

ifeu -  
Institut für Energie-  
und Umweltforschung  
Heidelberg GmbH



# Auswirkungen zukünftiger NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des Kfz-Verkehrs auf die Luftqualität in hoch belasteten Straßen in Baden-Württemberg

Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-  
Württemberg

Frank Dünnebeil  
Udo Lambrecht  
Alexander Schacht  
IFEU Heidelberg

unter Mitwirkung von  
Christoph Kessler, AVISO, Aachen

ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH  
Wilckensstr. 3, D – 69120 Heidelberg  
Tel.: +49/(0)6221/4767-0, Fax: +49/(0)6221/4767-19  
E-mail: ifeu@ifeu.de, Website: www.ifeu.de

**Heidelberg, Februar 2010**

## **Impressum**

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Gutachtens liegt bei den Autoren. Die hier dargestellten Ansichten müssen nicht mit denjenigen des Auftraggebers übereinstimmen.

Bearbeiter der Studie: Dipl.-Ing. Frank Dünnebeil, Dipl.-Phys. Udo Lambrecht und Dipl.-Geogr. Alexander Schacht (alle IFEU Heidelberg) unter Mitwirkung von Dr.-Ing. Christoph Kessler (AVISO, Aachen)

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH,  
Wilckensstr. 3, D-69120 Heidelberg; Tel. 06221-4767-0; Fax -4767-19;  
E-Mail: [verkehr@ifeu.de](mailto:verkehr@ifeu.de); Internet: [www.ifeu.de](http://www.ifeu.de)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Hintergrund und Ziel der Studie .....</b>	<b>3</b>
<b>Immissionsbelastung an den untersuchten Messstationen .....</b>	<b>5</b>
1. Die NO <sub>x</sub> -Emissionen des lokalen Verkehrs sind Hauptverursacher der NO <sub>x</sub> -Konzentrationen an den vier Verkehrsmessstationen .....	5
2. Die NO <sub>x</sub> -Emissionen des lokalen Verkehrs sind auch Hauptverursacher der NO <sub>2</sub> -Belastung an den vier Verkehrsmessstationen. Die städtische Hintergrundbelastung trägt zur NO <sub>2</sub> -Belastung stärker bei als bei NO <sub>x</sub> .....	6
3. Erhöhte lokale NO <sub>2</sub> -Beiträge können auch bei niedrigen NO <sub>x</sub> -Beiträgen als Folge hoher NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnisse auftreten.....	7
4. An allen Messstationen hat neben dem lokalen Verkehr auch der Beitrag aus dem städtischen Hintergrund einen relevanten Anteil an der NO <sub>2</sub> -Konzentration. Die Höhe der Beiträge des lokalen Verkehrs und des städtischen Hintergrunds unterscheidet sich stark zwischen den Stationen. ....	8
<b>Analyse der Ozonmessdaten an den Messstationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße .....</b>	<b>9</b>
5. Die Ozonkonzentrationen im städtischen Hintergrund in Freiburg waren im Untersuchungszeitraum höher als in Stuttgart. ....	9
6. Der Ozonabbau an der Verkehrsmessstation war in Freiburg-Schwarzwaldstraße in allen untersuchten Monaten höher als in Stuttgart-Mitte. ....	9
7. Der Beitrag der Reaktion des lokal emittierten NO mit Ozon zur NO <sub>2</sub> -Belastung an straßennahen Messstationen kann anhand von Ozonmessdaten abgeschätzt werden .....	11
8. Anteile und Höhe der NO <sub>2</sub> -Konzentration aus dem städtischen Hintergrund, dem Ozonabbau sowie den primären NO <sub>2</sub> -Emissionen variieren stark im Tagesverlauf. ....	12
9. Der Anteil des bei der Reaktion von NO aus lokalen Kfz-Abgasen mit Ozon gebildeten NO <sub>2</sub> an der NO <sub>2</sub> -Konzentration lag in Freiburg -Schwarzwaldstraße deutlich höher als in Stuttgart-Mitte.....	14
<b>NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des lokalen Verkehrs 2008-2020.....</b>	<b>17</b>
10. Die NO <sub>x</sub> - und NO <sub>2</sub> -Emissionen des lokalen Verkehrs wurden auf Basis lokaler Verkehrszähl- und aktueller Emissionsfaktoren ermittelt .....	17
11. Die Höhe der lokalen NO <sub>x</sub> - und NO <sub>2</sub> -Emissionen hängt entscheidend von Verkehrsmenge und Verkehrszusammensetzung ab. ....	18
12. Bis zum Jahr 2020 werden die NO <sub>x</sub> -Emissionen stark zurückgehen. Die NO <sub>2</sub> -Emissionen werden erst nach dem Jahr 2010 abnehmen.....	20
<b>Ursachen der NO<sub>2</sub>-Belastung im Jahr 2008.....</b>	<b>21</b>
13. Die Beiträge der Kraftfahrzeugarten zur NO <sub>2</sub> -Belastung können auf Basis von Emissionsberechnung und Immissionsanalysen abgeschätzt werden.....	21
14. An den Messstationen in Stuttgart und Karlsruhe trug primäres NO <sub>2</sub> stärker zur Belastung bei als NO <sub>2</sub> aus der lokalen luftchemischen NO <sub>2</sub> -Bildung. In Freiburg waren die Beiträge beider Ursachen ähnlich hoch. ....	22
15. Der Pkw-Verkehr war an allen vier Verkehrsmessstationen Hauptverursacher der lokalen Beiträge zur NO <sub>2</sub> -Konzentration. In Freiburg und Stuttgart-Mitte kamen größere Beiträge zur NO <sub>2</sub> -Immission auch aus dem Lkw- bzw. Bus-Verkehr.....	23

<b>Modellierung der aktuellen und zukünftigen NO<sub>2</sub>-Immission</b> .....	<b>25</b>
16. Die zukünftigen NO <sub>2</sub> -Konzentrationen an den untersuchten Verkehrsmessstationen wurden mit einem chemischen Boxmodell berechnet.....	25
17. Die zukünftigen städtischen Hintergrundkonzentrationen wurden auf Grundlage von Ergebnissen im Rahmen eines UBA-Vorhabens ermittelt und hier zugrunde gelegt .....	26
18. Im Trendfall kann im Jahr 2015 der NO <sub>2</sub> -Jahresgrenzwert an der Station Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße nahezu erreicht werden. Die beiden untersuchten Stuttgarter Messstationen liegen auch im Jahr 2020 über 40 µg/m <sup>3</sup> .....	27
19. Bis zum Jahr 2020 gehen vor allem städtischer Hintergrund und lokale luftchemische NO <sub>2</sub> -Beiträge zurück, Minderungen bei primärem NO <sub>2</sub> erfolgen erst nach 2010. Die lokalen Immissionsbeiträge aus dem Pkw-Verkehr werden langsamer abnehmen als diejenigen aus dem Schwerverkehr mit Lkw und Bus. ....	28
<b>Auswirkungen einer Euro-6/VI-Flotte auf die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen und auf die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen an der Luftmessstation Stuttgart-Neckartor</b> .....	<b>30</b>
20. Die NO <sub>x</sub> -Emissionen sind im Euro 6/VI-Szenario um 41% niedriger als im Trend 2020, bei den NO <sub>2</sub> -Emissionen ist die zusätzliche Minderung 45%. ....	30
21. Der NO <sub>2</sub> -Jahresgrenzwert wird an der Messstation Stuttgart-Neckartor auch bei Annahme einer Kfz-Flotte mit ausschließlich Euro-6/VI-Fahrzeugen nicht erreicht. ....	31
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>32</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>34</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>35</b>
22. Die Verwendung aktueller NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktoren und aktualisierter Flottenzusammensetzungen führt zu neuen Erkenntnissen über die Beiträge der Fahrzeugkategorien zu den lokalen NO <sub>x</sub> - und NO <sub>2</sub> -Emissionen. ....	35
23. Die NO <sub>2</sub> -Quellenanalysen auf Basis der Emissionsberechnungen zeigen im Jahresmittel eine gute Übereinstimmung mit den Auswertungen der Ozonmessdaten. ....	37
24. Tagesgänge der NO <sub>2</sub> -Gesamtmission mit Beiträgen einzelner Ursachen an den Stationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße .....	39

## Hintergrund und Ziel der Studie

Ab dem Jahr 2010 gelten in der EU zwei Luftqualitätsgrenzwerte für Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ). Im Jahresmittel darf eine  $\text{NO}_2$ -Konzentration von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschritten werden, der Ein-Stunden-Mittelwert darf nicht mehr als 18-mal pro Jahr den Wert von  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  übersteigen (EU-Richtlinie 1999/30/EG). Unter bestimmten Bedingungen ist eine Verlängerung der Einhaltefrist bis zum Jahr 2015 möglich (EU-Richtlinie 2008/50/EG).

Insbesondere der Jahresgrenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wird derzeit an vielen straßennahen Messstellen in Deutschland wie auch anderen europäischen Ländern überschritten. Auch in Baden-Württemberg sind viele Messstationen von einer Einhaltung des zukünftig vorgeschriebenen Jahresmittelwertes weit entfernt. An einzelnen hoch belasteten Stellen liegen die  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Jahresmittel um Faktor 2-3 über dem Grenzwert. (Abb. 1).

Wesentliche Ursache der hohen  $\text{NO}_2$ -Belastung an Hauptverkehrsstraßen sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Kfz-Verkehrs. In verschiedenen nationalen und internationalen Studien wurde nachgewiesen, dass für die Stagnation bzw. den an einigen Stationen festgestellten Anstieg der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen eine Zunahme von direkt durch Kfz emittiertem primärem  $\text{NO}_2$  verantwortlich ist. Nach wie vor haben aber auch die luftchemische Bildung von  $\text{NO}_2$  aus Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) aus dem Abgas des lokalen Straßenverkehrs (Reaktion v.a. mit Ozon) sowie die allgemeine  $\text{NO}_2$ -Grundbelastung infolge der weiträumigen Belastungen und der anderen städtischen Emissionen („städtischer Hintergrund“) einen hohen Anteil an der  $\text{NO}_2$ -Belastung in verkehrsreichen Straßen.

Höhe und Verlauf der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen unterschieden sich an den hoch belasteten Messstationen in den vergangenen Jahren stark. An einigen Stationen ist eine Tendenz zur Abnahme der Konzentrationen erkennbar. An anderen Stationen, insbesondere in Stuttgart, ist dagegen bisher kein Rückgang erkennbar. Eine wichtige Voraussetzung für die Einleitung effizienter Maßnahmen zur Minderung der  $\text{NO}_2$ -Belastung ist eine gute Kenntnis der Ursachen dieser Unterschiede.

In einer umfangreichen Analyse [IFEU 2007] wurden die Anteile verschiedener Ursachen an der  $\text{NO}_2$ -Immission an der Station Stuttgart-Mitte ermittelt und in Szenarien die zukünftige Entwicklung der  $\text{NO}_2$ -Immission abgeschätzt. In der vorliegenden Studie wurden diese Analysen für die Station Stuttgart-Mitte aktualisiert und auf drei weitere hoch belastete Messstationen in Baden-Württemberg ausgeweitet: „Stuttgart-Neckartor“, „Freiburg-Schwarzwaldstraße“ und „Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße“.

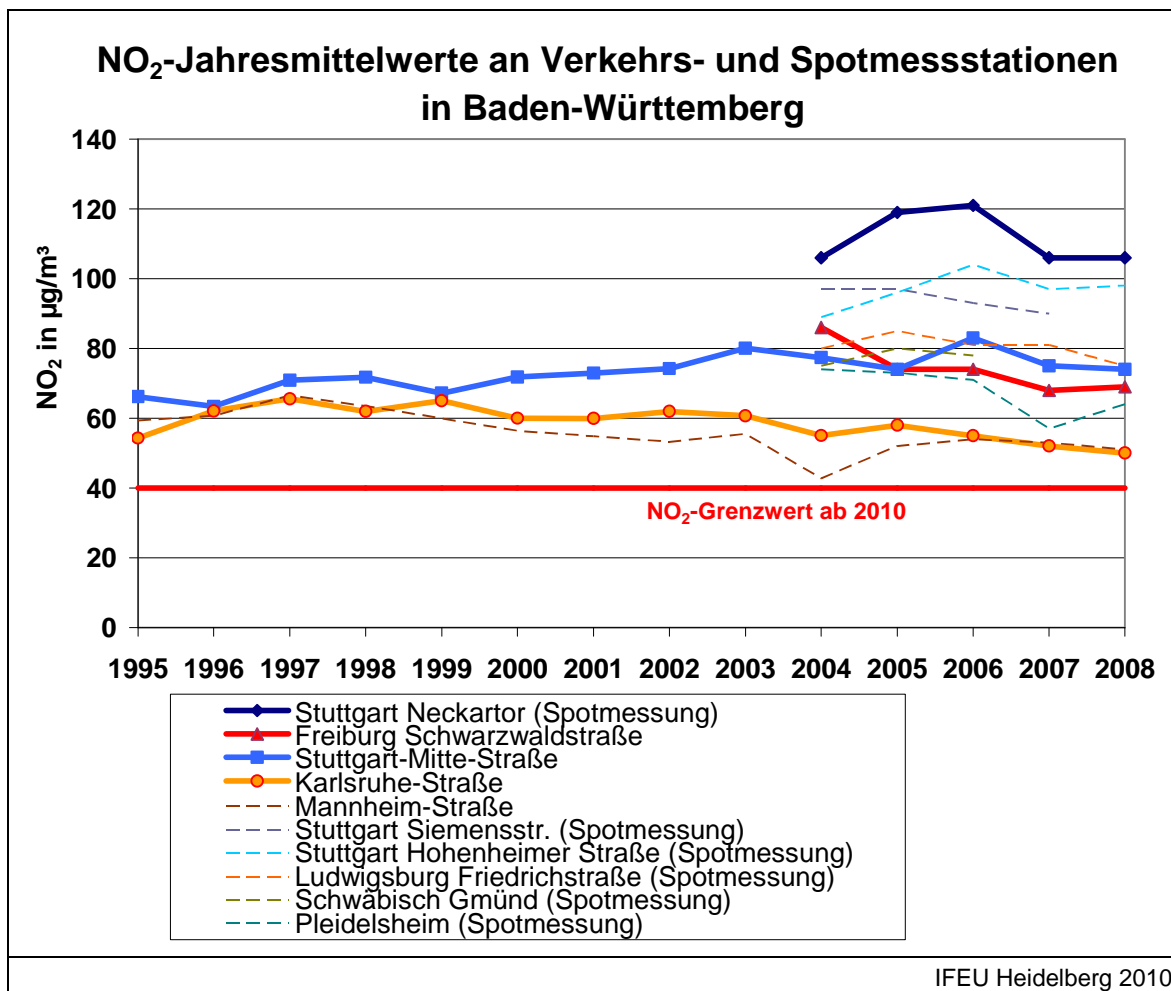
Für die ausgewählten Stationen wurden:

- Die  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen des Jahres 2008 verglichen. Schwerpunkt war dabei die Untersuchung der Gemeinsamkeiten und Unterschiede bezüglich der Beiträge von städtischem Hintergrund und sowie lokalem  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Beitrag.
- Quellanalysen auf der Basis straßennaher Ozonmessungen für die Stationen „Stuttgart-Mitte“ und „Freiburg-Schwarzwaldstr.“ durchgeführt.
- $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionsberechnungen auf Basis lokaler Verkehrszählraten und aktueller  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionsfaktoren durchgeführt.
- Quellanalysen auf Basis der Emissionsberechnungen durchgeführt. Ergänzend zu den Beiträgen von lokalem primärem und lokalem luftchemischem Beitrag wurde auch eine Differenzierung nach Beiträgen einzelner Kfz-Kategorien vorgenommen.
- Quellanalysen mit Hilfe eines chemischen Boxmodells durchgeführt und den Ergebnissen der Quellanalysen mit den anderen Methoden gegenübergestellt.

- die zukünftige  $\text{NO}_2$ -Immission an den ausgewählten Messstationen mit dem Boxmodell unter Einbezug der Emissionsberechnungen abgeschätzt.

Für die am höchsten belastete Messstation Stuttgart-Neckartor wurde ergänzend untersucht, welche  $\text{NO}_2$ -Konzentration im Jahresmittel mit der aktuell schärfsten Abgasgrenzwertgesetzgebung insgesamt erreichbar wäre. Dazu wurden in einem zusätzlichen Szenario die  $\text{NO}_2$ -Immissionen an dieser Station unter der Annahme modelliert, dass zukünftig keine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte mehr erfolgt. Somit wären irgendwann nur noch Kfz der Grenzwertstufen Euro 6 (Pkw, LNF) bzw. Euro VI (Lkw, Bus) im Straßenverkehr vertreten.

Die verschiedenen Schwerpunkte der Studie sind thematisch eng miteinander verzahnt. Ergebnisse aus einem Arbeitsblock bildeten jeweils eine wichtige Grundlage für die anderen Arbeitsblöcke oder dienten zur Validierung der Ergebnisse.



**Abb. 1** Entwicklung der  $\text{NO}_2$ -Belastung an Verkehrsmessstationen in Baden-Württemberg (Darstellung der in dieser Studie ausgewählten Stationen: durchgezogene Linien)

## Immissionsbelastung an den untersuchten Messstationen

### 1. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen des lokalen Verkehrs sind Hauptverursacher der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen an den vier Verkehrsmessstationen

Die höchste NO<sub>x</sub>-Gesamtimmission wurde im Jahr 2008 in allen Monaten an der Station Stuttgart-Neckartor gemessen. Am zweithöchsten war die NO<sub>x</sub>-Belastung in Freiburg-Schwarzwaldstraße, vor Stuttgart-Mitte. An der Station Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße war die NO<sub>x</sub>-Belastung in allen Monaten am niedrigsten (Abb. 2, links).

Die NO<sub>x</sub>-Gesamtimmission hatte an allen Messstationen einen ausgeprägten Jahresverlauf mit deutlich höheren Konzentrationen im Winter. Am größten sind die jahreszeitlichen Unterschiede an den Stationen mit insgesamt niedrigeren NO<sub>x</sub>-Konzentrationen. Auch im städtischen Hintergrund (Abb. 2, Mitte) war ein ausgeprägter Jahresverlauf der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen gut erkennbar. Die städtische Hintergrundbelastung war in Stuttgart ganzjährig höher als in den Städten Karlsruhe und Freiburg.

Durch Abzug der städtischen Hintergrundbelastung von den NO<sub>x</sub>-Konzentrationen der Verkehrsmessstationen wurden die von lokalen Emissionen verursachten NO<sub>x</sub>-Beiträge ermittelt (Abb. 2, rechts). Diese waren an allen Messstationen für den größten Teil der NO<sub>x</sub>-Gesamtimmission verantwortlich. In Stuttgart-Neckartor und Freiburg-Schwarzwaldstraße kamen je nach Monat 80-90% der Gesamtimmission aus dem lokalen NO<sub>x</sub>-Beitrag, in Karlsruhe-R.Frank-Str. und Stuttgart-Mitte 60-80%.

An den Stationen Karlsruhe-R.Frank-Str. und Stuttgart-Mitte zeigte der lokale NO<sub>x</sub>-Beitrag einen klaren Jahresverlauf mit niedrigeren Werten im Sommer als im Winter. Die jahreszeitliche Schwankung war allerdings geringer als im städtischen Hintergrund. Auch bei Stuttgart-Neckartor war trotz großer monatlicher Schwankungen ein Jahresverlauf erkennbar. Dagegen konnte in Freiburg keine eindeutige Veränderung der lokalen NO<sub>x</sub>-Beiträge im Jahresverlauf festgestellt werden.

