1	0.0	3.2	1.1	7.1	0.0
1.Quantil	4.5	21.3	18.4	23.0	13.9	44.4	6.3
Median	8.3	33.7	41.7	52.8	33.6	58.2	20.4
Mittelwert	12.3	38.2	46.8	74.2	46.9	59.2	28.7
3.Quantil	13.1	51.3	68.0	102.3	64.3	72.1	42.5
Maximum	235.4	158.9	203.5	497.5	349.1	161.4	173.0
Alle Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mit 6445 Beobachtungen							

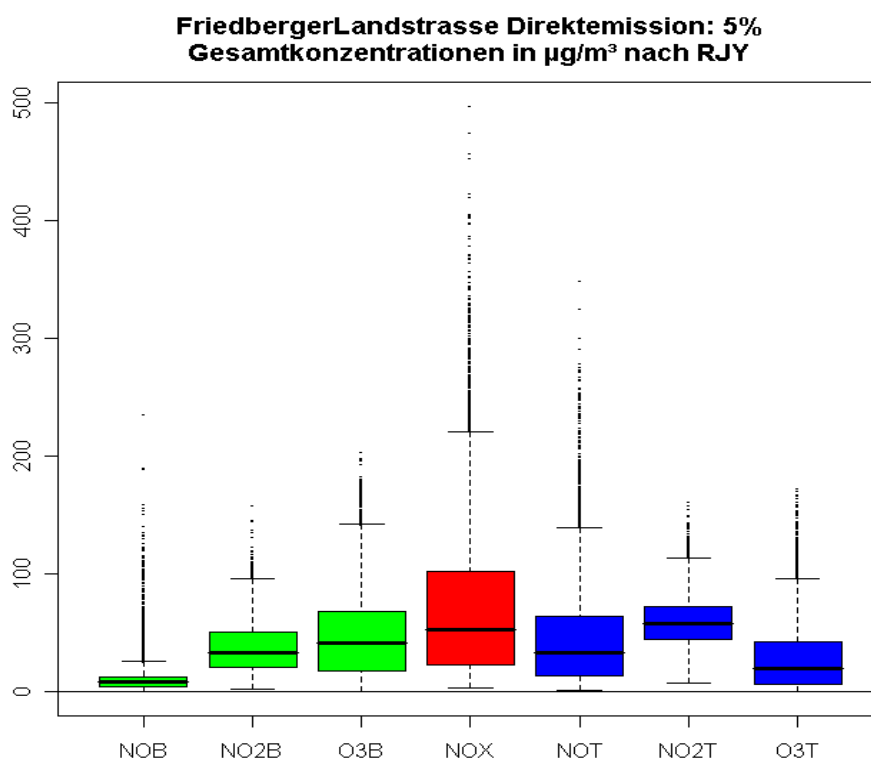


Abbildung 6 Boxplot für 5%-Direktemission. Die Größen entsprechen denen aus Tabelle 2. Die farbige Box enthält die Hälfte der Stundenwerte (zwischen 1. und 3. Quartil), das 2. Quartil (Median) ist durch einen fetten horizontalen Strich gekennzeichnet.

Tabelle 3 Statistische Kennwerte der oben beschriebenen Größen mit 12.5%  $\text{NO}_2$ -Direktemission

	$\text{NO}_{\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{NO}_{2,\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{O}_{3,\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{NO}_{\text{CPB}}^{\text{Z}}$	$\text{NO}_{\text{T}}$	$\text{NO}_{2,\text{T}}$	$\text{O}_{3,\text{T}}$
Minimum	0.0	2.1	0.0	3.2	0.4	7.4	0.0
1.Quantil	3.7	22.0	18.4	23.0	12.1	46.9	6.5
Median	7.7	34.8	41.7	52.8	31.0	63.2	21.7
Mittelwert	11.4	39.4	46.8	74.2	43.2	64.8	29.9
3.Quantil	12.2	53.0	68.0	102.3	59.9	80.1	44.4
Maximum	233.5	164.0	203.5	497.5	327.8	175.0	174.3

Alle Konzentrationen in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  mit 6445 Beobachtungen