**Die NO<sub>x</sub>-Gesamtimmission hatte an allen vier Verkehrsmessstationen einen ähnlichen Jahresverlauf mit deutlich höheren Konzentrationen im Winter. Lokale Emissionen trugen im Jahresmittel ca. 70%-85% zur NO<sub>x</sub>-Gesamtimmission bei. Die jahreszeitliche Schwankung der lokalen NO<sub>x</sub>-Beiträge war deutlich geringer als im städtischen Hintergrund.**

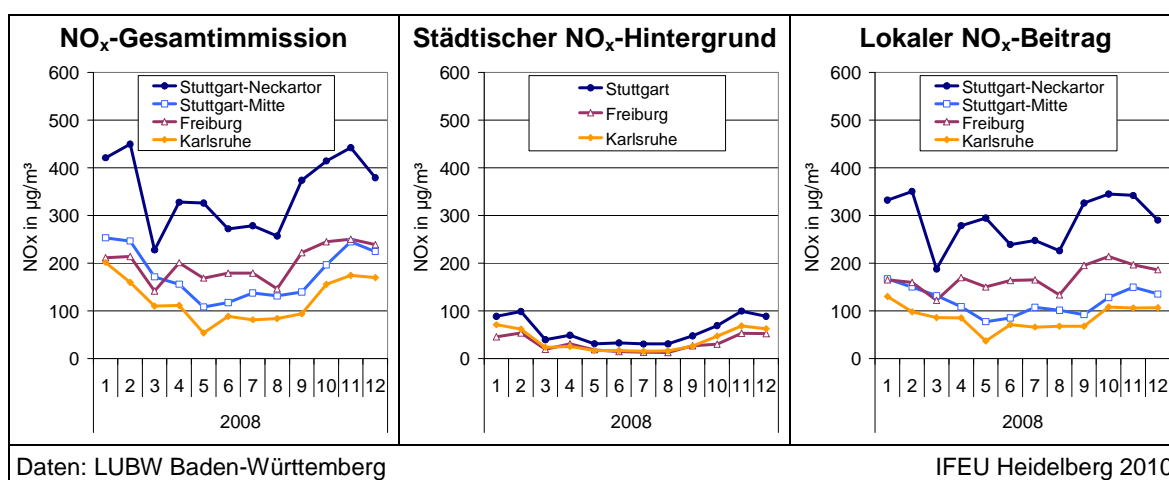


Abb. 2 NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Jahresverlauf 2008

**2. Die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des lokalen Verkehrs sind auch Hauptverursacher der  $\text{NO}_2$ -Belastung an den vier Verkehrsmessstationen. Die städtische Hintergrundbelastung trägt zur  $\text{NO}_2$ -Belastung stärker bei als bei  $\text{NO}_x$**

Auch bei den  $\text{NO}_2$ -Immissionen war Stuttgart-Neckartor die Station mit der höchsten Belastung in allen Monaten. Die zweithöchste  $\text{NO}_2$ -Belastung trat im Jahresmittel allerdings an der Station Stuttgart-Mitte auf, trotz der im Vergleich zu Freiburg-Schwarzwaldstraße niedrigeren  $\text{NO}_x$ -Werte (s. voriges Kapitel). Karlsruhe-Reinhold-Frank-Str. hatte auch bei  $\text{NO}_2$  die niedrigsten Konzentrationen (Abb. 3, links).

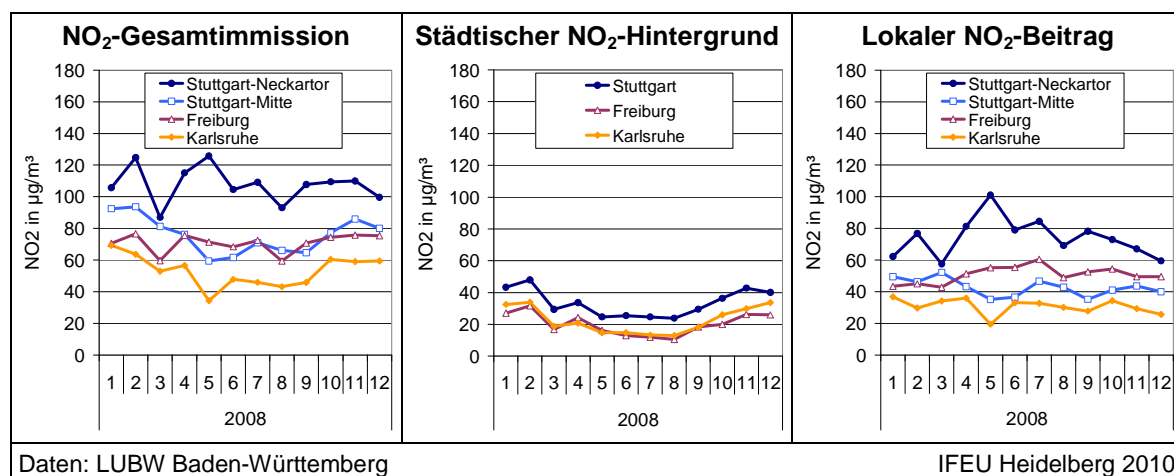
Der Jahresverlauf der  $\text{NO}_2$ -Konzentration unterscheidet sich – im Gegensatz zum  $\text{NO}_x$ -Verlauf - stark zwischen den Verkehrsmessstationen. Während in Stuttgart-Mitte und Karlsruhe-Reinhold-Frank-Str. höhere  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Winter gegenüber dem Sommer gut erkennbar sind, war in Stuttgart-Neckartor und Freiburg-Schwarzwaldstraße im Jahresverlauf keine eindeutige Veränderung der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen feststellbar.

Im städtischen Hintergrund (Abb. 3, Mitte) war dagegen ein Jahresverlauf in den drei Städten gut erkennbar. Die Konzentrationen waren im Winter ca. 1,5-2x höher als im Sommer. Die höchste städtische  $\text{NO}_2$ -Hintergrundbelastung trat analog zu  $\text{NO}_x$  in Stuttgart auf, Freiburg und Karlsruhe hatten eine recht ähnliche städtische  $\text{NO}_2$ -Hintergrundbelastung.

Die lokalen  $\text{NO}_2$ -Beiträge waren im Jahresmittel an allen vier Verkehrsmessstationen höher als der städtische Hintergrund, die Unterschiede waren jedoch deutlich geringer als bei  $\text{NO}_x$ . An den Stationen Stuttgart-Neckartor und Freiburg-Schwarzwaldstraße trug der lokale  $\text{NO}_2$ -Beitrag je nach Monat 60-80% zur  $\text{NO}_2$ -Gesamtmission bei, in Stuttgart-Mitte und Karlsruhe-Reinhold-Frank-Str. war der lokale  $\text{NO}_2$ -Beitrag nur 40-70% (Abb. 3, rechts).

**Die  $\text{NO}_2$ -Gesamtmission zeigte an den vier Verkehrsmessstationen keine einheitlichen Jahresverläufe. Auch bei  $\text{NO}_2$  waren die lokalen Beiträge Hauptursache der Gesamtmissionen an allen vier Stationen. Die Beiträge des städtischen Hintergrunds zur  $\text{NO}_2$ -Gesamtmission waren jedoch höher als bei  $\text{NO}_x$ .**

**An der Station Stuttgart-Mitte war die  $\text{NO}_2$ -Gesamtmission im Jahresmittel höher als in Freiburg-Schwarzwaldstraße, weil der etwas geringere lokale  $\text{NO}_2$ -Beitrag durch eine deutlich höhere städtische Hintergrundbelastung überkompensiert wurde.**



**Abb. 3  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Jahresverlauf 2008**

**3. Erhöhte lokale NO<sub>2</sub>-Beiträge können auch bei niedrigen NO<sub>x</sub>-Beiträgen als Folge hoher NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse auftreten.**

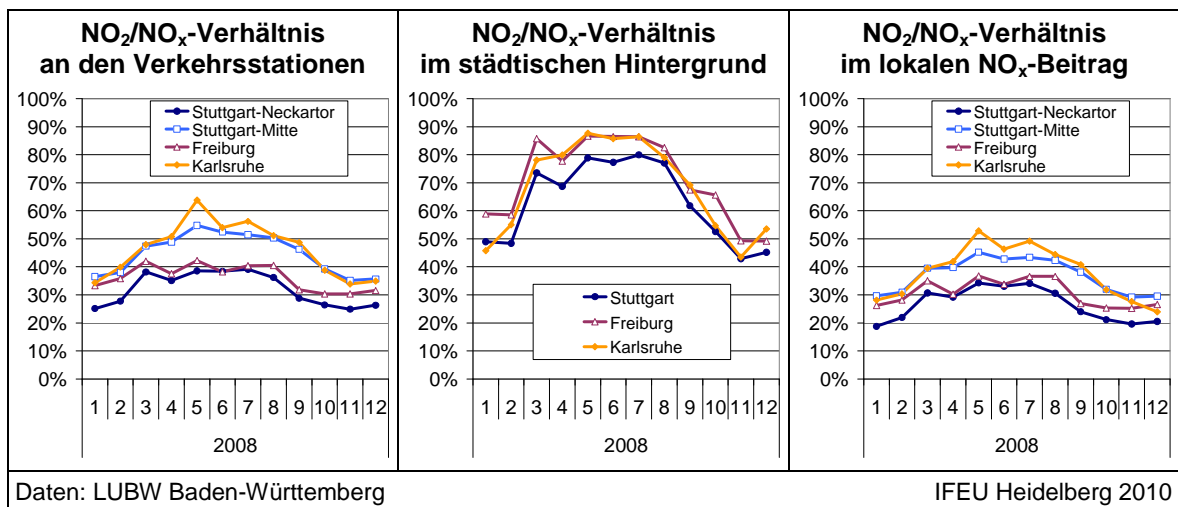
Die Station Stuttgart-Mitte hatte im Jahr 2008 niedrigere NO<sub>x</sub>-Immissionen als die Station Freiburg-Schwarzwaldstraße, gleichzeitig aber höhere NO<sub>2</sub>-Immissionen. Der Vergleich der NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse an beiden Stationen zeigt, dass die NO<sub>2</sub>-Anteile in Stuttgart-Mitte im Monatsmittel um 5-15 Prozentpunkte höher lagen als in Freiburg (Abb. 4, links).

Auch für die anderen zwei Stationen lassen sich Unterschiede bei NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Immissionen infolge unterschiedlicher NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses gut zeigen.

- In Stuttgart-Neckartor war die NO<sub>x</sub>-Immission etwa doppelt so hoch wie in Stuttgart-Mitte. Die NO<sub>2</sub>-Immission war jedoch nur ca. 40% höher, das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis lag am Neckartor deutlich niedriger.
- In Karlsruhe-Reinhold-Frank-Str. war die NO<sub>x</sub>-Immission nur ca. 60% gegenüber Freiburg-Schwarzwaldstraße, die NO<sub>2</sub>-Immission dagegen betrug 75%.

Grundsätzlich sind bei unterschiedlichen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen auch Unterschiede in den NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnissen zu erwarten. Bei ähnlichen luftchemischen Randbedingungen und ähnlicher lokaler Emissionszusammensetzung steigt das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis mit sinkenden NO<sub>x</sub>-Werten, da die NO<sub>2</sub>-Konzentration infolge luftchemischer Gleichgewichtsprozesse (z.B. Ozonchemie) schwächer abnimmt als die NO<sub>x</sub>-Konzentration insgesamt. Dies zeigt sich z.B. im städtischen Hintergrund, wo die NO<sub>2</sub>-Anteile in Stuttgart in allen Monaten niedriger waren als in Freiburg und Karlsruhe, was auf die höheren städtischen NO<sub>x</sub>-Hintergrundkonzentrationen in Stuttgart zurückzuführen ist (Abb. 4, Mitte).

Bei den lokalen NO<sub>x</sub>-Beiträgen kommen zusätzlich stationsspezifische Einflüsse wie unterschiedliche Emissionszusammensetzungen (Anteil von primärem NO<sub>2</sub>) und lokale Ozonverfügbarkeit (Reaktion mit lokal emittiertem NO) hinzu. Bei höheren direkten NO<sub>2</sub>-Emissionen oder einem erhöhten lokalen Ozonabbau kann trotz unterschiedlicher NO<sub>x</sub>-Höhe das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis ähnlich sein (Abb. 4, rechts). Eine genauere Analyse, insb. die Quantifizierung von Anteilen der verschiedenen Einflüsse ist allein anhand von lokalen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Messdaten allerdings nicht möglich.



**Abb. 4 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse in der NO<sub>x</sub>-Konzentration im Jahresverlauf 2008**

**4. An allen Messstationen hat neben dem lokalen Verkehr auch der Beitrag aus dem städtischen Hintergrund einen relevanten Anteil an der NO<sub>2</sub>-Konzentration. Die Höhe der Beiträge des lokalen Verkehrs und des städtischen Hintergrunds unterscheidet sich stark zwischen den Stationen.**

Die NO<sub>2</sub>-Gesamtmission lag im Jahr 2008 an den vier untersuchten Verkehrsmessstationen deutlich höher als 40 µg/m<sup>3</sup>, dem ab 2010 gültigen Jahresgrenzwert. Die Höhe der NO<sub>2</sub>-Belastung war dabei zwischen den Stationen sehr unterschiedlich. Bei der am höchsten belasteten Station Stuttgart-Neckartor war die NO<sub>2</sub>-Belastung im Jahresmittel etwa doppelt so hoch wie an der Station mit dem niedrigsten NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße.

Wie die Vergleiche der NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen für das Jahr 2008 zeigen, waren an allen Messstationen grundsätzlich der städtische NO<sub>2</sub>-Hintergrund sowie der NO<sub>2</sub>-Anteil im lokal emittierten NO<sub>x</sub>-Beitrag mitverantwortlich für die hohen NO<sub>2</sub>-Belastungen. Die Beiträge der verschiedenen Ursachen variierten jedoch stark zwischen den Stationen.

1. **Stuttgart-Neckartor** hatte sehr hohe lokale NO<sub>x</sub>-Beiträge, die trotz niedriger NO<sub>2</sub>-Anteile zum höchsten lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag der verglichenen Stationen führten. Die städtische Hintergrundbelastung war zwar gegenüber dem lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag gering, sie lag aber dennoch deutlich höher als in Freiburg und Karlsruhe.
2. **Stuttgart-Mitte** hatte eine deutlich höhere städtische NO<sub>2</sub>-Hintergrundbelastung, gleichzeitig aber einen niedrigeren NO<sub>x</sub>-Beitrag als **Freiburg-Schwarzwaldstraße**. Die höhere NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an der Stuttgarter Station war neben dem Hintergrund v.a. auf zusätzlich höhere NO<sub>2</sub>-Anteile im lokalen NO<sub>x</sub>-Beitrag zurückzuführen.
3. An der Station **Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße** war der städtische Hintergrund ähnlich wie in Freiburg vergleichsweise niedrig. Ebenso war der lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag von den vier Stationen am niedrigsten. Zwar waren die NO<sub>2</sub>-Anteile im lokalen NO<sub>x</sub>-Beitrag sehr hoch, dieser aber lag insgesamt deutlich niedriger als an den übrigen Stationen. Die Summe aus städtischem Hintergrund und lokalen Beiträgen lag jedoch auch an der Messstation in Karlsruhe deutlich über dem zukünftigen NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert.

**An allen vier untersuchten Messstationen kamen relevante Beiträge zu den NO<sub>2</sub>-Gesamtmissionen sowohl aus dem städtischen Hintergrund als auch von NO<sub>x</sub>-Beiträgen aus lokalen Emissionen. Die Höhe der Beiträge einzelner Ursachen war jedoch an den Stationen zum Teil sehr unterschiedlich.**

Tab. 1 Ursachenvergleich der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an den untersuchten Messstationen

	Stuttgart-Neckartor	Stuttgart-Mitte	Freiburg-Schwarzwaldstr.	Karlsruhe-Reinhold-Frank-Str.
<b>Städtische NO<sub>2</sub>-Hintergrundbelastung</b>	Mittel	Mittel	Niedrig	Niedrig
Lokaler NO <sub>x</sub> -Beitrag	Sehr hoch	Niedrig	Hoch	Sehr Niedrig
	+	+	+	+
NO <sub>2</sub> -Anteil im lokalen NO <sub>x</sub> -Beitrag	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
	=	=	=	=
<b>Lokaler NO<sub>2</sub>-Beitrag</b>	<b>Hoch</b>	<b>Mittel</b>	<b>Mittel</b>	<b>Niedrig</b>
<b>NO<sub>2</sub>-Gesamtmission</b>	<b>1.</b>	<b>2.</b>	<b>3.</b>	<b>4.</b>

## Analyse der Ozonmessdaten an den Messstationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße

### 5. Die Ozonkonzentrationen im städtischen Hintergrund in Freiburg waren im Untersuchungszeitraum höher als in Stuttgart.

Von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg LUBW werden seit August 2006 Ozonmessungen an der Verkehrsmessstation Stuttgart-Mitte durchgeführt, seit April 2008 wird Ozon auch in Freiburg-Schwarzwaldstraße gemessen. Die Entwicklung der Ozonkonzentration und der Ozonabbau an den zwei Stationen wurden für die verfügbaren Messzeiträume im Jahr 2008 untersucht und zwischen den Stationen verglichen.

Die Konzentrationen von Ozon waren in Freiburg und Stuttgart im städtischen Hintergrund wie auch an den Verkehrsmessstationen im Sommer deutlich höher als im Winter. Die monatliche Veränderung der Ozonkonzentrationen war sehr ähnlich zur jahreszeitlichen Entwicklung von Globalstrahlung und Temperatur in den Städten (Abb. 5). In Freiburg lag die Ozonkonzentration im städtischen Hintergrund in allen Monaten höher als in Stuttgart, was gut mit der in Freiburg höheren Globalstrahlung korreliert.

### 6. Der Ozonabbau an der Verkehrsmessstation war in Freiburg-Schwarzwaldstraße in allen untersuchten Monaten höher als in Stuttgart-Mitte.

Die Ozonkonzentrationen an den Verkehrsstationen waren in beiden Städten in allen Monaten niedriger als im städtischen Hintergrund. Diese geringere Ozonkonzentration ist hauptsächlich einer Reaktion von Ozon mit lokal emittiertem NO (= Ozonabbau) zuzuschreiben.

Die **lokal abgebaute Ozonmenge** war in Monaten mit hoher Ozonverfügbarkeit im städtischen Hintergrund (März bis August) deutlich höher als in den Monaten mit niedriger Ozonverfügbarkeit. In Freiburg-Schwarzwaldstraße wurde in allen Monaten eine größere Menge von verfügbarem Ozon abgebaut als in Stuttgart-Mitte (vgl. Abb. 6).

Mit der **Ozonabbaurate** wird beschrieben, welcher prozentuale Anteil des verfügbaren Ozons zwischen Hintergrund- und Verkehrsstation abgebaut wird. In den Sommermonaten lag die Ozonabbaurate im Monatsmittel in Stuttgart bei 32-37%, während sie in Freiburg mit 50-54% deutlich höher war. Im Winterhalbjahr lag die monatliche Ozonabbaurate in Stuttgart bei 43-52% und war somit höher als im Sommer. In Freiburg wurden im November 43%, im Dezember 50% des verfügbaren Ozons abgebaut, die Ozonabbaurate war damit etwas niedriger als in Sommer- und Herbstmonaten (vgl. Abb. 6). Mögliche Ursachen dieser Unterschiede zwischen den Stationen werden im Anhang erörtert.

**Die Ozonkonzentration an den Verkehrsstationen in Stuttgart und Freiburg lag in allen Monaten niedriger als an den Hintergrundstationen. In beiden Städten war der Ozonabbau am höchsten im Sommer bei hoher Ozonverfügbarkeit. In Freiburg war die abgebaute Ozonmenge in allen Monaten höher als an der Station Stuttgart-Mitte.**

*Im Vergleich zum Untersuchungszeitraum August 2006 – Juli 2007 [IFEU 2007] waren die Ozonkonzentrationen im Jahr 2008 in Stuttgart in den meisten Monaten etwas höher. Die abgebaute Ozonmenge und die Ozonabbauraten waren auf einem ähnlichen Niveau.*

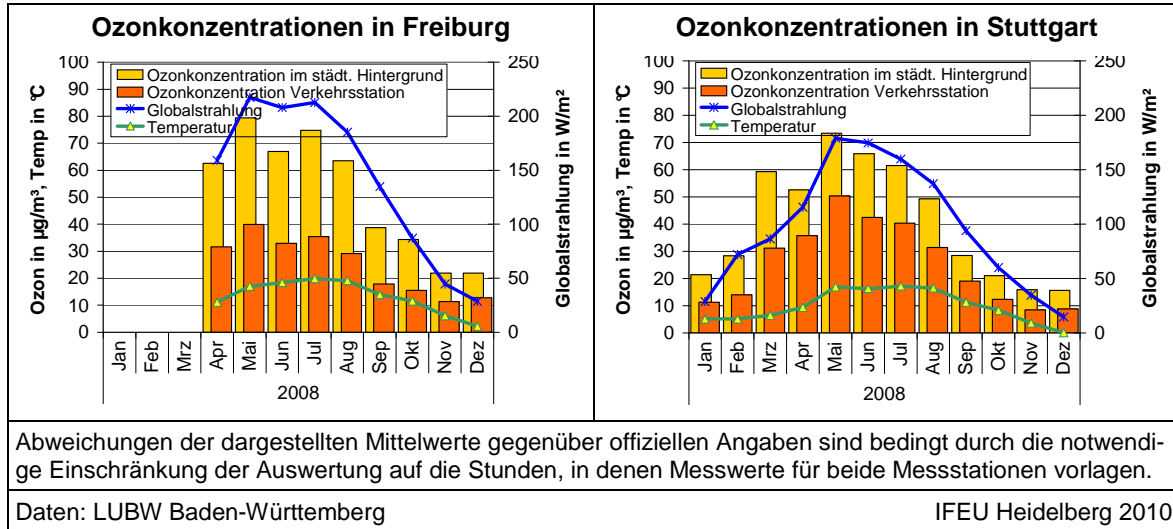


Abb. 5 Ozonkonzentrationen in Freiburg (links) und Stuttgart (rechts) im Jahresverlauf 2008

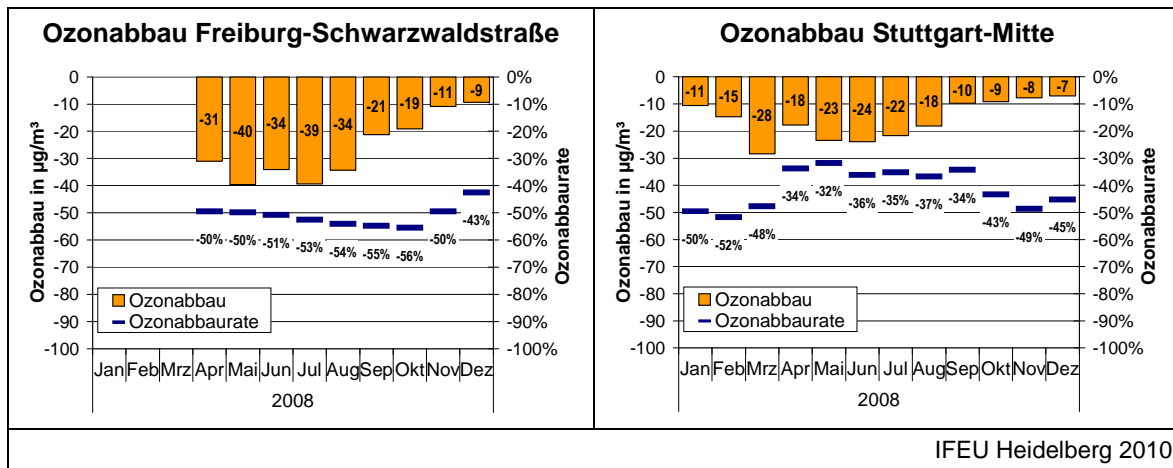


Abb. 6 Ozonabbau an den Messstationen Freiburg-Schwarzwaldstraße (links) und Stuttgart-Mitte (rechts) im Jahresverlauf 2008

**7. Der Beitrag der Reaktion des lokal emittierten NO mit Ozon zur NO<sub>2</sub>-Belastung an straßennahen Messstationen kann anhand von Ozonmessdaten abgeschätzt werden**

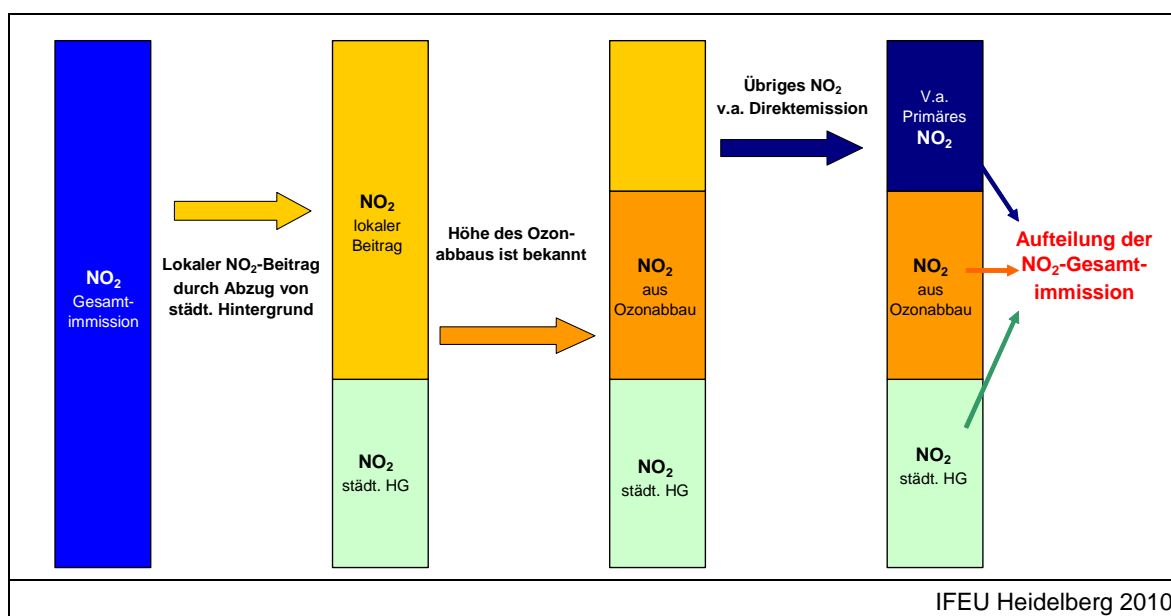
Die NO<sub>2</sub>-Konzentration an einer straßennahen Messstation besteht aus dem städtischen Hintergrund und einem lokalen Beitrag aus dem Umfeld der Messstation. Der NO<sub>2</sub>-Hintergrundbeitrag kann über die Konzentrationen an städtischen Hintergrundstationen abgeschätzt werden. Der Differenzbetrag zu der in der Straße gemessenen NO<sub>2</sub>-Konzentration ist demnach der NO<sub>2</sub>-Beitrag aus lokalen NO<sub>x</sub>-Emissionen.

In vielbefahrenen Straßen kann man als vereinfachte Annahme den lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag vollständig den lokalen Verkehrsemissionen zurechnen. Dieser NO<sub>2</sub>-Beitrag hat dabei nach aktuellem wissenschaftlichem Kenntnisstand zwei Hauptursachen:

- Direkte NO<sub>2</sub>-Emissionen (primäres NO<sub>2</sub>) durch den lokalen Kfz-Verkehr,
- Lokale Bildung von NO<sub>2</sub> durch luftchemische Prozesse: Hier spielt vor allem die NO<sub>2</sub>-Bildung durch Reaktion des vom lokalen Verkehr emittierten NO mit Ozon aus dem städtischen Hintergrund eine Rolle.

Wenn die Ozonkonzentration in der Straße bekannt ist, kann über den Vergleich zur Ozonkonzentration im städtischen Hintergrund abgeschätzt werden, welche Ozonmenge durch Reaktion mit dem lokal emittierten NO abgebaut wurde und damit, welcher Anteil des lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrags dem lokalen Ozonabbau zuzurechnen ist. Der übrige Teil des lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrags ist überwiegend dem primären NO<sub>2</sub> aus direkten Kfz-Emissionen zuzuschreiben. Ein gewisser Anteil ist allerdings auch weiteren, nicht ozonabhängigen luftchemischen Prozessen zuzuschreiben, wie die Analysen in [IFEU 2007] gezeigt haben.

**Bei Kenntnis des lokalen Ozonabbaus an einer Messstation können die lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträge zwischen ozonbedingtem NO<sub>2</sub> und übrigem, v.a. primärem NO<sub>2</sub> aufgeteilt werden.**



**Abb. 7 Ermittlung der Beiträge einzelner Kfz-Kategorien zur lokalen NO<sub>2</sub>-Belastung**

**8. Anteile und Höhe der NO<sub>2</sub>-Konzentration aus dem städtischen Hintergrund, dem Ozonabbau sowie den primären NO<sub>2</sub>-Emissionen variieren stark im Tagesverlauf.**

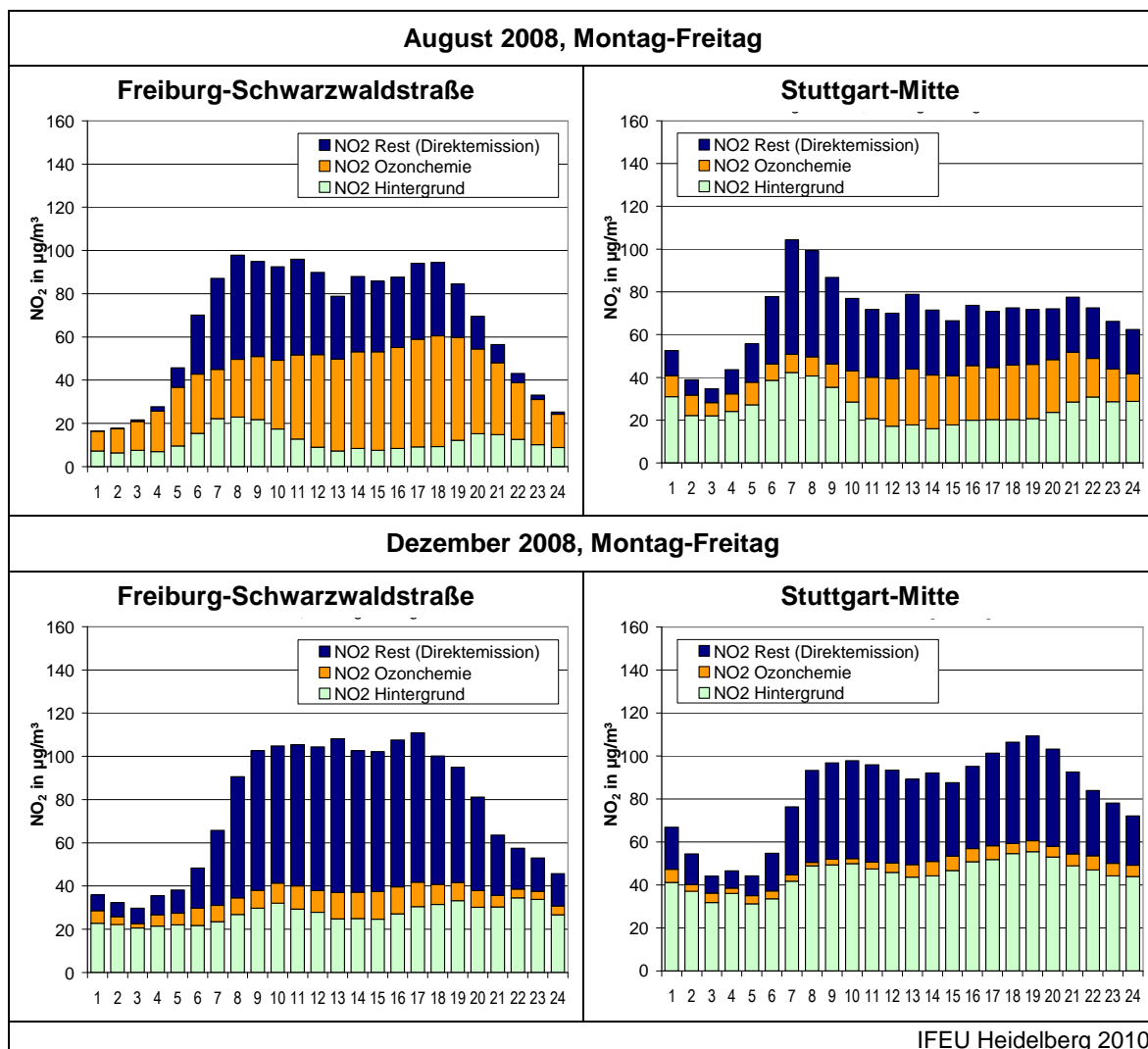
Die NO<sub>2</sub>-Konzentration zeigt an den zwei untersuchten Messstationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße einen ausgeprägten Tagesgang. Dazu trugen Konzentrationsänderungen im städtischen Hintergrund ebenso bei wie Änderungen im lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag durch Ozonabbau und direkt emittiertes NO<sub>2</sub>. Die Tagesverläufe der einzelnen NO<sub>2</sub>-Beiträge veränderten sich dabei abhängig von Wochentag und Jahreszeit, sie zeigten über den Untersuchungszeitraum voneinander unabhängige Entwicklungen. Eine Darstellung der differenzierten Tagesverläufe im gesamten Untersuchungszeitraum ist für beide Messstationen im Anhang enthalten.

Abb. 8 zeigt beispielhaft mittlere Tagesverläufe für Montag-Freitag im August und im Dezember 2008 an den zwei Messstationen:

- Im Sommermonat August zeigte sich an beiden Stationen ab dem späten Vormittag ein starker Anstieg des ozonbedingten lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrags, der in den Abendstunden wieder abnahm. Dabei war der absolute Beitrag aus dem Ozonabbau in Freiburg etwa doppelt so hoch wie in Stuttgart. Im Dezember war der lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag aus dem Ozonabbau an beiden Stationen erheblich geringer als im August. Der Anstieg ab dem späten Vormittag und der abendliche Rückgang sind aber auch im Dezember erkennbar. Auch im Dezember war der ozonbedingte NO<sub>2</sub>-Beitrag in Freiburg höher als in Stuttgart.
- Der übrige lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag, der überwiegend durch primäres NO<sub>2</sub> verursacht ist, stieg an beiden Stationen am frühen Morgen stark an und verringerte sich dann leicht ab dem späteren Vormittag. Auch hier gab es zwischen den zwei Stationen Freiburg-Schwarzwaldstr. und Stuttgart-Mitte klare Unterschiede. So war tagsüber der nicht-ozonbedingte NO<sub>2</sub>-Beitrag in Freiburg teilweise höher als in Stuttgart, insb. im Dezember. In der Nacht dagegen war dieser NO<sub>2</sub>-Beitrag in Freiburg in beiden Monaten deutlich geringer als in Stuttgart.

**Die NO<sub>2</sub>-Konzentration zeigt an den Messstationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße starke Variationen im Tagesverlauf. Die einzelnen Ursachen (städtischer Hintergrund, Ozonabbau und primäres NO<sub>2</sub>) tragen je nach Tageszeit unterschiedlich viel zur NO<sub>2</sub>-Gesamtimmission bei. Dieses Tagesgangverhalten jeder Ursache verändert sich in Abhängigkeit von Wochentag und Jahreszeit.**

**An der Freiburger Messstation war der lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag aus dem Ozonabbau in beiden ausgewählten Monaten im gesamten Tagesverlauf höher als in Stuttgart. Bei dem nicht-ozonabhängigen, vor allem primären NO<sub>2</sub> war die Höhe der Beiträge je nach Tageszeit und Monat an beiden Stationen sehr unterschiedlich.**



IFEU Heidelberg 2010

**Abb. 8** Aufteilung der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission im Tagesverlauf am Beispiel August und Dezember 2008 in Stuttgart (links) und Freiburg (rechts)

**9. Der Anteil des bei der Reaktion von NO aus lokalen Kfz-Abgasen mit Ozon gebildeten NO<sub>2</sub> an den NO<sub>2</sub>-Konzentration lag in Freiburg -Schwarzwaldstraße deutlich höher als in Stuttgart-Mitte.**

An der Messstation Freiburg-Schwarzwaldstraße lag die NO<sub>2</sub>-Konzentration im April bis Dezember 2008 in allen Monaten außer August bei 70-80 µg/m<sup>3</sup>. Ein jahreszeitlicher Trend war bei Gesamtmission nicht klar erkennbar. Dagegen zeigte sich an der Messstation Stuttgart-Mitte im Jahr 2008 ein deutlicher Jahresverlauf mit höheren NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Winter (> 80 µg/m<sup>3</sup>) als im Sommer (60-70 µg/m<sup>3</sup>).

Die differenzierte Betrachtung der einzelnen NO<sub>2</sub>-Beiträge zeigte für die verschiedenen Ursachen eindeutige Jahresverläufe an beiden Messstationen. Die Höhe der Beiträge war zwischen den Stationen sehr unterschiedlich:

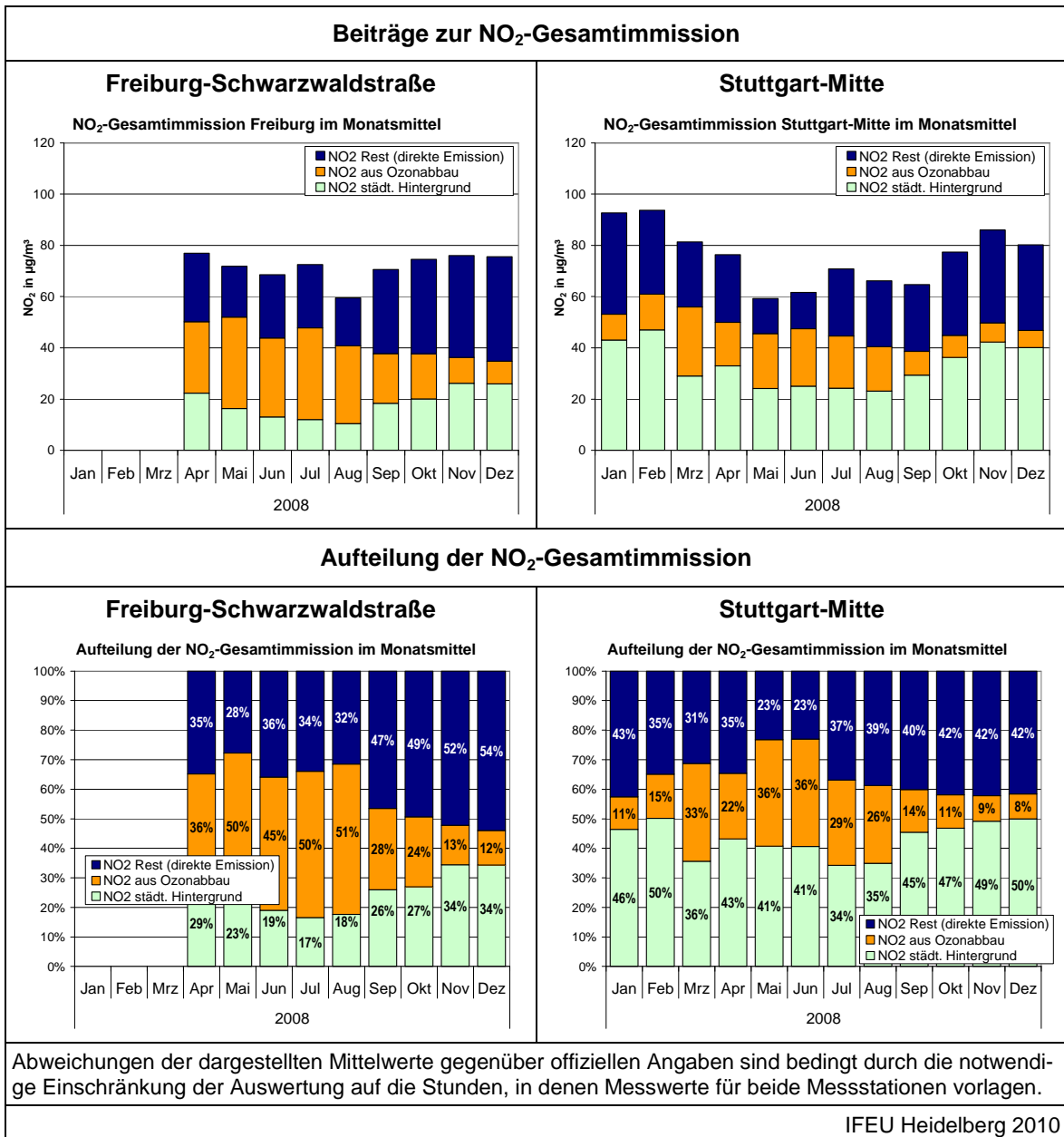
- Die **städtische NO<sub>2</sub>-Hintergrundbelastung** war im Monatsmittel an beiden Stationen im Winter etwa doppelt so hoch wie in den Sommermonaten. Dabei waren die Hintergrundbeiträge in Freiburg im April bis Dezember 2008 mit 10-26 µg/m<sup>3</sup> nur etwa halb so hoch wie im gleichen Zeitraum in Stuttgart-Mitte mit 23-42 µg/m<sup>3</sup>.
- Der **NO<sub>2</sub>-Beitrag aus dem lokalen Ozonabbau** war im Sommer im Monatsmittel ca. drei- bis viermal so hoch wie im Winter. In Freiburg kamen 9 µg/m<sup>3</sup> (Dez) bis 36 µg/m<sup>3</sup> (Aug) NO<sub>2</sub> aus dem lokalen Ozonabbau, in Stuttgart war der Beitrag mit 7-27 µg/m<sup>3</sup> deutlich niedriger.
- Der **lokale nicht-ozonabhängige, vor allem primäre NO<sub>2</sub>-Beitrag** war im Winter an beiden Stationen etwa anderthalb- bis zweimal so hoch wie im Sommer. Mit 19-41 µg/m<sup>3</sup> war dieser NO<sub>2</sub>-Beitrag in Freiburg-Schwarzwaldstraße etwas höher als in Stuttgart-Mitte mit 14-39 µg/m<sup>3</sup>.