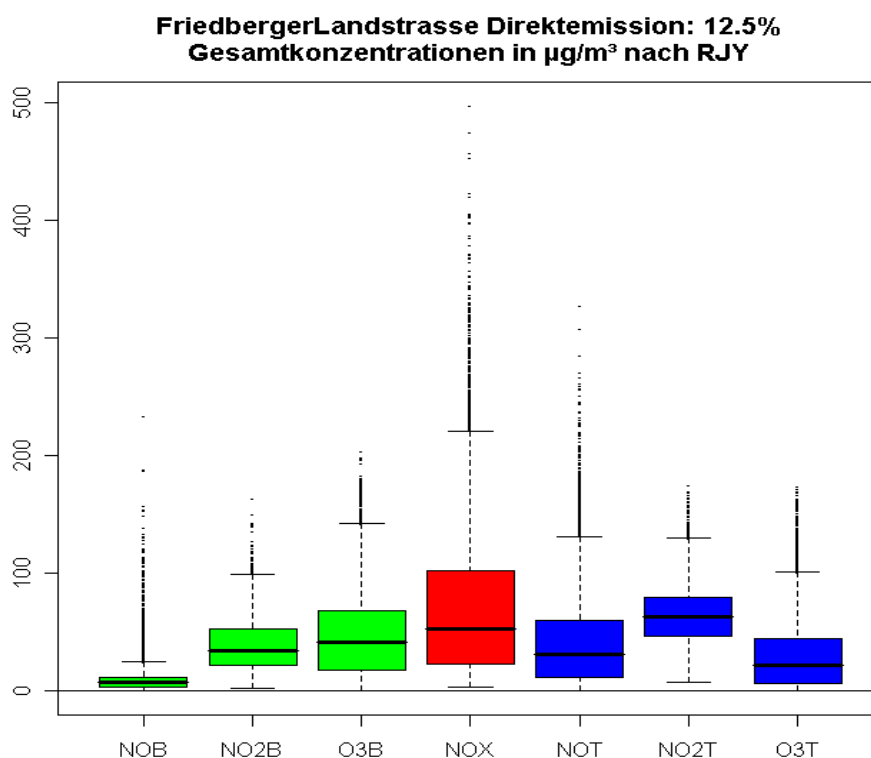


Abbildung 7 Boxplot für 12.5%-Direktemission. Die Größen entsprechen denen aus Tabelle 3. Die farbige Box enthält die Hälfte der Stundenwerte (zwischen 1. und 3. Quartil), das 2. Quartil (Median) ist durch einen fetten horizontalen Strich gekennzeichnet.

Tabelle 4 Statistische Kennwerte der oben beschriebenen Größen mit 20%  $\text{NO}_2$ -Direktemission

	$\text{NO}_{\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{NO}_{2,\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{O}_{3,\text{RCG}}^{\text{B}}$	$\text{NO}_{\text{CPB}}^{\text{Z}}$	$\text{NO}_{\text{T}}$	$\text{NO}_{2,\text{T}}$	$\text{O}_{3,\text{T}}$
Minimum	0.0	2.3	0.0	3.2	0.0	8.1	0.0
1.Quantil	1.6	23.9	18.4	23.0	8.0	52.0	5.4
Median	6.2	37.6	41.7	52.8	26.1	71.2	21.2
Mittelwert	9.4	42.5	46.8	74.2	37.4	73.8	29.7
3.Quantil	10.0	57.1	68.0	102.3	53.0	91.6	45.0
Maximum	228.3	178.0	203.5	497.5	303.4	208.1	175.0
Alle Konzentrationen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mit 6445 Beobachtungen							

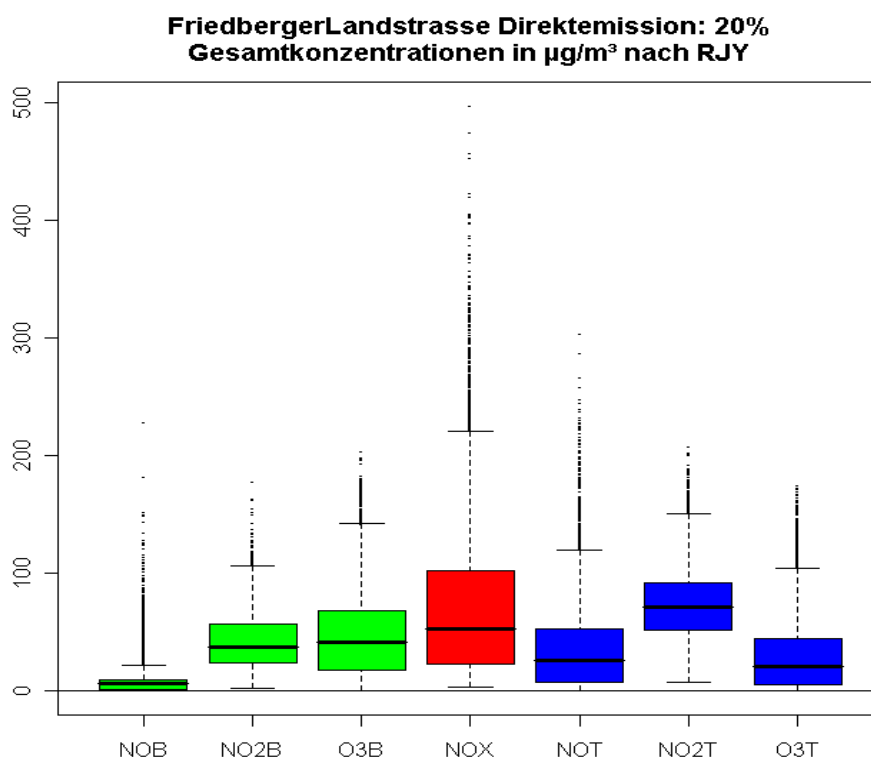
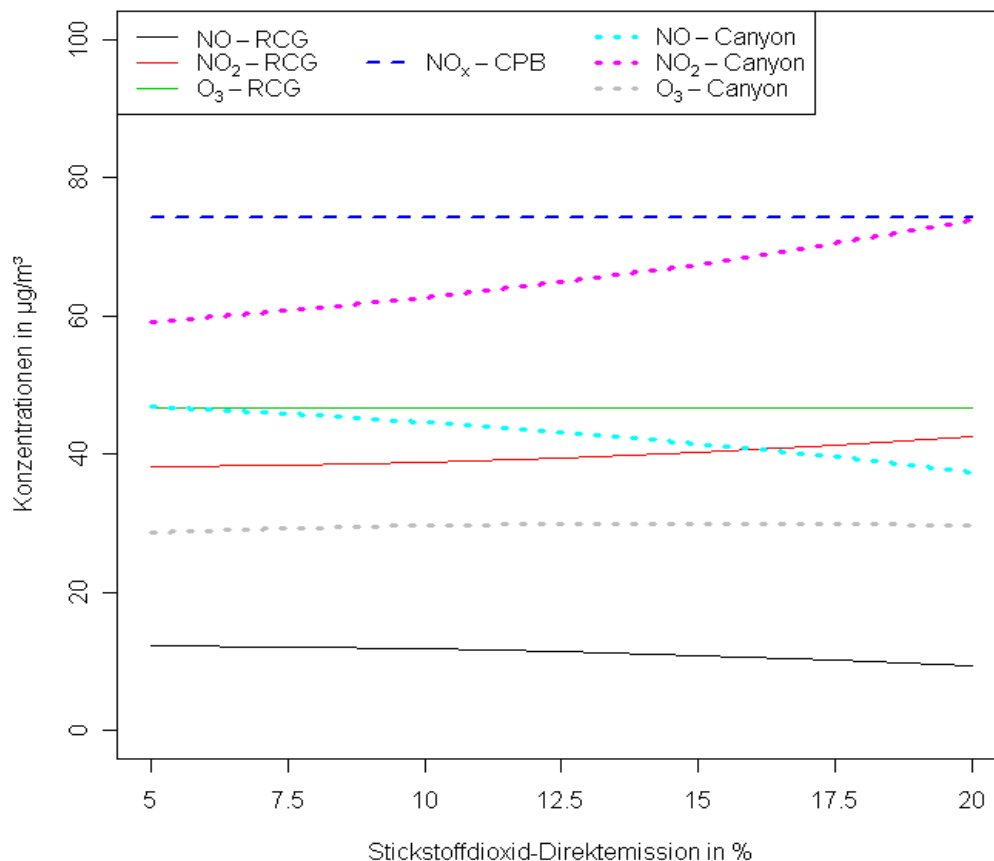


Abbildung 8 Boxplot für 20%-Direktemission. Die Größen entsprechen denen aus Tabelle 4. Die farbige Box enthält die Hälfte der Stundenwerte (zwischen 1. und 3. Quartil), das 2. Quartil (Median) ist durch einen fetten horizontalen Strich gekennzeichnet.

Die Abbildung 9 zeigt eine Zusammenfassung der Jahresmittelwerte für verschiedene  $\text{NO}_2$ -Direktemissionen zwischen 5% und 20% für die Friedberger Landstraße.