In dem zwischen beiden Messstationen vergleichbaren Zeitraum April bis Dezember 2008 war die NO<sub>2</sub>-Gesamtmission im Mittel mit 71-72 µg/m<sup>3</sup> sehr ähnlich. Die Zusammensetzung der NO<sub>2</sub>-Belastung war jedoch sehr unterschiedlich.

- In **Stuttgart-Mitte** war der städtische Hintergrund mit einem Anteil von 43% die wichtigste Ursache der NO<sub>2</sub>-Belastung. Aus lokalem Ozonabbau kam mit 20% ein geringerer Anteil der NO<sub>2</sub>-Immission als aus dem übrigen lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag (36%).
- In **Freiburg-Schwarzwaldstraße** hatte der städtische Hintergrund einen deutlich niedrigeren Anteil von 25% an der NO<sub>2</sub>-Immission als in Stuttgart. Der Anteil von NO<sub>2</sub> aus lokalem Ozonabbau war dagegen mit 34% deutlich höher. Auch andere lokale NO<sub>2</sub>-Beiträge waren in Freiburg mit 41% für einen etwas höheren Anteil an der NO<sub>2</sub>-Belastung verantwortlich als in Stuttgart.

Damit trug in dem Zeitraum trotz der stationsspezifischen Unterschiede an beiden Messstationen jede der einzelnen Ursachen in relevantem Umfang zur NO<sub>2</sub>-Gesamtmission bei.

**Die Beiträge verschiedener Einzelursachen zur NO<sub>2</sub>-Gesamtmission variieren zwischen den Messstationen und in Abhängigkeit von der Jahreszeit. An der Station Freiburg-Schwarzwaldstr. war der lokale Beitrag des Ozonabbaus zur NO<sub>2</sub>-Belastung im Untersuchungszeitraum deutlich höher als in Stuttgart-Mitte. Auch der übrige lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag (v.a. primäres NO<sub>2</sub>) war an der Freiburger Messstation etwas höher, während die städtische Hintergrundbelastung in Freiburg geringer war als in Stuttgart. Insgesamt hatten dennoch an beiden untersuchten Messstationen alle Einzelursachen einen relevanten Anteil an der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission.**



**Abb. 9** Beiträge des Ozonabbaus und anderer Einzelursachen zur NO<sub>2</sub>-Gesamtmission in Freiburg-Schwarzwaldstraße (links) und Stuttgart-Mitte (rechts) im Jahresverlauf 2008



## NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des lokalen Verkehrs 2008-2020

### 10. Die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des lokalen Verkehrs wurden auf Basis lokaler Verkehrszähl- und aktueller Emissionsfaktoren ermittelt

Für die vier Verkehrsmessstationen Stuttgart-Neckartor, Stuttgart-Mitte, Freiburg-Schwarzwaldstraße und Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße wurden NO<sub>x</sub>- und primäre NO<sub>2</sub>-Emissionen des lokalen Straßenverkehrs für das Jahr 2008 sowie als Szenario für 2010, 2015 und 2020 berechnet.

Grundlage der Emissionsberechnungen waren von der LUBW erhobene lokale Verkehrszähl- und Verkehrsbelastungsdaten. Für die Messstationen in Freiburg und Karlsruhe sowie die Station Stuttgart-Neckartor lagen für das gesamte Jahr 2008 Stundenwerte der Verkehrsbelastung (Kfz/h) differenziert nach Pkw, Leichten Nutzfahrzeugen (LNF) und Lkw vor. An der Station Stuttgart-Mitte wurden von der LUBW keine Verkehrszählungen durchgeführt. Hier wurde ein mittlerer Tagesgang der Verkehrsbelastung auf Basis von Zähl- und Verkehrsbelastungsdaten des Stuttgarter Tiefbauamtes an einem Werktag im September 2008 verwendet. Ergänzend wurden Fahrplaninformationen für den Stadtbusverkehr an dieser Station ausgewertet.

Die Zusammensetzung der Fahrzeugflotten nach emissionsrelevanten Grenzwertstufen wurde entsprechend dem bundesmittleren Durchschnitt angenommen [TREMOT 2009]. Darüber hinaus wurde der in Baden-Württemberg gegenüber dem Bundesdurchschnitt höhere Diesel-Anteil berücksichtigt. Für eine näherungsweise Berücksichtigung der aktuellen Umweltzonenregelungen wurde die Annahme getroffen, dass Fahrleistungen von ausgesperrten Fahrzeugen nicht wegfallen, sondern proportional auf die weiterhin zugelassenen Grenzwertstufen verlagert werden. Zur Busflotte in Stuttgart wurden von der SSB AG aktuelle Daten für das Jahr 2009 zur Verfügung gestellt. Diese wurden bis zum Jahr 2020 unter Annahme bundesdurchschnittlicher Neuzulassungsanteile (EEV/Euro V, Euro VI) fortgeschrieben.

Es wurden situationsspezifische NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren abgeleitet, die neben den Flottenzusammensetzungen auch die lokale Verkehrssituation an den Messstationen anhand von Straßenfunktion und die mittleren Geschwindigkeiten (lt. Verkehrszähl- und Verkehrsbelastungsdaten) berücksichtigen. Ursprünglich war vorgesehen, Emissionsfaktoren aus dem überarbeiteten „Handbuch für Emissionsfaktoren“ zu verwenden. Das neue Handbuch lag jedoch zum Zeitpunkt der Berechnungen noch nicht vor. Deshalb wurden auf Basis von Informationen aus verschiedenen aktuellen Vorarbeiten zum Handbuch (z.B. Artemis, ERMES-Gruppe) Emissionsfaktoren abgeleitet und in den Berechnungen verwendet. Anteile von primärem NO<sub>2</sub> in den NO<sub>x</sub>-Emissionen wurden auf Basis der vorangegangenen Studie [IFEU 2007] sowie weiterführenden Auswertungen im Zuge der aktuellen Handbuch-Überarbeitung abgeleitet.

**11. Die Höhe der lokalen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen hängt entscheidend von Verkehrsmenge und Verkehrszusammensetzung ab.**

Das **Verkehrsaufkommen** war in Stuttgart-Neckartor mit über 70.000 Kfz/d am höchsten. Im Vergleich zu dieser Station war das Verkehrsaufkommen an den anderen untersuchten Stationen nur 35% bis 76% (Tab. 2; Abb. 10, oben). Auch die **Verkehrszusammensetzung** war unterschiedlich. Die Station in Freiburg hatte einen hohen Lkw-Anteil >3,5t, während es in Karlsruhe nur sehr wenige Lkw gab. An der Station Stuttgart-Mitte gab es auch einen sehr hohen Anteil von Linienbussen, der durch die Lage der Messstation direkt am Hauptbahnhof begründet ist, wo mehrere ÖPNV-Linien mit hoher Taktdichte verkehren.

**Tab. 2 Verkehrsaufkommen und Lkw-Anteile im Jahr 2008 an den 4 Luftmessstationen**

	<b>Stuttgart-Neckartor</b>	<b>Freiburg-Schwarzwaldstr.</b>	<b>Karlsruhe-R.-Frank-Str.</b>	<b>Stuttgart-Mitte</b>
<b>Verkehrsaufkommen</b>	72.000 Kfz/d	54.400 Kfz/d	24.900 Kfz/d	48.400 Kfz/d
<b>Lkw-Anteil &gt; 3,5t</b>	2,9%	5,3%	0,7%	1,8%
<b>Bus-Anteil</b>	-	0,2%	-	1,2%
Daten: LUBW, Tiefbauamt Stuttgart, Busfahrpläne (SSB, RVF)				IFEU Heidelberg 2010

Die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** zeigten andere Unterschiede zwischen den Stationen als die Verkehrsaufkommen (Abb. 10, Mitte). An der Station Freiburg-Schwarzwaldstraße waren die NO<sub>x</sub>-Emissionen etwas höher als in Stuttgart-Neckartor, trotz des deutlich niedrigeren Verkehrsaufkommens. Ausschlaggebend dafür war das hohe Lkw-Aufkommen, da Lkw im Vergleich zu Pkw deutlich höhere spezifische NO<sub>x</sub>-Emissionen haben. Auch an der Station Stuttgart-Mitte waren die NO<sub>x</sub>-Emissionen nur wenig niedriger als in Stuttgart-Neckartor. Hier spielte unter anderem der hohe lokale Busverkehr eine wichtige Rolle. In Karlsruhe waren die NO<sub>x</sub>-Emissionen durch das geringste Verkehrsaufkommen und gleichzeitig sehr niedrige Lkw-Anteile mit Abstand am niedrigsten.

Die **NO<sub>2</sub>-Emissionen** waren an der Station Freiburg-Schwarzwaldstraße wieder niedriger als bei Stuttgart-Neckartor, weil bei den (für die hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen verantwortlichen) Lkw die NO<sub>2</sub>-Emissionsanteile deutlich niedriger sind als im Pkw-Verkehr (Abb. 10, unten). Am höchsten waren die NO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2008 an der Station Stuttgart-Mitte. Neben den hohen NO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Pkw-Verkehr war das durch den hohen lokalen Busverkehr mitverursacht. Die Stuttgarter Busflotte hat einen hohen Anteil von Euro III-Fahrzeugen mit CRT<sup>®</sup>-System. Diese Partikelminderungssysteme wurden von der SSB AG nachgerüstet, um die Partikelemissionen der Busse zu reduzieren und so einen Beitrag zur Minderung der Feinstaubbelastung im Stuttgarter Stadtgebiet zu leisten. CRT-Systeme führen zu stark erhöhten NO<sub>2</sub>-Anteilen im Abgas, so dass diese für die Partikelminderung wichtige Maßnahme sich bei den direkten NO<sub>2</sub>-Emissionen negativ ausgewirkt hat.

**Die Höhe der lokalen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen hängt entscheidend von Verkehrsmenge und Verkehrszusammensetzung ab. Ein hoher Lkw-Anteil führte in Freiburg trotz niedrigerem Verkehrsaufkommen zu höheren NO<sub>x</sub>-Emissionen als in Stuttgart-Neckartor. Die Höhe der NO<sub>2</sub>-Emissionen wird hauptsächlich durch den Pkw-Verkehr bestimmt. Vor allem bei aktuellen Diesel-Pkw treten sehr hohe NO<sub>2</sub>-Emissionsanteile im Abgas auf. In Stuttgart-Mitte führten ein hoher lokaler Busverkehr und ein hoher Ausstattungsgrad der Busse mit Partikelfiltern zu zusätzlich erhöhten spezifischen NO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich mit den anderen Stationen.**

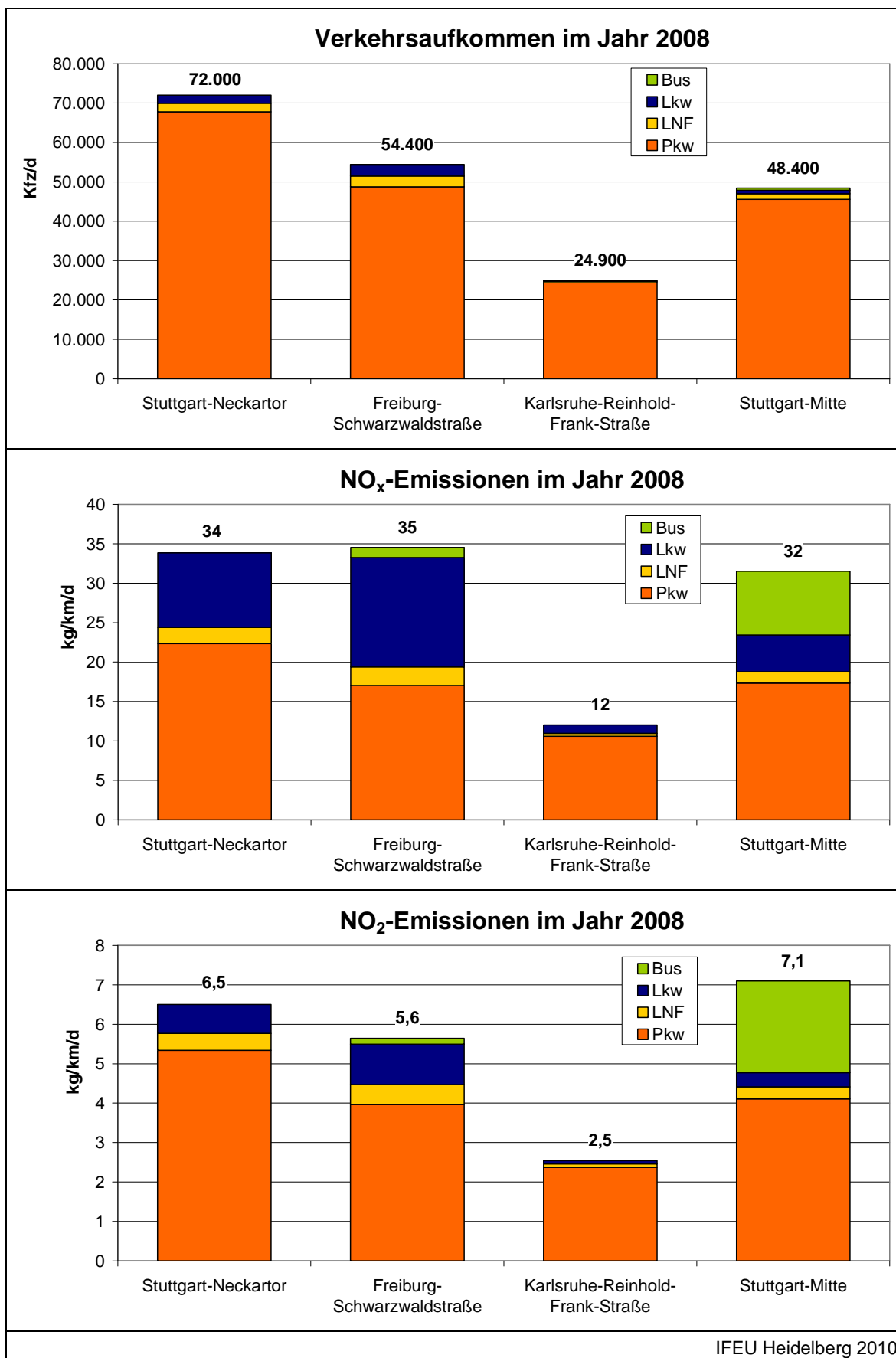


Abb. 10 Verkehrsaufkommen, NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen an den Messstationen im Jahr 2008

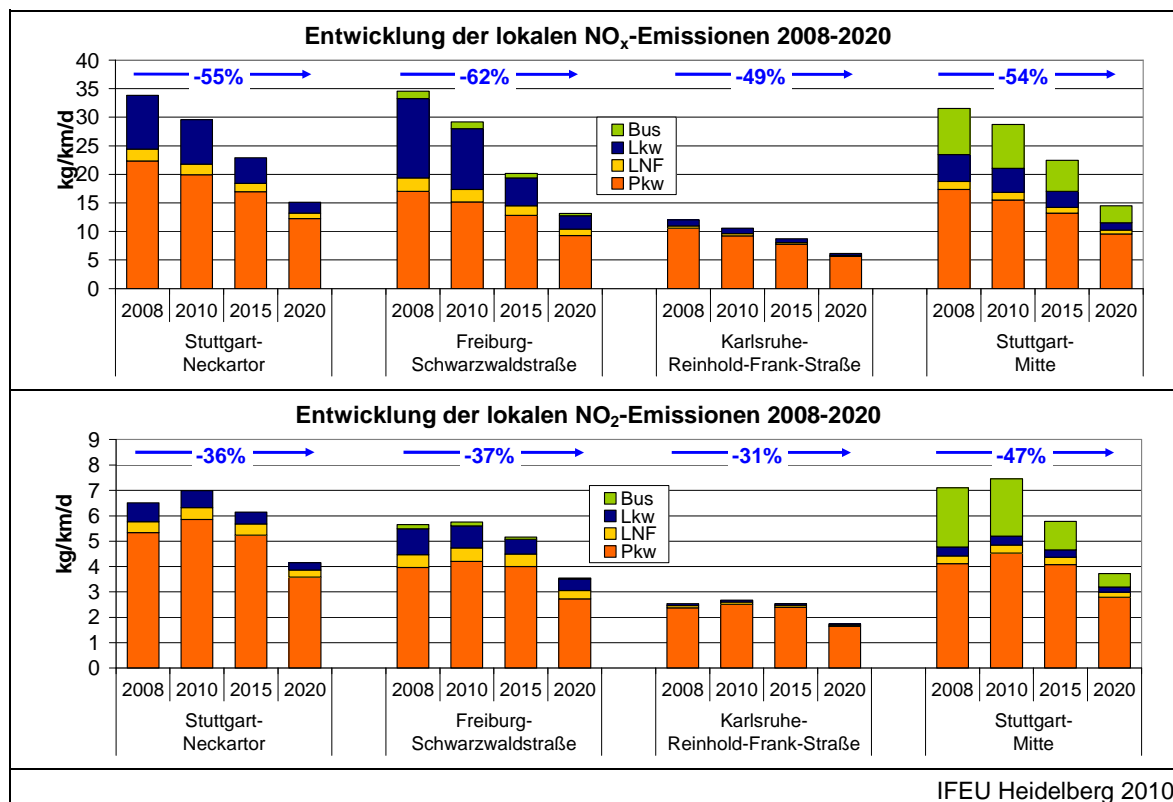
**12. Bis zum Jahr 2020 werden die NO<sub>x</sub>-Emissionen stark zurückgehen.  
Die NO<sub>2</sub>-Emissionen werden erst nach dem Jahr 2010 abnehmen.**

Die zukünftigen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen an den vier untersuchten Verkehrsmessstationen wurden unter Annahme gleichbleibender Verkehrsmengen berechnet. Änderungen der Flottenzusammensetzung bei den verschiedenen Fahrzeugkategorien wurden in Anlehnung an den Bundestrend ermittelt.

Die **NO<sub>x</sub>-Emissionen** des Verkehrs werden demnach zwischen 2008 und 2020 an den Messstationen um 49% bis 62% zurückgehen (Abb. 11, oben). Am höchsten sind die NO<sub>x</sub>-Rückgänge an der Station in Freiburg. Das ist vor allem auf starke Minderungen im Lkw-Verkehr durch das Ausscheiden von Fahrzeugen älterer hochemittierender Grenzwertstufen und die steigenden Fahrleistungsanteile von Lkw der Grenzwertstufe Euro VI zurückzuführen. Auch die NO<sub>x</sub>-Emissionen im Pkw-Verkehr werden zukünftig deutlich abnehmen. Die Minderungen sind jedoch geringer als bei Lkw, u.a. durch den weiter ansteigenden Diesel-Anteil und die höheren spezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen von Diesel-Pkw gegenüber Otto-Pkw.

Die **NO<sub>2</sub>-Emissionen** steigen bis 2010 an allen vier Messstationen weiter an, erst danach setzt ein Rückgang ein (Abb. 11, unten). Bis zum Jahr 2020 werden die NO<sub>2</sub>-Emissionen um 31-47% gegenüber 2008 zurückgehen. Am stärksten sind die zukünftigen Emissionsminderungen an der Station Stuttgart-Mitte, da hier neben den generellen NO<sub>x</sub>-Minderungen im Schwerverkehr eine starke Verringerung des Flottenanteils von Euro-III-Bussen mit Partikelfilter und damit ein zusätzlicher Rückgang der primären NO<sub>2</sub>-Emissionen eintreten wird.

**Die NO<sub>x</sub>-Emissionen gehen zukünftig stark zurück. Auch die NO<sub>2</sub>-Emissionen werden nach 2010 abnehmen, die Rückgänge sind aber geringer als bei NO<sub>x</sub>. Die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionsrückgänge sind bei Lkw und Bussen größer als bei Pkw, der prozentuale Anteil des Pkw-Verkehrs an den Emissionen wird damit zukünftig zunehmen.**



**Abb. 11 Entwicklung der lokalen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen 2008 bis 2020**

## Ursachen der NO<sub>2</sub>-Belastung im Jahr 2008

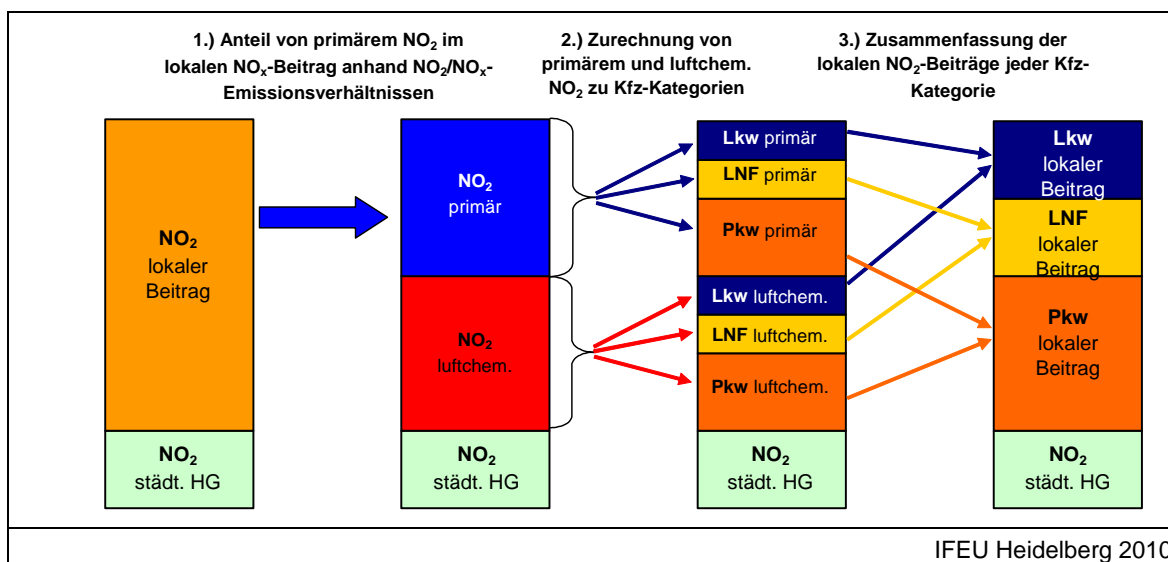
**13. Die Beiträge der Kraftfahrzeugarten zur NO<sub>2</sub>-Belastung können auf Basis von Emissionsberechnung und Immissionsanalysen abgeschätzt werden.**

Hauptverursacher der ansteigenden primären NO<sub>2</sub>-Emissionen in den letzten Jahren war der Pkw-Verkehr. Bei den gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen und v.a. bei der anteiligen NO-Emission hat jedoch der Schwerverkehr (Lkw, Bus) weiterhin einen hohen Anteil. Für eine Bestimmung der gesamten Beiträge einzelner Fahrzeugklassen zur NO<sub>2</sub>-Konzentration an einer Messstation ist daher eine differenzierte Betrachtung der Einzelursachen notwendig.

Wenn der lokale NO<sub>x</sub>-Beitrag nahezu vollständig von den lokalen Verkehrsemissionen in der Straße stammt, kann davon ausgegangen werden, dass in diesem lokal verursachten NO<sub>x</sub> ein etwa gleich hoher prozentualer Anteil primäres NO<sub>2</sub> enthalten ist wie das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis in den Emissionen<sup>1</sup>. Auf diese Weise kann der lokale Konzentrationsbeitrag von primärem NO<sub>2</sub> abgeschätzt werden. Der restliche lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag (nach Abzug des primären NO<sub>2</sub>) entspricht demnach dem NO<sub>2</sub>-Beitrag aus luftchemischer Umwandlung von emittiertem NO.

Da primäres NO<sub>2</sub> durch die direkten NO<sub>2</sub>-Abgasemissionen verursacht ist, kann es einzelnen Fahrzeugklassen entsprechend der Aufteilung der NO<sub>2</sub>-Emissionen zugerechnet werden. Luftchemisches NO<sub>2</sub> wird lokal aus von den Kfz emittiertem NO gebildet. Es kann demnach den Fahrzeugklassen entsprechend der Aufteilung der NO-Emissionen zugerechnet werden.

**Der gesamte Beitrag jeder Fahrzeugklasse zur NO<sub>2</sub>-Belastung an einer Station ergibt sich aus den Einzelbeiträgen von primärem und luftchemisch gebildetem NO<sub>2</sub>.**



**Abb. 12 Ermittlung der Beiträge einzelner Kfz-Kategorien zur lokalen NO<sub>2</sub>-Belastung**

<sup>1</sup> In der kurzen Entfernung bis zur Messstation wird nur ein sehr geringer Anteil des primären NO<sub>2</sub> (z.B. durch Photolyse) abgebaut.

**14. An den Messstationen in Stuttgart und Karlsruhe trug primäres NO<sub>2</sub> stärker zur Belastung bei als NO<sub>2</sub> aus der lokalen luftchemischen NO<sub>2</sub>-Bildung. In Freiburg waren die Beiträge beider Ursachen ähnlich hoch.**

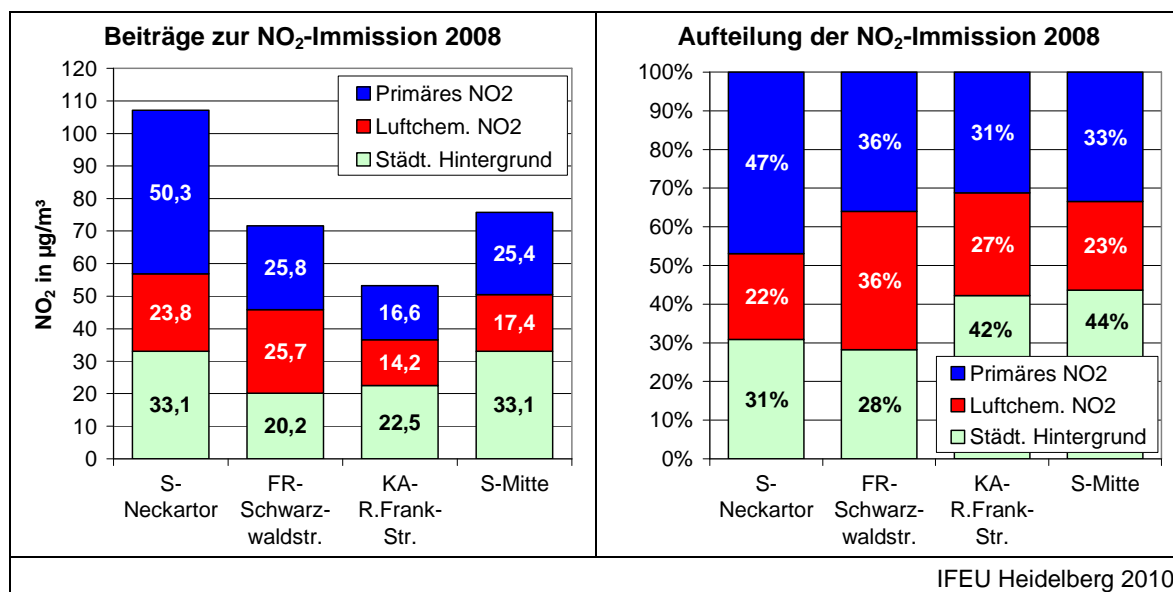
An der Messstation **Stuttgart-Neckartor** kamen im Jahr 2008 insgesamt ca. 50 µg/m<sup>3</sup> NO<sub>2</sub> allein aus den direkten NO<sub>2</sub>-Emissionen des lokalen Verkehrs. Das war beinahe die Hälfte der gesamten NO<sub>2</sub>-Immission an dieser Station. Durch die luftchemische Bildung von NO<sub>2</sub> aus lokal emittiertem NO kam weniger als halb so viel zur NO<sub>2</sub>-Belastung an der Station. Der städtische Hintergrund war insgesamt für gut 30% der NO<sub>2</sub>-Belastung verantwortlich.

An der Station **Freiburg-Schwarzwaldstraße** trugen alle drei Einzelursachen ähnlich stark zur NO<sub>2</sub>-Gesamtmission bei. Im Vergleich zu Stuttgart-Neckartor war der absolute NO<sub>2</sub>-Beitrag aus der lokalen Luftchemie in Freiburg etwas höher, während die Beiträge von primärem NO<sub>2</sub> und aus dem städtischen Hintergrund in Freiburg deutlich niedriger waren als in Stuttgart-Neckartor.

Die Station **Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße** hatte einen ähnlich niedrigen städtischen Hintergrund wie Freiburg-Schwarzwaldstraße. Da gleichzeitig auch der lokale NO<sub>2</sub>-Beitrag insgesamt relativ niedrig war, hatte der städtische Hintergrund dennoch mit über 40% einen dominierenden Einfluss auf die NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an der Station. Im lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag hatte primäres NO<sub>2</sub> aus den direkten Abgasemissionen einen etwas höheren Anteil als die luftchemische NO<sub>2</sub>-Bildung aus lokal emittiertem NO.

**Stuttgart-Mitte** hatte insgesamt eine leicht höhere NO<sub>2</sub>-Gesamtmission als die Station in Freiburg. Die Zusammensetzung war allerdings sehr unterschiedlich. Der städtische Hintergrund war in Stuttgart wesentlich höher als in Freiburg und hatte mit 44% den größten Anteil an der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission. Der lokale Beitrag aus der luftchemischen NO<sub>2</sub>-Bildung war dagegen in Stuttgart-Mitte deutlich niedriger als in Freiburg. Die lokalen Beiträge von primärem NO<sub>2</sub> waren an beiden Stationen vergleichbar.

**An allen vier Messstationen hatte jede der drei Einzelursachen einen relevanten Anteil an der Überschreitung des NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwerts. Im lokalen NO<sub>2</sub>-Beitrag überwog meist das primäre NO<sub>2</sub>, nur in Freiburg waren die Beiträge ausgeglichen.**



**Abb. 13** Beiträge der einzelnen Ursachen zur lokalen NO<sub>2</sub>-Belastung an den Verkehrsmessstationen im Jahr 2008

**15. Der Pkw-Verkehr war an allen vier Verkehrsmessstationen Hauptverursacher der lokalen Beiträge zur NO<sub>2</sub>-Konzentration. In Freiburg und Stuttgart-Mitte kamen größere Beiträge zur NO<sub>2</sub>-Immission auch aus dem Lkw- bzw. Bus-Verkehr.**

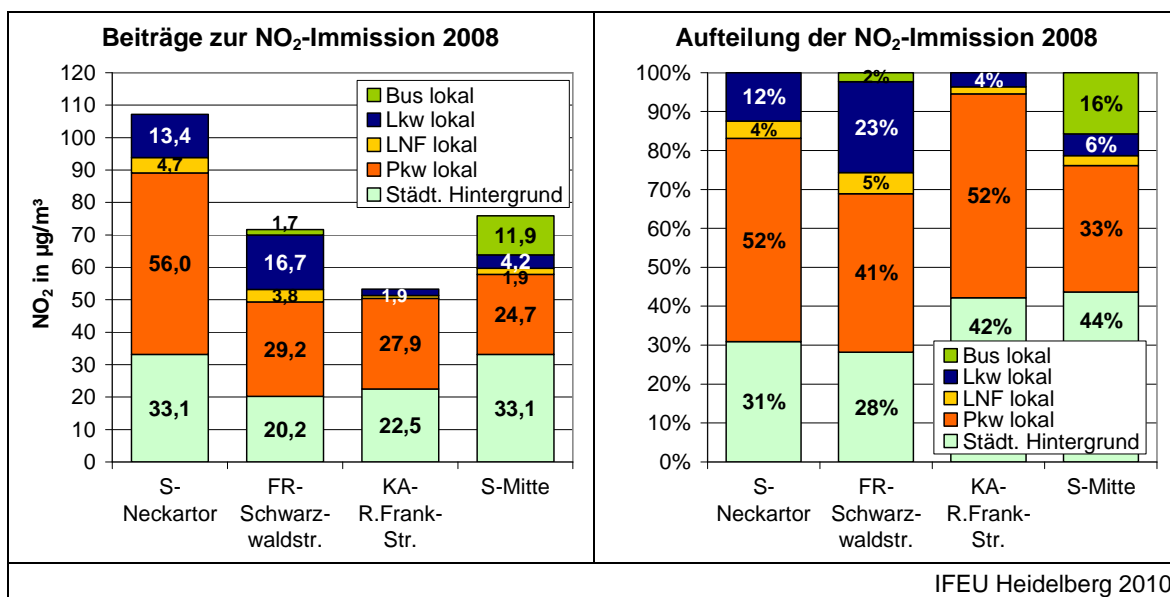
Die Ermittlung der Gesamtbeiträge der Kfz-Kategorien zeigte für alle vier Stationen, dass überwiegend der lokale Pkw-Verkehr als Hauptverursacher der hohen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen einzustufen ist. Entsprechend der unterschiedlichen Verkehrsmengen war die Höhe der Beiträge allerdings recht unterschiedlich:

- An den Stationen in Freiburg und Karlsruhe sowie Stuttgart-Mitte war der Pkw-Beitrag mit 25-29 µg/m<sup>3</sup> im Jahresmittel ähnlich hoch.
- Bei Stuttgart-Neckartor kam aus dem lokalen Pkw-Verkehr ein etwa doppelt so hoher Beitrag von 56 µg/m<sup>3</sup>. Der Pkw-Verkehr war damit am Neckartor allein für eine höhere NO<sub>2</sub>-Belastung verantwortlich als an den übrigen Stationen der gesamte Verkehr.

Weiterhin wurden für Messstationen mit einem hohen Lkw- oder Bus-Anteil am Verkehr auch relevant erhöhte NO<sub>2</sub>-Beiträge durch die Emissionen dieser Fahrzeuge festgestellt:

- Die NO<sub>2</sub>-Belastung in Freiburg wäre ohne Lkw-Verkehr ähnlich hoch gewesen wie in Karlsruhe. Durch den Lkw-Verkehr lag die gemessene Konzentration in Freiburg allerdings um rund ein Drittel höher.
- In Stuttgart-Mitte war der lokale Busverkehr für einen NO<sub>2</sub>-Beitrag von 12 µg/m<sup>3</sup> verantwortlich, das entspricht 16% der gesamten NO<sub>2</sub>-Immission. Allerdings hätte die Station auch ohne den Busverkehr mit einer NO<sub>2</sub>-Immission von ca. 64 µg/m<sup>3</sup> deutlich über dem NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert gelegen.

**Der Pkw-Verkehr war Hauptverursacher der lokalen Beiträge zur NO<sub>2</sub>-Gesamtimmission an den vier Verkehrsmessstationen. In Stuttgart-Neckartor lag der Beitrag allein aus dem Pkw-Verkehr bereits deutlich höher als der NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert. In Freiburg und Stuttgart-Mitte wurden größere Beiträge zur NO<sub>2</sub>-Immission auch durch den lokalen Lkw- bzw. Bus-Verkehr verursacht.**



**Abb. 14** Beiträge der Kfz-Kategorien zur lokalen NO<sub>2</sub>-Belastung an den Verkehrsmessstationen im Jahr 2008



## Modellierung der aktuellen und zukünftigen NO<sub>2</sub>-Immission

### 16. Die zukünftigen NO<sub>2</sub>-Konzentrationen an den untersuchten Verkehrsmessstationen wurden mit einem chemischen Boxmodell berechnet.

Um Aussagen zur Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Belastung und der Erreichung der NO<sub>2</sub>-Grenzwerte zu erhalten, wurde analog zur vorangegangenen Studie IFEU 2007 ein chemisches Boxmodell eingesetzt. Mit diesem von AVISO entwickelten Modell wurde die NO<sub>2</sub>-Konzentration sowie die Immission von NO und Ozon an den vier untersuchten Messstationen für die Jahre 2008, 2010, 2015 und 2020 für ein Referenzszenario berechnet.

In dem verwendeten Boxmodell werden die atmosphärische Ausbreitung und die chemische Umsetzung der eingebrachten Stoffe (Verkehrsemissionen, Hintergrundkonzentration) unter dem Einfluss der Sonnenstrahlung und der Windgeschwindigkeit berechnet. Bei den Verkehrsemissionen wird neben den NO<sub>x</sub>-Emissionen auch die direkte Emission von NO<sub>2</sub> im Abgas der Kfz berücksichtigt. Der Einfluss der Änderung des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses im Abgas der Kfz auf die Immissionskonzentrationen wird analysiert.

In dem eingesetzten chemischen Boxmodell wird der Tagesgang der Immissionsbelastung von NO, NO<sub>2</sub> und Ozon am Ausgang („outflow“) einer Box berechnet. Die Box stellt einen Abschnitt der Straße dar (siehe Abb. 15).

Am Einströmrand („inflow“) wird die tageszeitliche Entwicklung der Grundbelastung von NO<sub>2</sub>, NO und O<sub>3</sub> sowie die Windgeschwindigkeit vorgegeben. Dazu werden im Modell die im städtischen Hintergrund gemessenen Werte verwendet. Am unteren Rand werden die stündlichen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs vorgegeben. Der obere Rand des Boxmodells ist für Sonnenstrahlung durchlässig, es findet jedoch kein Stoffaustausch statt.

Innerhalb der Box wird die chemische Umwandlung von 59 Stoffen beschrieben (durch das Reaktionsmodell RADM2 [RADM2 1990] mit 161 Reaktionen, davon 21 Photolysereaktionen). Die Advektion wird mit einem Aufwindschema berechnet.

Die Konzentration am Ausströmrand ist die Lösung der für jeden Zeitschritt berechneten Massenbilanzgleichung. Die Zeitschritte werden im Lösungsverfahren [Verwer 1994] so bestimmt, dass ein vorgegebenes Maß an Konzentrationsänderung nicht überschritten wird und variieren von Sekundenbruchteilen bis zu einer Minute.

Weitere Beschreibungen zu dem Chemie-Boxmodell enthält u.a. die Studie [IFEU 2007].

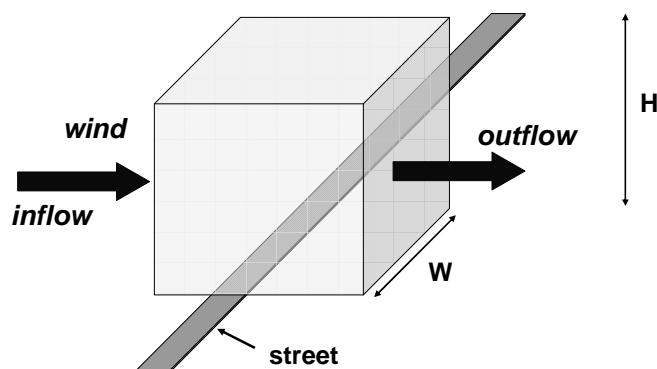


Abb. 15 Prinzipielle Funktionsweise des chemischen Boxmodells

**17. Die zukünftigen städtischen Hintergrundkonzentrationen wurden auf Grundlage von Ergebnissen im Rahmen eines UBA-Vorhabens ermittelt und hier zugrunde gelegt**

Die an den Verkehrsmessstationen gemessenen Änderungen der jahresmittleren Konzentrationen ist nicht allein von der Höhe der lokalen Verkehrsemissionen abhängig. Sie wird auch durch Emissionen anderer Quellen maßgeblich beeinflusst, welche vor allem Auswirkungen auf die allgemeine städtische Hintergrundbelastung haben.

Die Abnahme der Hintergrundbelastung in den Städten Stuttgart, Freiburg und Karlsruhe wurde entsprechend den Ergebnissen von Modellrechnungen mit dem Modell RCG im Rahmen des UBA-Projekts PAREST [UBA 2009] angenommen. Das Modell RCG beschreibt die Ausbreitung und Umwandlung von Luftschadstoffen mit einem komplexen Chemiemodell in einem dreidimensionalen Modellgebiet (zur Beschreibung siehe z.B. [RCG 2007]). Ziel des PAREST-Projekts ist es, die Ursachen für die Überschreitungen des Grenzwertes von PM<sub>10</sub> und des geplanten Grenzwertes von PM<sub>2,5</sub> zu ermitteln und geeignete emissionsmindernde Maßnahmen zur Reduzierung der Feinstaubbelastung zu identifizieren. Dabei wurde auch die Entwicklung der NO<sub>2</sub>- und Ozonbelastung modelliert.

Aus den vorliegenden Ergebnissen der RCG-Modellierung für die untersuchten Städte wurden prozentuale Änderungen der Hintergrundkonzentrationen von NO, NO<sub>2</sub> und Ozon übernommen und auf die jeweiligen im städtischen Hintergrund gemessenen Konzentrationswerte für 2008 angewandt (s. Tab. 3). Unter diesen Annahmen werden die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im städtischen Hintergrund in Stuttgart und Karlsruhe 2008-2020 um 39% abnehmen, in Freiburg deutlich stärker um 51%. Der überwiegende Teil der Konzentrationsrückgänge entfällt auf den Zeitraum 2010-2015. Ebenso werden die NO-Konzentrationen in Freiburg am stärksten zurückgehen. Die Ozonverfügbarkeit wird im städtischen Hintergrund in Stuttgart gemäß den getroffenen Annahmen um 6% ansteigen, in Karlsruhe um 3%. In Freiburg beträgt der angenommene Ozonanstieg nur 1-2%.