**Abbildung 9** Zusammenfassung der Jahresmittelwerte für verschiedene NO<sub>2</sub>-Direktemissionen zwischen 5% und 20% für die Friedberger Landstraße. Die durchgezogenen Linien stellen den modifizierten RCG-Hintergrund dar. NO fällt ab, NO<sub>2</sub> steigt an, O<sub>3</sub> bleibt konstant, wie in Kapitel 3.2 dargestellt. Die gestrichelte blaue Linie bezeichnet die berechneten NO<sub>x</sub>-Zusatzkonzentration an dem Messrezeptor. Die gepunkteten Linien stellen die gesamten NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>-Konzentrationen am Messrezeptor dar.

## 4 Bewertung

In der Friedberger Landstraße 2000 wurde ein  $\text{NO}_2$ -Jahresmittelwert von  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gemessen. Mit dem kombinierten RCG/CPB-Modell kann dieser Wert bei einer  $\text{NO}_2$ -Direktemission zwischen 15% und 17.5% der  $\text{NO}_x$ -Emissionen abgebildet werden (siehe Abbildung 9). Aus der Emissionsfaktorbetrachtung (siehe Kapitel 2.2.3) ergibt sich eine  $\text{NO}_2$ -Direktemission zwischen 11% und 12% der  $\text{NO}_x$ -Emissionen.

In beiden Fällen ergibt sich ein Wert der deutlich über den 5% liegt, die bisher per Konvention in Modellrechnungen verwendet wurden. Es wird empfohlen, in künftigen Modellrechnungen von mindestens 11%  $\text{NO}_2$ -Direktemission der  $\text{NO}_x$ -Emissionen auszugehen.

Die Ursache für die in den letzten Jahren an verkehrsnahen Messstellen festzustellende Zunahme der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen ist in erster Linie auf die Zunahme des Dieselanteils an der Kfz-Flotte zurückzuführen, denn in den Abgasen von Dieselmotoren wird in der Regel ein höheres  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis registriert als bei Otto-Motoren. Der durchschnittliche Dieselanteil in der Flotte hat sich in den letzten fünf Jahren verdoppelt, heute hat nahezu jedes zweite neu zugelassene Fahrzeug einen Dieselmotor.

Verschärft wird das Problem der Zunahme der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen an verkehrsnahen Messstellen durch zwei Tendenzen:

- der weiter zunehmende Dieselanteil an der Fahrzeugflotte und
- die gerade einsetzende Ausrüstung der Dieselmotoren mit Partikelfiltern, von denen angenommen wird, ein gegenüber Dieselmotoren ohne Russfilter erhöhtes  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis zu haben.

Zwar ist heute das Hauptproblem der Luftreinhaltung in der öffentlichen Wahrnehmung die Einhaltung der  $\text{PM}_{10}$ -Grenzwerte, aber es ist absehbar, dass der  $\text{NO}_2$ -Grenzwert zum gleichberechtigten Problem werden dürfte.