**Tab. 3 Annahmen zur Entwicklung der Hintergrundkonzentrationen von NO<sub>2</sub>, NO und Ozon in Stuttgart, Karlsruhe und Freiburg**

	Stuttgart			Freiburg			Karlsruhe		
	NO <sub>2</sub>	NO	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NO	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	NO	O <sub>3</sub>
Änderung <b>2010</b> zu 2008	-8%	-14%	1%	-9%	-15%	1%	-7%	-12%	1%
Änderung <b>2015</b> zu 2008	-28%	-44%	5%	-37%	-49%	2%	-28%	-37%	3%
Änderung <b>2020</b> zu 2008	-39%	-56%	6%	-51%	-63%	1%	-39%	-47%	3%
Quellen: RCG, UBA, AVISO									

**18. Im Trendfall kann im Jahr 2015 der NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert an der Station Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße nahezu erreicht werden. Die beiden untersuchten Stuttgarter Messstationen liegen auch im Jahr 2020 über 40 µg/m<sup>3</sup>.**

Die mit dem chemischen Boxmodell ermittelten NO<sub>x</sub>-Immissionen gehen an den vier untersuchten Verkehrsmessstationen zwischen 2008 und 2020 im Jahresmittel um 47-62% zurück. Neben dem Rückgang der lokalen NO<sub>x</sub>-Beiträge durch eine Verminderung der lokalen Verkehrsemissionen um 49-62% (vgl. Kap. 12) hat daran auch der angenommene Rückgang der Hintergrundbelastung um 43-56% großen Anteil.

Die mit dem Boxmodell berechnete NO<sub>2</sub>-Immission (Abb. 16) nimmt weniger ab als NO<sub>x</sub>. Zwischen 2008 und 2015 verringert sich die NO<sub>2</sub>-Immission um 15-25%. Sie liegt damit an den Messstationen in Stuttgart und Freiburg im Jahr 2015 mit 59-93 µg/m<sup>3</sup> deutlich über dem NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert. Lediglich an der Station Karlsruhe-Reinhold-Frank-Str. erscheint eine Erreichung des Grenzwerts im Jahr 2015 grundsätzlich möglich, da das Modellergebnis mit 42 µg/m<sup>3</sup> nur wenig höher liegt.

Bis zum Jahr 2020 sinkt die NO<sub>2</sub>-Immission auch in Freiburg-Schwarzwaldstraße auf den NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert. An den Messstationen Stuttgart-Neckartor (69 µg/m<sup>3</sup>) und Stuttgart-Mitte (45 µg/m<sup>3</sup>) ist jedoch selbst im Jahr 2020 eine Erreichung des Grenzwerts fraglich.

Entscheidend für die Rückgänge der NO<sub>2</sub>-Immissionen und die Erreichung des Jahresgrenzwerts in Karlsruhe (2015) und Freiburg (2020) ist neben der Verminderung der lokalen Beiträge auch die angenommene starke Abnahme der städtischen NO<sub>2</sub>-Hintergrundbelastung. Nur wenn diese tatsächlich um 40-50% sinkt, wie im Modell anhand der UBA-Datengrundlagen angenommen wurde, sind die berechneten Gesamtminderungen der NO<sub>2</sub>-Immissionen erreichbar.

**Der NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert ist nach den Box-Modellierungen bis zum Jahr 2015 nur an der Messstation Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße erreichbar, bis zum Jahr 2020 auch in Freiburg. An den Stuttgarter Messstationen ist auch im Jahr 2020 eine Grenzerreicherung fraglich. Wesentlich für die modellierten NO<sub>2</sub>-Rückgänge ist auch die angenommene starke Minderung der städtischen Hintergrundbelastung.**

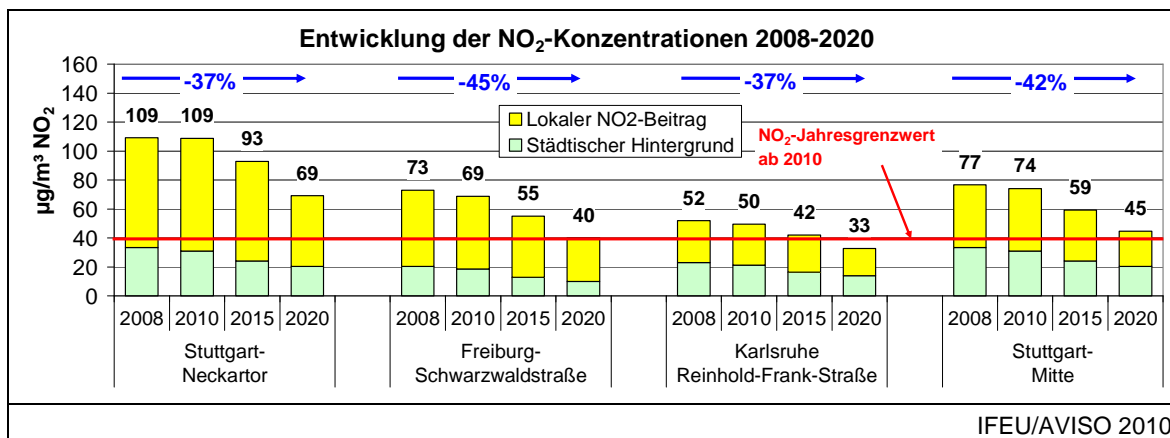


Abb. 16 Entwicklung der NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen 2008 bis 2020

**19. Bis zum Jahr 2020 gehen vor allem städtischer Hintergrund und lokale luftchemische NO<sub>2</sub>-Beiträge zurück, Minderungen bei primärem NO<sub>2</sub> erfolgen erst nach 2010. Die lokalen Immissionsbeiträge aus dem Pkw-Verkehr werden langsamer abnehmen als diejenigen aus dem Schwerverkehr mit Lkw und Bus.**

Der Einfluss verschiedener NO<sub>2</sub>-Bildungsprozesse auf die lokale NO<sub>2</sub>-Konzentration kann im chemischen Boxmodell durch die Ausschaltung einzelner Prozesse untersucht werden. Die methodische Vorgehensweise ist detailliert in [IFEU 2007] beschrieben, sie wurde auch in dieser Studie auf die untersuchten vier Verkehrsmessstationen angewandt. Zunächst wurde im Boxmodell für die Jahre 2008, 2010, 2015 und 2020 ermittelt, wie sich die lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträge zwischen primärem NO<sub>2</sub> und luftchemischer NO<sub>2</sub>-Bildung aufteilen. Die hierzu getroffene Annahme einer inerten Ausbreitung von direkt emittiertem NO<sub>2</sub> ist vergleichbar mit der Methodik auf Basis von Emissionsberechnungen in Kap. 13-15. Anschließend wurden die lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträge nach den einzelnen Kfz-Kategorien weiter differenziert.

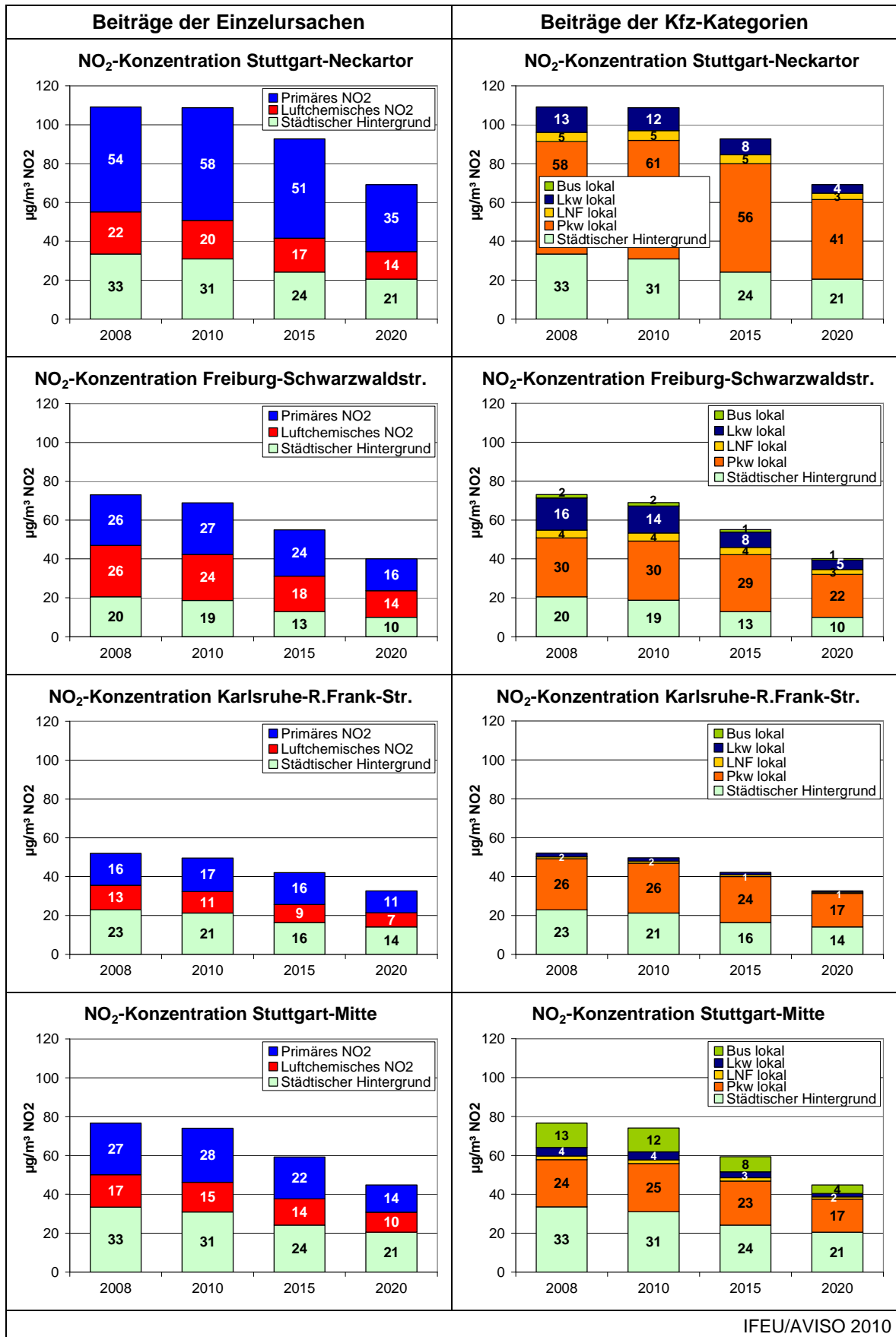
Die NO<sub>2</sub>-Beiträge aus dem städtischen Hintergrund werden, wie schon im Vorkapitel dargestellt, unter den getroffenen Annahmen bis 2020 deutlich zurückgehen. Ebenso werden sich die Beiträge aus der luftchemischen NO<sub>2</sub>-Bildung kontinuierlich verringern. Sie liegen im Jahr 2020 um 35-48% niedriger als noch 2008. In Freiburg und Karlsruhe sind die Rückgänge deutlich höher als in Stuttgart (Abb. 17, linke Spalte).

Die NO<sub>2</sub>-Beiträge von primärem NO<sub>2</sub> liegen aufgrund der zunächst weiter ansteigenden direkten NO<sub>2</sub>-Emissionen des Kfz-Verkehrs im Jahr 2010 höher als 2008. Ein starker Rückgang des primären NO<sub>2</sub>-Beitrags wird erst zwischen 2015 und 2020 an allen Messstationen erfolgen.

Hauptquelle der lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträge bleibt auch in den zukünftigen Jahren der Pkw-Verkehr (Abb. 17, rechte Spalte). Sein Anteil an den lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträgen wird zukünftig höher ausfallen, da sowohl NO- als auch NO<sub>2</sub>-Emissionen im Pkw-Verkehr schwächer zurückgehen als im Schwerverkehr bei Lkw und Bussen. Zwischen 2008 und 2010 steigen zudem an zwei Stationen auch die absoluten NO<sub>2</sub>-Beiträge des Pkw-Verkehrs noch leicht an, was auf die Zunahme der primären NO<sub>2</sub>-Emissionen in diesen Jahren zurückzuführen ist. Um NO<sub>2</sub>-Grenzwert spätestens 2015 bzw. 2020 an allen Messstationen erreichen zu können, müssten demnach zusätzliche Maßnahmen vor allem mit Schwerpunkt auf dem Pkw-Verkehr durchgeführt werden.

**Die modellierten Rückgänge der NO<sub>2</sub>-Immissionen sind bis zum Jahr 2010 vor allem auf verringerte Beiträge aus dem städtischen Hintergrund und der lokalen luftchemischen NO<sub>2</sub>-Bildung zurückzuführen. Die primären NO<sub>2</sub>-Beiträge steigen zunächst weiter an. In den kommenden Jahren nach 2010 kommt es auch hier zu einer Minderung.**

**Die NO<sub>2</sub>-Beiträge aus dem lokalen Verkehr gehen insgesamt stärker zurück als die Minderung im städtischen Hintergrund. An den untersuchten Stationen mit Grenzwertüberschreitung wird der lokale Verkehr jedoch auch 2020 noch für den größten Teil der NO<sub>2</sub>-Belastung verantwortlich sein. Die lokalen Immissionsbeiträge aus dem Pkw-Verkehr werden entsprechend der Emissionsentwicklung schwächer zurückgehen als diejenigen aus dem Schwerverkehr mit Lkw und Bus.**



IFEU/AVISO 2010

Abb. 17 Zusammensetzung der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen 2008 bis 2020

## Auswirkungen einer Euro-6/VI-Flotte auf die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen und auf die NO<sub>2</sub>-Konzentrationen an der Luftmessstation Stuttgart-Neckartor

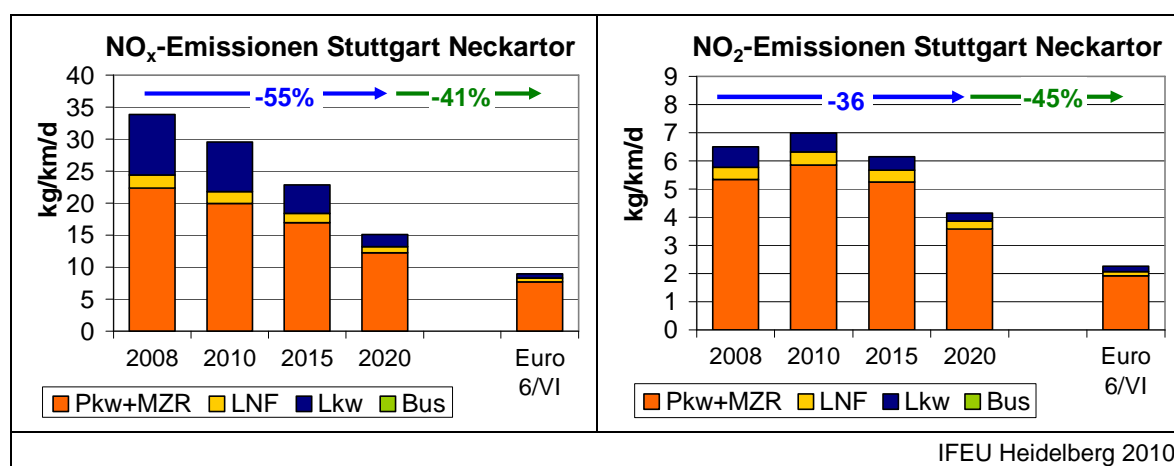
Die Modellierung der zukünftigen NO<sub>2</sub>-Immissionen an den untersuchten Messstationen hat gezeigt, dass vor allem an der sehr hoch belasteten Messstation Stuttgart-Neckartor auch im Jahr 2020 der NO<sub>2</sub>-Luftqualitätsgrenzwert im Trend trotz der Verschärfung der Abgasgesetzgebung deutlich überschritten wird.

Um zu untersuchen, ob mit der heute geltenden Abgasgesetzgebung – bei gleich bleibendem Verkehrsaufkommen - der NO<sub>2</sub>-Luftqualitätsgrenzwert im Jahresmittel an der Messstelle Stuttgart-Neckartor erreicht werden könnte, wurde ein zusätzliches Szenario gerechnet. Dabei wird untersucht, wie sich die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des Kfz-Verkehrs entwickeln würden, wenn sämtliche Kfz die aktuell strengsten Abgasstandards Euro 6/VI erfüllen und welche Auswirkungen dies auf die NO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung an der Messstation hat.

**20. Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sind im Euro 6/VI-Szenario um 41% niedriger als im Trend 2020, bei den NO<sub>2</sub>-Emissionen ist die zusätzliche Minderung 45%.**

In einem ergänzenden Szenario wurden die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs an der Messstation Stuttgart-Neckartor mit der Annahme berechnet, dass sämtliche Kfz die Abgasgrenzwerte Euro 6 (Pkw, Leichte Nutzfahrzeuge) bzw. Euro VI (Lkw) erfüllen. Der Diesel-Anteil an den Pkw-Fahrleistungen wurde wie im Trend für das Jahr 2020 angenommen. Mit diesem Szenario wird die Annahme abgebildet, dass es zukünftig keine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte mehr geben wird und somit irgendwann nur noch Kfz der Grenzwertstufen Euro 6 bzw. Euro VI im Straßenverkehr fahren.

**Im Falle einer reinen Euro-6/VI-Flotte würden die NO<sub>x</sub>-Emissionen gegenüber der mittleren Flottenzusammensetzung im Jahr 2020 zusätzlich um 41% gemindert. Bei den NO<sub>2</sub>-Emissionen wäre die zusätzliche Minderung mit 45% noch etwas stärker.**



**Abb. 18** NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen an der Messstation Stuttgart-Neckartor in den Jahren 2008 bis 2020 und unter Annahme einer reinen Euro 6/VI-Flotte

**21. Der NO<sub>2</sub>-Jahresgrenzwert wird an der Messstation Stuttgart-Neckartor auch bei Annahme einer Kfz-Flotte mit ausschließlich Euro-6/VI-Fahrzeugen nicht erreicht.**

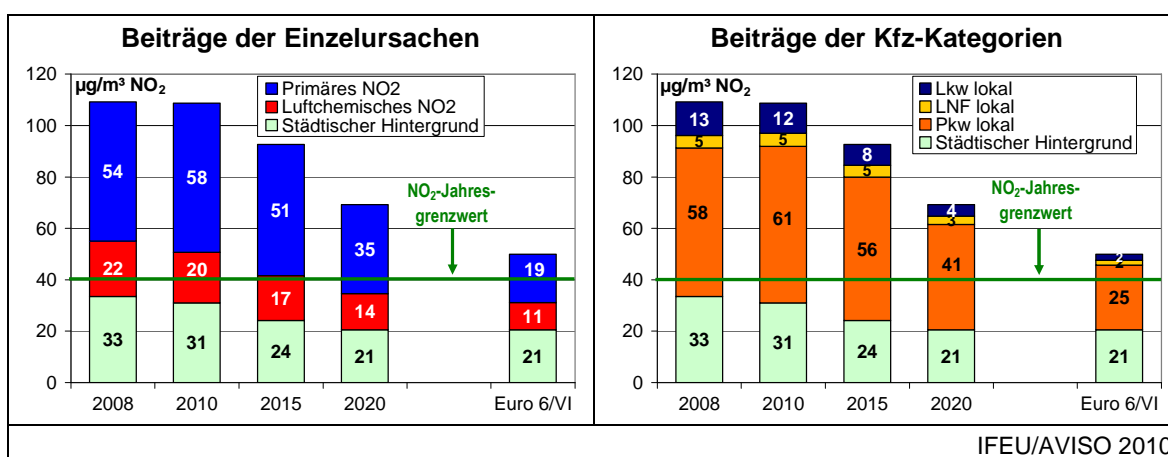
Mit dem Chemie-Boxmodell wurde die NO<sub>2</sub>-Konzentration an der Station Stuttgart-Neckartor auf Basis der Emissionsberechnungen für eine reine Euro-6/VI-Flotte im lokalen Verkehr modelliert und den Modellergebnissen im Trend bis zum Jahr 2020 gegenübergestellt. Die städtische Hintergrundbelastung wurde dabei unverändert aus der Modellierung für 2020 übernommen, so dass Unterschiede im Modellergebnis einzig die Änderungen der lokalen Verkehrsbeiträge abbilden<sup>2</sup>.

Die modellierte NO<sub>2</sub>-Konzentration an der Messstation Stuttgart-Neckartor beträgt im Jahresmittel 50 µg/m<sup>3</sup>, wenn im lokalen Verkehr nur noch Fahrzeuge der Grenzwertstufen Euro 6 bzw. Euro VI vertreten sind (vgl. Abb. 19). Sie ist damit noch einmal um 28% niedriger als im Trend 2020. Der NO<sub>2</sub>-Grenzwert würde aber selbst unter dieser Annahme zusätzlicher starker Emissionsreduktionen um 10 µg/m<sup>3</sup> überschritten.

Der lokale Verkehr trägt auch bei einer reinen Euro-6/VI-Flotte noch mit 30 µg/m<sup>3</sup> zur NO<sub>2</sub>-Belastung bei, der größte Teil davon durch Pkw (25 µg/m<sup>3</sup>, Abb. 19, rechts). Eine weitere Absenkung kann mit der bestehenden Abgasgesetzgebung bei gleich bleibendem Verkehr (Verkehrsaufkommen, Dieselanteil) nicht erreicht werden.

Um die NO<sub>2</sub>-Belastungen noch weiter zu reduzieren, müssten weitere Maßnahmen im lokalen Pkw-Verkehr ergriffen oder die Hintergrundbelastung stark verringert werden. So würde ergänzend zur Reduktion der lokalen Verkehrsemissionen eine Halbierung des Hintergrundbeitrags auf 10 µg/m<sup>3</sup> eine Absenkung der Gesamtbelastung am Neckartor auf 40 µg/m<sup>3</sup> bringen. Für eine solch starke Reduktion der Hintergrundbelastung müssten auch die stationären Emissionsquellen einen relevanten Minderungsbeitrag leisten, da sie einen großen Anteil am großräumigen und am städtischen Hintergrund haben (vgl. [LUBW 2009]).

**Der NO<sub>2</sub>-Luftqualitätsgrenzwert (Jahresmittel) wird an der Messstation Stuttgart-Neckartor bei gleichbleibendem Verkehr auch im Falle einer Kfz-Flotte mit ausschließlich Euro-6/VI-Fahrzeugen nicht erreicht. Eine Grenzwerterreicherung wäre an dieser Station selbst bei vollständiger Ausstattung der Flotte mit Euro 6/VI-Fahrzeugen nur mit ergänzenden emissionsmindernden Maßnahmen möglich.**



**Abb. 19 NO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Jahresmittel an der Messstation Stuttgart-Neckartor in den Jahren 2008 bis 2020 und unter Annahme einer reinen Euro 6/VI-Flotte**

<sup>2</sup> Eine zusätzliche Anpassung der Hintergrundbeiträge hätte differenzierte Auswertungen der Immissionsentwicklungen im UBA-Projekt PAREST erfordert, insb. zu der dort ermittelten Aufteilung zwischen Straßenverkehr und sonstigen Emittenten, was im Rahmen der Studie nicht leistbar war.

## Zusammenfassung

Der ab 2010 geltende  $\text{NO}_2$ -Jahresgrenzwert von  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  wird derzeit an vielen straßennahen Messstellen in Deutschland wie auch anderen europäischen Ländern überschritten. Auch in Baden-Württemberg sind viele Messstationen von einer Einhaltung des zukünftig vorgeschriebenen Jahresmittelwertes weit entfernt. Wesentliche Ursache der hohen straßennahen  $\text{NO}_2$ -Belastungen sind die  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Kfz-Verkehrs. Für die Stagnation bzw. den Anstieg der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen an einigen Stationen ist eine Zunahme von direkt durch Kfz emittiertem primärem  $\text{NO}_2$  verantwortlich. Nach wie vor haben aber auch die luftchemische Bildung von  $\text{NO}_2$  aus lokal emittiertem Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ) sowie die städtische Hintergrundbelastung einen hohen Anteil an der  $\text{NO}_2$ -Belastung.

Höhe und Verlauf der  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen unterschieden sich an den hoch belasteten Messstationen in den vergangenen Jahren stark. Eine wichtige Voraussetzung für die Einleitung effizienter Maßnahmen zur Minderung der  $\text{NO}_2$ -Belastung ist eine gute Kenntnis der Ursachen dieser Unterschiede. In der vorliegenden Studie wurden in umfangreichen Analysen für die vier baden-württembergischen Verkehrsmessstationen „Stuttgart-Neckartor“, „Freiburg-Schwarzwaldstraße“, „Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße“ und „Stuttgart-Mitte“ die Ursachen der  $\text{NO}_2$ -Belastung ermittelt und in Szenarien die zukünftige Entwicklung der  $\text{NO}_2$ -Immission abgeschätzt.

Die Analyse der Immissionsmessdaten zeigt, dass an allen Messstationen sowohl der lokale Verkehr als auch der städtische Hintergrund einen relevanten Anteil an den  $\text{NO}_2$ -Konzentrationswerten haben. Dabei zeigen sich aber deutliche Unterschiede zwischen den Stationen. So lag die städtische Hintergrundbelastung in Stuttgart etwa 50% höher als in Karlsruhe und Freiburg. Die durch den lokalen Verkehr verursachte  $\text{NO}_2$ -Konzentration lag in Stuttgart-Neckartor doppelt so hoch wie bei der Karlsruher Verkehrsstation.

Hohen Einfluss auf die Höhe der lokalen  $\text{NO}_2$ -Immissionsbeiträge haben die  $\text{NO}$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionen des lokalen Verkehrs. Die Höhe dieser Emissionen hängt entscheidend von der Verkehrsmenge sowie der Verkehrszusammensetzung ab. Beispielsweise führte in Freiburg ein hoher Lkw-Anteil trotz niedrigerem Verkehrsaufkommen zu höheren  $\text{NO}_x$ -Emissionen als in Stuttgart-Neckartor. Die Höhe der  $\text{NO}_2$ -Emissionen wird hauptsächlich durch den Pkw-Verkehr bestimmt. Vor allem bei aktuellen Diesel-Pkw treten sehr hohe  $\text{NO}_2$ -Emissionsanteile im Abgas auf. In Stuttgart-Mitte führten ein hoher lokaler Busverkehr und ein hoher Ausstattungsgrad der Busse mit Partikelfiltern zu zusätzlich erhöhten spezifischen  $\text{NO}_2$ -Emissionen im Vergleich mit den anderen Stationen.

Auf der Basis von Analysen der Immissionsmessdaten und Emissionsberechnungen konnte gezeigt werden, dass im Jahr 2008 sowohl primäres  $\text{NO}_2$  aus dem Abgas der Fahrzeuge sowie Abgas- $\text{NO}$  über lokale luftchemische Prozesse relevant zur  $\text{NO}_2$ -Gesamtmission an allen vier untersuchten Stationen beitragen. Die Analysen konnten zusätzlich durch die Auswertung von lokalen Ozonmessdaten für zwei der Messstationen validiert werden. An den Messstationen in Stuttgart und Karlsruhe kamen im Jahr 2008 höhere lokale  $\text{NO}_2$ -Beiträge aus primärem  $\text{NO}_2$  als aus der luftchemischen  $\text{NO}_2$ -Bildung. In Freiburg waren die Beiträge beider Ursachen ähnlich hoch.

Die Beiträge einzelner Fahrzeugklassen zur  $\text{NO}_2$ -Belastung wurden unter Berücksichtigung der Aufteilung von lokalen  $\text{NO}_2$ - und  $\text{NO}$ -Emissionen sowie deren Wirkung auf primäres und luftchemisch gebildetes  $\text{NO}_2$  in der Umgebungsluft abgeschätzt. Der Pkw-Verkehr war an allen vier Messstationen Hauptverursacher der lokalen  $\text{NO}_2$ -Beiträge. Hohe lokale Emissionsbeiträge aus dem Schwerverkehr von Lkw und Bussen an den Stationen Freiburg-Schwarzwaldstraße und Stuttgart-Mitte bewirkten auch relevante Beiträge zu den  $\text{NO}_2$ -Immissionen an diesen Messstationen.

Bis zum Jahr 2020 werden die lokalen  $\text{NO}_x$ -Emissionen des Verkehrs an den Messstationen um über 50% abnehmen. Die Emissionsrückgänge sind dabei an den Stationen mit einem hohen Schwerverkehrsanteil größer, da für Lkw und Busse stärkere spezifische Emissionsminderungen erwartet werden als im Pkw-Verkehr. Bei den  $\text{NO}_2$ -Emissionen ist eine Abnahme erst nach 2010 zu erwarten. Starke Minderungen werden insbesondere im Pkw-Verkehr erst nach 2015 erfolgen.

Die zukünftigen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen an den untersuchten Verkehrsmessstationen wurden mit einem Chemie-Boxmodell berechnet. Im Trend-Szenario wird der  $\text{NO}_2$ -Jahresgrenzwert im Jahr 2015 nur an der Station Karlsruhe-Reinhold-Frank-Straße nahezu erreicht. Voraussetzung dafür ist neben einer Reduktion der lokalen  $\text{NO}_2$ -Beiträge auch eine starke Absenkung der städtischen  $\text{NO}_2$ -Hintergrundbelastung. An der Station Freiburg-Schwarzwaldstraße wird der  $\text{NO}_2$ -Jahresgrenzwert im Trend-Szenario erst 2020 erreicht. An den zwei Messstationen in Stuttgart wird selbst im Jahr 2020 der Grenzwert im Trend-Szenario nicht erreicht.

Die modellierten Rückgänge der  $\text{NO}_2$ -Immissionen sind für den Zeitraum bis zum Jahr 2010 zunächst auf abnehmende Beiträge aus dem städtischen Hintergrund und der lokalen luftchemischen  $\text{NO}_2$ -Bildung zurückzuführen, während die Beiträge von primären  $\text{NO}_2$ -Emissionen zunächst noch ansteigen. In den kommenden Jahren werden auch die primären  $\text{NO}_2$ -Emissionen aus dem Verkehr zurückgehen.

Insgesamt nimmt in den Szenarien der Beitrag des lokalen Verkehrs zu der  $\text{NO}_2$ -Belastung stärker ab als die städtische Hintergrundbelastung. An den untersuchten Stationen mit Grenzwertüberschreitung wird der lokale Verkehr jedoch auch 2020 noch für den größten Teil der  $\text{NO}_2$ -Belastung verantwortlich sein. Der Beitrag des lokalen Pkw-Verkehrs wird entsprechend der Emissionsentwicklung schwächer zurückgehen als die Beiträge aus dem Schwerverkehr mit Lkw und Bus.

Die Analysen für die vier ausgewählten Messstationen in Baden-Württemberg zeigen, dass eine Erreichung des  $\text{NO}_2$ -Jahresgrenzwerts bis zum Jahr 2015 nur dann möglich erscheint, wenn die  $\text{NO}_2$ -Gesamtmission einer Messstation bereits heute im Bereich um  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  oder darunter liegt. Bei Stationen mit einem aktuellen  $\text{NO}_2$ -Jahresmittel von  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  oder darüber muss jedoch selbst im Jahr 2020 im Trend von einer Grenzwertüberschreitung ausgegangen werden. An der besonders hoch belasteten Messstation Stuttgart-Neckartor ist selbst unter der Annahme, dass sämtliche Kfz die derzeit schärfsten Abgasgrenzwerte Euro 6 (Pkw, LNF) bzw. Euro VI (Lkw, Bus) erfüllen, ohne Änderung des Verkehrs immer noch eine deutliche Grenzwertüberschreitung zu erwarten.

Um auch an den hoch belasteten Messstationen den  $\text{NO}_2$ -Jahresgrenzwert zukünftig zu erreichen, müsste durch lokale wie auch (über-) regionale Maßnahmen eine deutlich über den gegenwärtigen Trend hinausgehende Absenkung von  $\text{NO}_x$ - und  $\text{NO}_2$ -Emissionen erreicht werden. Diese müsste sowohl auf die lokalen Emissionen im Straßenraum als auch auf eine verstärkte Reduktion der allgemeinen Hintergrundbelastung abzielen.

## Literatur

- IFEU 2007 „Zukünftige Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrs und deren Auswirkung auf die NO<sub>2</sub>-Luftbelastung in Städten in Baden-Württemberg“. F. Dünnebeil, U. Lambrecht, IFEU Heidelberg. Unter Mitarbeit von C. Kessler (Aviso Aachen). Im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg; Heidelberg 2007.
- INFRAS 2004 „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs, Version 2.1“. M. Keller et al., INFRAS in Zusammenarbeit mit IFEU, TU Graz und RWTÜV: Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft Bern und der Umweltbundesämter Berlin und Wien; Bern/Heidelberg/Graz/Essen 2004.
- LUBW 2009 „Luftreinhalte-/Aktionspläne für Baden-Württemberg – Grundlagenband 2008“. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Karlsruhe 2009.
- RADM2 1998 „The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling“. Stockwell W.R., Middleton P., Chang J.S., Tang X., J. Geophys. Res. 95 (16343 -- 16367, 1990).
- RCG 2007 „Testing model accuracy measures according to the EU directives – examples using the chemical transport model REM-CALGRID. R. Stern, J. Flemming, Atmospheric Environment, Volume 41, Issue 39, December 2007, Pages 9206-9216.
- TREMOM 2009 „TREMOM – Transport Emission Model (Version 4.17, interne Aktualisierungen). Fortschreibung des Daten- und Rechenmodells Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030“. W. Knörr et al., IFEU Heidelberg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin/Heidelberg 2009.
- UBA 2009 „PAREST – Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Nr. 206 43 200/01 des Umweltforschungsplans des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, vergeben durch das Umweltbundesamt. Projektlaufzeit März 2007 - März 2010.
- Verwer 1994 „Gauss-Seidel iteration for stiff ODEs from chemical kinetics“. Verwer J.G., SIAM J. Sci. Comput. 15, 1243--1250 (1994).

## Anhang

**22. Die Verwendung aktueller NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren und aktualisierter Flottenzusammensetzungen führt zu neuen Erkenntnissen über die Beiträge der Fahrzeugkategorien zu den lokalen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen.**

In der vorangegangenen Studie [IFEU 2007] wurden NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen für die Messstation Stuttgart-Mitte für die Jahre 2005, 2010, 2015 und 2020 berechnet. Grundlage waren der damalige Kenntnisstand zu den spezifischen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen im Straßenverkehr, zur zukünftigen Entwicklung der Fahrzeugflottenzusammensetzung sowie vorliegende Informationen zu Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung an der Station.

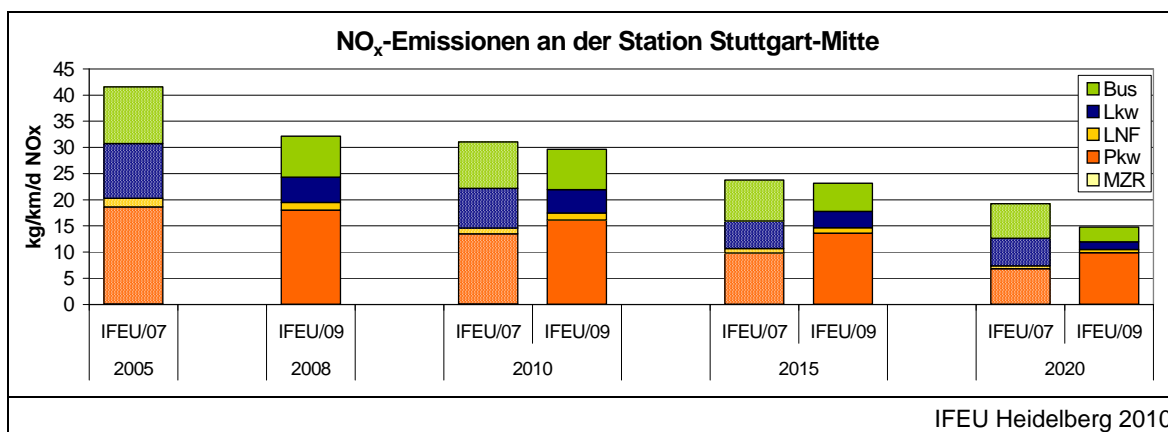
In einem Vergleich der Berechnungen aus dem Jahr 2007 mit den aktuellen Emissionsberechnungen für Stuttgart-Mitte wurde untersucht, wie sich die verwendeten aktuelleren Informationen auf die Höhe der berechneten Emissionen und die Anteile der verschiedenen Kfz-Kategorien an den NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen auswirken.

### NO<sub>x</sub>-Emissionen

Beim **Pkw-Verkehr** ergab die Neuberechnung deutlich höhere NO<sub>x</sub>-Emissionen für das Jahr 2010, zudem wurde ein schwächerer Emissionsrückgang bis 2020 berechnet. Hauptgrund sind neue, deutlich nach oben angepasste NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren für aktuelle Diesel-Pkw (Euro 3 & 4). Mit den bisherigen Faktoren auf Basis des „Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1“ [INFRAS 2004] wurden die NO<sub>x</sub>-Emissionen von Diesel-Pkw unterschätzt. Der schwächere NO<sub>x</sub>-Emissionsrückgang bis 2020 ist vor allem dadurch begründet, dass die spezifische NO<sub>x</sub>-Minderung durch zukünftige Grenzwertstufen Euro 5 & 6 für den innerörtlichen Verkehr schwächer angenommen wird als die Grenzwertabsenkung.

Beim **Lkw-Verkehr** ergab die Neuberechnung für das Jahr 2010 niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen. Wesentlicher Grund war ein niedrigerer Lkw-Verkehr (-36%) aufgrund neuer Zählzeiten vom September 2008 (vorherige Daten waren von 2002). Bis 2020 wurden in der Neuberechnung stärkere NO<sub>x</sub>-Rückgänge berechnet, was durch die 2009 beschlossene Euro VI-Einführung begründet ist, die in der vorigen Studie noch nicht berücksichtigt werden konnte.

Beim **Busverkehr** liegen die aktualisierten NO<sub>x</sub>-Emissionen im Jahr 2010 leicht niedriger als in [IFEU 2007]. Dieser Unterschied ist vor allem auf die Verwendung neuer Busflottendaten (Stand 2009) sowie aktualisierter NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren (vgl. Kap. 10) zurückzuführen. Die stärkeren NO<sub>x</sub>-Emissionsrückgänge bis 2020 in den Neuberechnungen sind wie bei Lkw mit der bisher nicht einbezogenen Einführung der neuen Grenzwertstufe Euro VI begründet.



**Abb. 20 Vergleich der aktuellen NO<sub>x</sub>-Emissionsberechnungen für die Station Stuttgart-Mitte mit den Berechnungen in [IFEU 2007]**

## NO<sub>2</sub>-Emissionen

Beim **Pkw-Verkehr** ergab die Neuberechnung etwas höhere NO<sub>2</sub>-Emissionen für das Jahr 2010 und einen schwächeren Emissionsrückgang bis zum Jahr 2020. Diese Änderungen sind im Wesentlichen durch die oben beschriebenen Unterschiede bei den NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren begründet, die Annahmen zu spezifischen NO<sub>2</sub>-Emissionsanteilen in den Pkw-Abgasen waren in den Berechnungen ähnlich.

Beim **Lkw-Verkehr** ergab die Neuberechnung für das Jahr 2010 niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen sowie stärkere Emissionsrückgänge bis 2020. Grund der Änderungen bei den NO<sub>2</sub>-Emissionen sind die oben beschriebenen Änderungen der NO<sub>x</sub>-Emissionen.

Auch beim **Busverkehr** war die Neuberechnete NO<sub>2</sub>-Emission im Jahr 2010 niedriger als in [IFEU 2007]. Grund dafür sind leicht niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen sowie etwas reduzierte NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse im Abgas der Fahrzeuge. Unter anderem wurden aktuelle NO<sub>2</sub>-Emissionsmessungen berücksichtigt, die für aktuelle CRT<sup>®</sup>-Systeme teilweise geringere NO<sub>2</sub>-Emissionsanteile als frühere Messungen zeigen<sup>3</sup>. Die größeren Emissionsminderungen bis 2020 in den aktuellen Emissionsberechnungen sind wie bei NO<sub>x</sub> vor allem durch die Einführung der in [IFEU 2007] noch nicht berücksichtigten Grenzwertstufe Euro VI begründet sowie zusätzlich durch eine stärkere Verringerung des Fahrleistungsanteils von Euro-III-Bussen mit Partikelfilter.