## 5 Literatur

- [1] AECC, 2005  
NO<sub>2</sub> Emissions  
<http://www.aecc.be/Information/NO2%20Emissions%20141204.pdf>, April 2005
- [2] Berkowicz, R.; Hertel, O.; Larsen, S.E.; Sorensen, N.N.; Nielsen, M., 199a7  
Modelling traffic pollution in streets  
Ministry of Environment and Energy, National Environmental Research Institute, January 1997
- [3] Brown, R.J.; Woodfield, P.L., 2004  
Prediction of short-range maximum NO<sub>2</sub> concentrations using scalar PDFS  
Atmospheric Environment Vol.38, pp 1379-1386, 2004
- [4] Carslaw, D.C.; Beevers, S.D.; 2004a  
Investigating the potential importance of primary NO<sub>2</sub> emissions in an street canyon  
Atmospheric Environment Vol.38, pp 3585-3594, 2004
- [5] Carslaw, D.C.; Beevers, S.D.; 2004b  
New Directions: Should road vehicle emissions legislation consider primary NO<sub>2</sub>?  
Atmospheric Environment Vol.38, pp 1233-1234, 2004
- [6] Carslaw, D.C.; Beevers, S.D.; 2005a  
Estimations of Road vehicle primary NO<sub>2</sub> exhaust emission fractions using monitoring data in London  
Atmospheric Environment Vol.39, pp 167-177, 2005
- [7] Carslaw, D.C.; Beevers, S.D.; 2005b  
Development of an urban inventory for road transport emissions of NO<sub>2</sub> and comparison with estimates derived from ambient measurements  
Atmospheric Environment Vol.39, pp 2049-2059, 2005
- [8] Clapp, L.; Jenkin, M.E., 2001  
Analysis of the relationship between ambient levels of O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> and NO as a function of NO<sub>x</sub> in the UK  
Atmospheric Environment Vol.35, pp 6391-6405, 2001
- [9] Cole, H.S. and Summerhays J.E., 1979  
A review of techniques available for estimating short-term NO<sub>2</sub> concentrations  
Journal of Air Pollution Control Association, 29, 812-817
- [10] Fraigneau, Y.; Gonzales, M.; Coppalle, A., 1996  
The influence of turbulence upon the chemical reaction of nitric oxide released from a ground source into ambient ozone  
Atmospheric Environment Vol.30, pp 1467-1480, 1996
- [11] IVU/TRUMF, 2004  
Ausbreitungsrechnungen als Beitrag zur Ursachenanalyse im Ballungsraum Rhein-Main  
Bericht im Auftrag der HLUG, Mai 2004
- [12] Jenkin, M.E., 2004  
Analysis of sources and partitioning of oxidant in the UK – Part 1: the NO<sub>x</sub>-dependence of annual mean concentrations of nitrogen dioxide and ozone  
Atmospheric Environment Vol.38, pp 5117-5129, 2004
- [13] Jenkin, M.E., 2004b  
Analysis of sources and partitioning of oxidant in the UK – Part 2: contributions of nitrogen dioxide emissions and background ozone at a kerbside location in London  
Atmospheric Environment Vol.38, pp 5131-5138, 2004
- [14] Kurtenbach, R.; Becker, K.H.; u.a., 2001  
Investigations of emissions and heterogeneous formation of HONO in a road traffic tunnel  
Atmospheric Environment Vol.35, pp 3385-3394, 2001



- [15] Lenner, M.; Lindquist, O., 1983  
The NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio in emissions from gasoline-powered cars: high NO<sub>2</sub> percentage in idle engine measurements  
Atmospheric Environment Vol.17, pp 1395-1398, 1983
- [16] Lenner, M., 1987  
Nitrogen dioxide in exhaust emissions from motor vehicles  
Atmospheric Environment Vol.21, pp 37-43, 1987
- [17] Ling, J.v.; Helden, R.v., 2003  
Comparison of the Particle Size Distribution  
TNO Automotive, Auto Technology 5/2003
- [18] Mielicke, U.; Ahrens, D.; Scholz, W., 2004: Entwicklung der Stickstoffdioxid-Immissionen in Baden-Württemberg zwischen 1995 und 2003, Datenauswertung des Luftmessnetzes – Kurzfassung der Ergebnisse  
Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Juni 2004
- [19] Ostmann, C., Stern, R., Wiegand, G. (1996)  
Canyon Plume Box Modell, Version 3, Release 8, Handbuch. IVU Gesellschaft für Informatik, Verkehrs- und Umweltplanung mbH. Abschlussbericht zum FE-Vorhaben 104 02 811 des Umweltbundesamts, Berlin
- [20] Rabl, P.; Scholz, W., 2005: Wechselbeziehung zwischen Stickstoffdioxid- und Ozon-Immissionen, Datenanalysen aus Baden-Württemberg und Bayern 1990-2003  
Immissionsschutz, 2005/1
- [21] Reich, T., 2004  
Analyse der erhöhten Stickstoffdioxidbelastung an Hamburger Verkehrsmessstationen 2002 und 2003  
Institut für Hygiene und Umwelt, HU430, Mai 2004
- [22] Soltic, P.; Weilenmann, M., 2002  
Partitioning of NO<sub>x</sub> Emissions for Gasoline Passenger Cars and Light Duty Trucks  
11<sup>th</sup> International Symposium "Transport and Air Pollution", 19.-21-Juni 2002, Graz, Austria
- [23] Soltic, P.; Weilenmann, M., 2003  
NO<sub>2</sub>/NO emissions of gasoline passenger cars and light-duty trucks with Euro-2 emissions standard  
Atmospheric Environment Vol.37, pp 5207-5216, 2003
- [24] Stern, R. (2003)  
Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“
- [25] Yamartino, R. J., Wiegand, G., 1986  
Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon  
Atmospheric Environment Vol.20, No.11, pp 2137-2156, 1986
- [26] Yamartino, R.J., 1989  
Modification of highway air pollution models for complex site geometries Volume 1, Data Analyses and Development of the CPB 3 Model  
TIDG Document No. R8806-002-RD, 1989