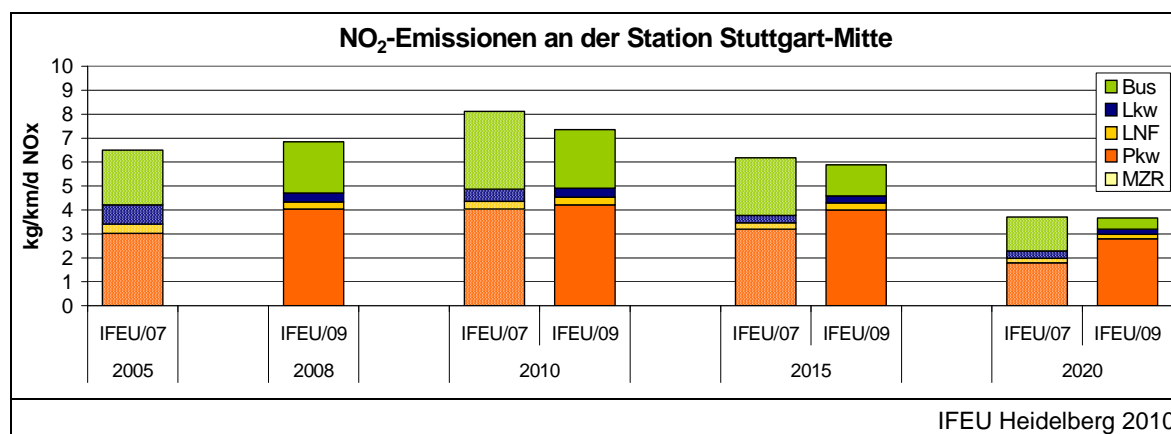


Abb. 21 Vergleich der aktuellen NO<sub>2</sub>-Emissionsberechnungen für die Station Stuttgart-Mitte mit den Berechnungen in [IFEU 2007]

Durch die Verfügbarkeit neuer Informationen zu spezifischen NO<sub>x</sub>-Emissionen von Fahrzeugen derzeitiger und zukünftiger Grenzwertstufen weisen aktuelle Emissionsberechnungen Unterschiede gegenüber früheren Berechnungen auf. Die neu berechneten Pkw-Emissionen sind höher und werden in Zukunft schwächer abnehmen als bisher angenommen. Dagegen werden im Schwerverkehr von Lkw und Bussen die NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen zukünftig stärker zurückgehen. Damit wird der Pkw-Verkehr in kommenden Jahren gegenüber den bisherigen Annahmen einen noch höheren Anteil an den lokalen NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen haben.

<sup>3</sup> Jüngste Messungen an einem einzelnen mit SCRT<sup>®</sup> ausgerüsteten Bus Euro III der SSB AG zeigen außergewöhnlich niedrige NO<sub>2</sub>-Anteile hinter dem Partikelfilter. Diese Ergebnisse weichen allerdings stark von anderen bisher bekannten Daten für Partikelminderungssysteme bei Bussen ab. Sie konnten in dieser Studie nicht berücksichtigt werden.

**23. Die NO<sub>2</sub>-Quellenanalysen auf Basis der Emissionsberechnungen zeigen im Jahresmittel eine gute Übereinstimmung mit den Auswertungen der Ozonmessdaten.**

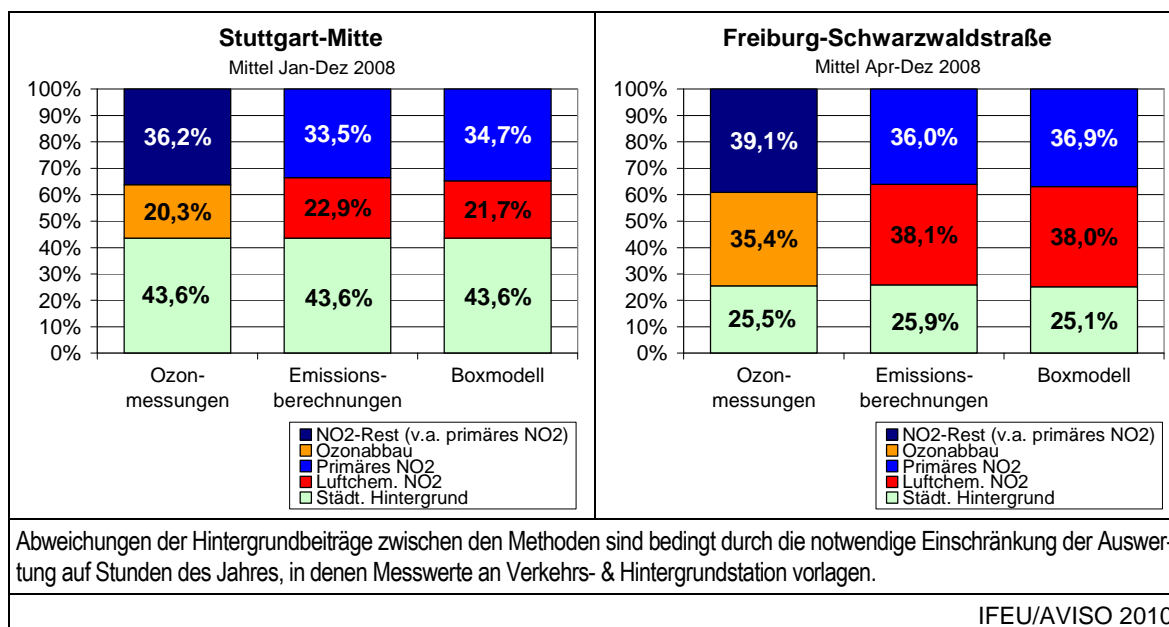
Die Differenzierung der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen nach Ursachen wurde für das Jahr 2008 an den Stationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen durchgeführt:

- auf der Basis straßennaher Ozonmessungen (Kap. 9),
- auf Basis der NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionsberechnungen (Kap. 14),
- mit Hilfe eines chemischen Boxmodells (Kap. 19).

Im Vergleich zeigt sich eine gute Übereinstimmung der mit den verschiedenen Quellenanalysen ermittelten Beiträge der Einzelursachen zur NO<sub>2</sub>-Konzentration im Jahresmittel (Abb. 22). Die Aufteilung der lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträge zwischen primärem NO<sub>2</sub> und luftchemisch gebildetem NO<sub>2</sub> anhand der Emissionsberechnungen war ähnlich zur Aufteilung mit dem Boxmodell, die ebenfalls auf Grundlage der Emissionsannahmen erfolgt<sup>4</sup>.

Auch die Aufteilung der lokalen NO<sub>2</sub>-Beiträge mithilfe der Ozonmessdaten zeigt demgegenüber nur leichte Abweichungen. Der Anteil aus dem Ozonabbau war an beiden Messstationen im Jahresmittel um 2-3 Prozentpunkte niedriger als der emissionsseitig rückgerechnete Gesamtbeitrag der lokalen Luftchemie, welcher noch weitere Prozesse neben dem Ozonabbau umfasst<sup>5</sup>. Umgekehrt war damit der rückgerechnete Anteil nicht-ozonbedingtes NO<sub>2</sub> im lokalen Beitrag insgesamt leicht höher als das direkt emittierte primäre NO<sub>2</sub>.

**Im Jahresmittel 2008 ergaben die verschiedenen Methoden der Quellenanalyse ähnliche Ergebnisse zu den Beiträgen der einzelnen Ursachen zur lokalen NO<sub>2</sub>-Konzentration an den Messstationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstr..**



**Abb. 22 Vergleich der NO<sub>2</sub>-Quellenanalysen für die Jahresmittelwerte 2008**

<sup>4</sup> Zur Methodik im Boxmodell vgl. [IFEU 2007, S. 29ff].

<sup>5</sup> Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Auswertungen für die Station Stuttgart-Mitte in [IFEU 2007], wonach der Ozonabbau im Jahresmittel 2005 nur für ca. 80% der lokalen luftchemischen NO<sub>2</sub>-Bildung an der Messstation verantwortlich war.

Im Jahresverlauf ergab die Quellenanalyse mit den verschiedenen Methoden grundsätzlich ähnliche Verläufe mit im Sommer deutlich erhöhten Beiträgen von lokalem Ozonabbau bzw. gesamter Luftchemie. Allerdings waren die monatlichen Unterschiede bei der Höhe der Einzelbeiträge zwischen den Methoden z.T recht groß.

An der Station Freiburg-Schwarzwaldstraße (Abb. 23, oben) ging der immissionsseitig bestimmte NO<sub>2</sub>-Beitrag aus dem lokalen Ozonabbau zum Winter deutlich stärker zurück als der über die Emissionen ermittelte Gesamtbeitrag lokaler Luftchemie. Während der Gesamtbeitrag der lokalen Luftchemie im Sommer nur um 0-10% höher war als der rein ozonbedingte NO<sub>2</sub>-Beitrag, war er im November und Dezember mit bis zu 9 µg/m<sup>3</sup> Differenz teilweise doppelt so hoch. Auch an der Messstation Stuttgart-Mitte (Abb. 23, unten) zeigten sich ähnliche Unterschiede zwischen den Methoden wie in Freiburg, allerdings war hier ein jahreszeitlicher Bezug weniger ausgeprägt.

Zur Aufklärung dieser Abweichungen im Jahresverlauf wären weitere detaillierte Analysen des Einflusses nicht-ozonabhängiger luftchemischer Prozesse auf die NO<sub>2</sub>-Bildung notwendig. Auch wäre eine Untersuchung möglicher Einflüsse von Umgebungstemperatur und anderen meteorologischen Einflüssen auf die NO<sub>2</sub>-Emissionsanteile im Abgas sinnvoll. Beides war im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht leistbar.

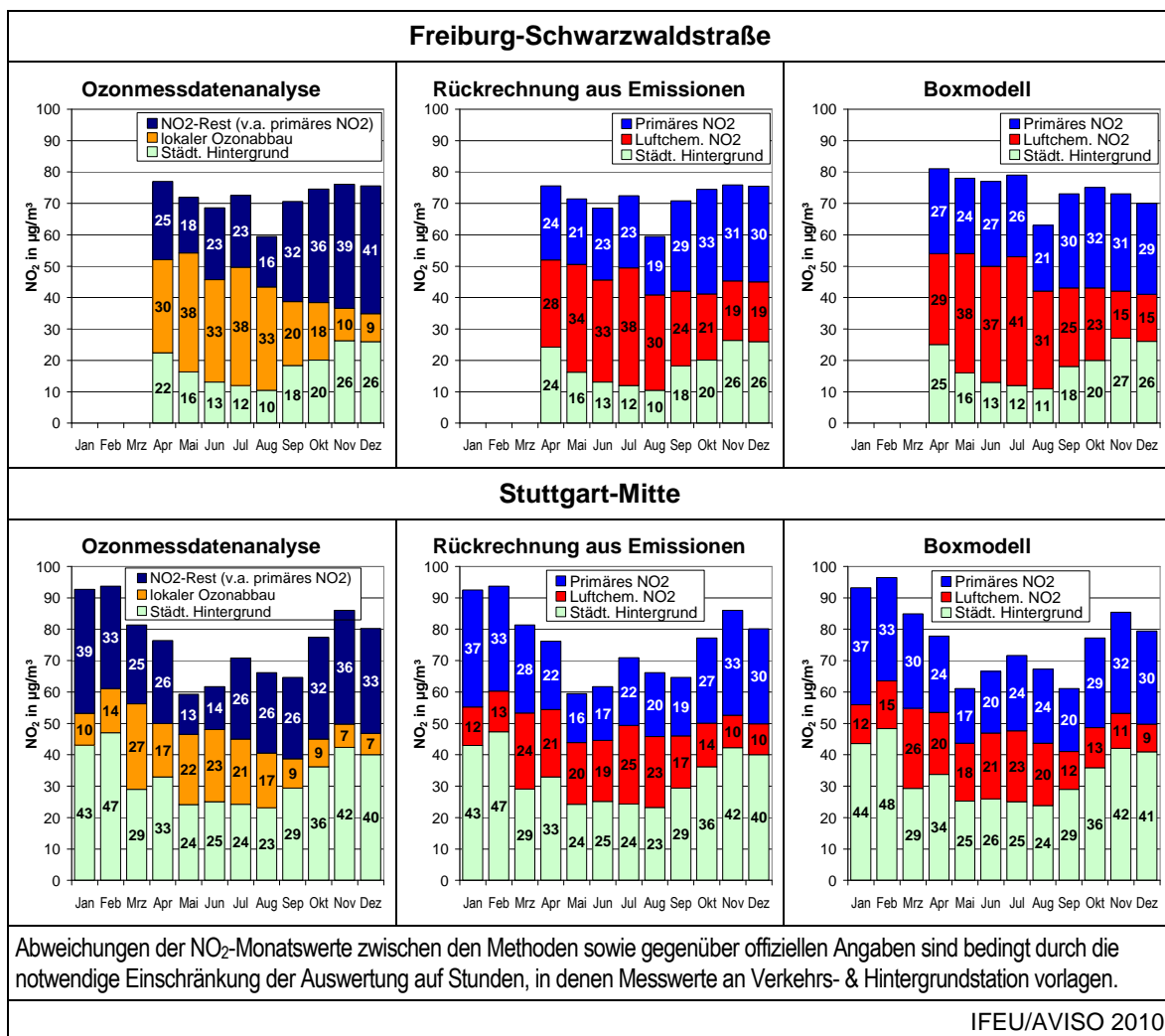
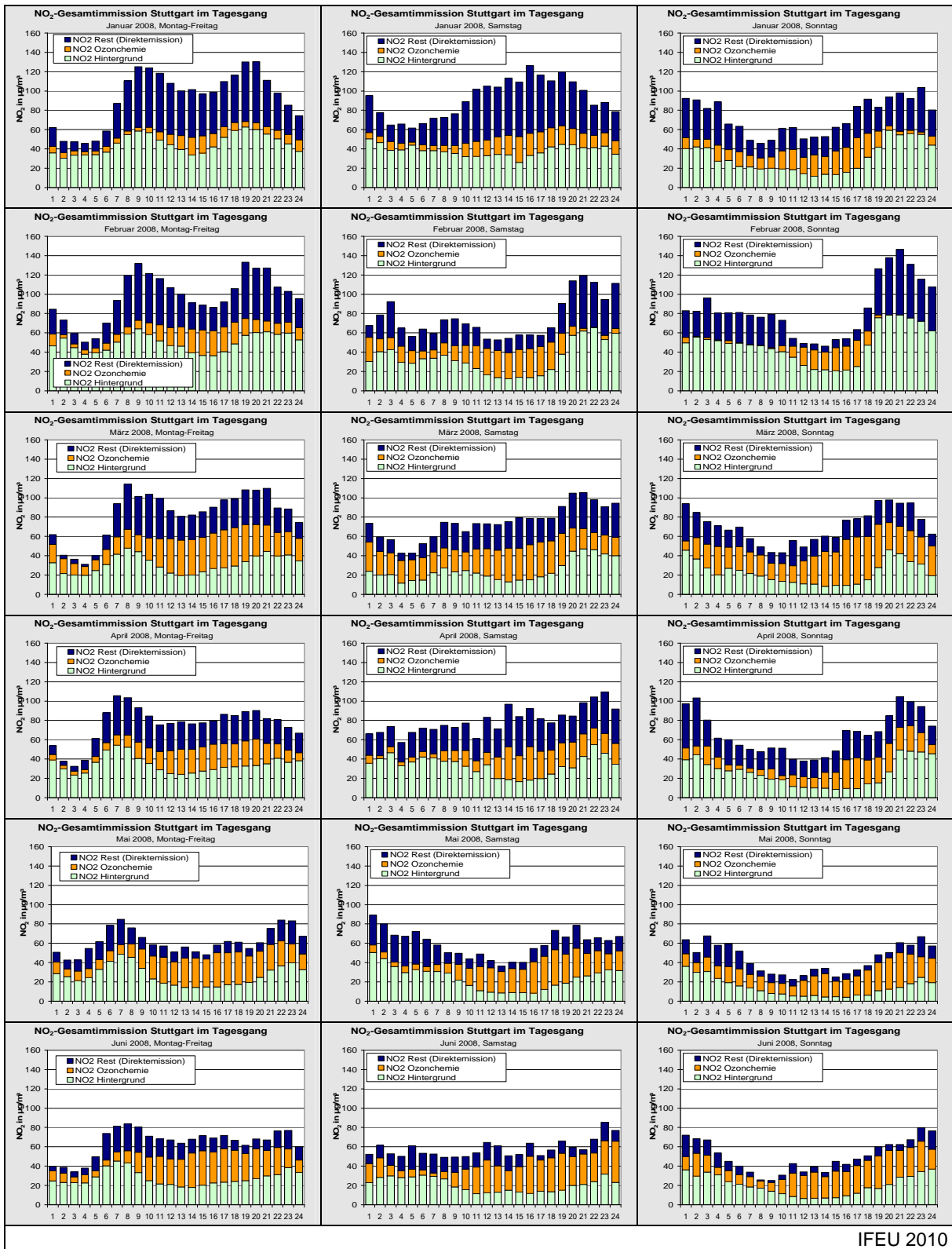
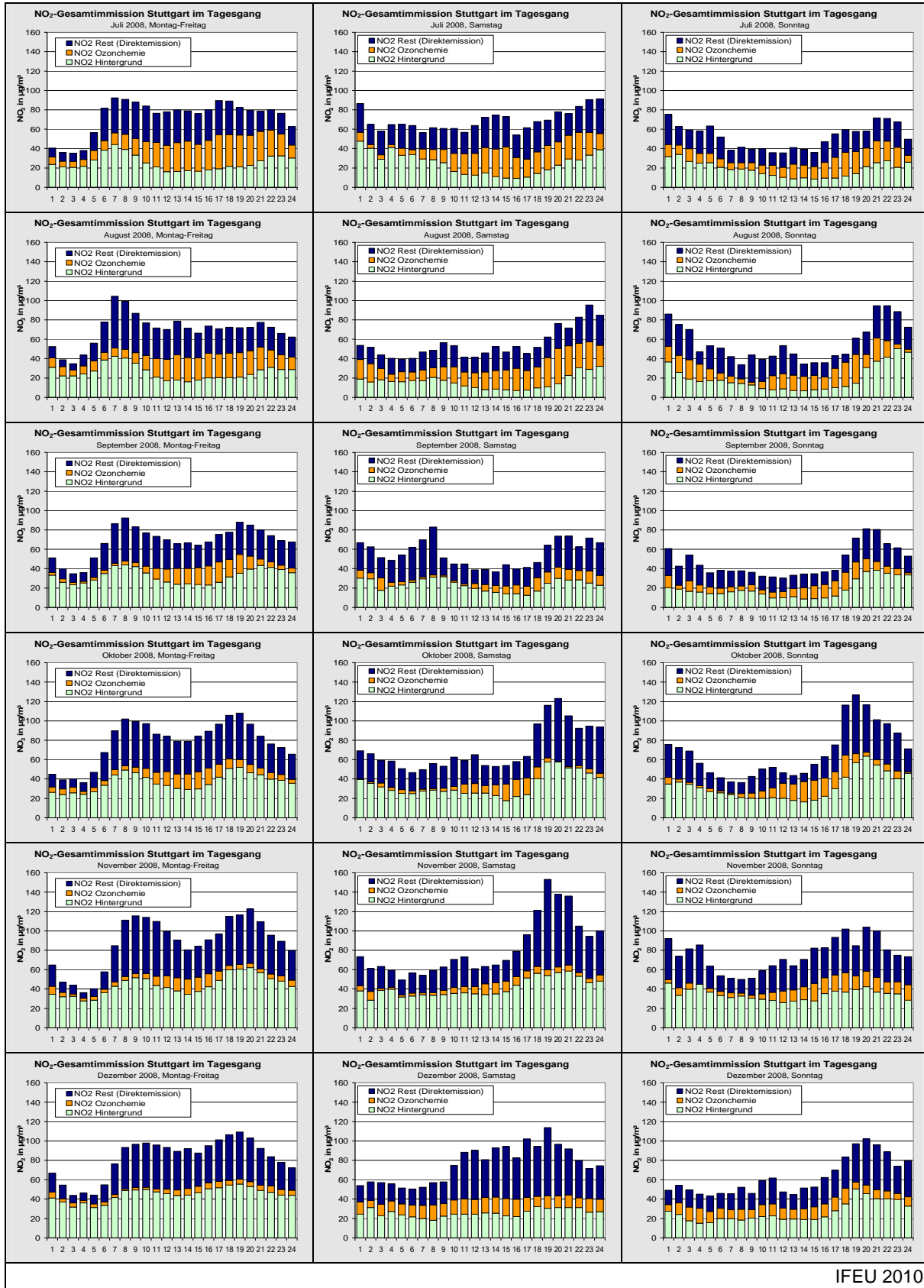


Abb. 23 Vergleich der NO<sub>2</sub>-Ursachenanalysen im Jahresverlauf 2008

**24. Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission mit Beiträgen einzelner Ursachen an den Stationen Stuttgart-Mitte und Freiburg-Schwarzwaldstraße**



**Abb. 24 Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an der Messstation Stuttgart-Mitte im Zeitraum Januar bis Juni 2008**



IFEU 2010

Abb. 25 Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an der Messstation Stuttgart-Mitte im Zeitraum Juli bis Dezember 2008

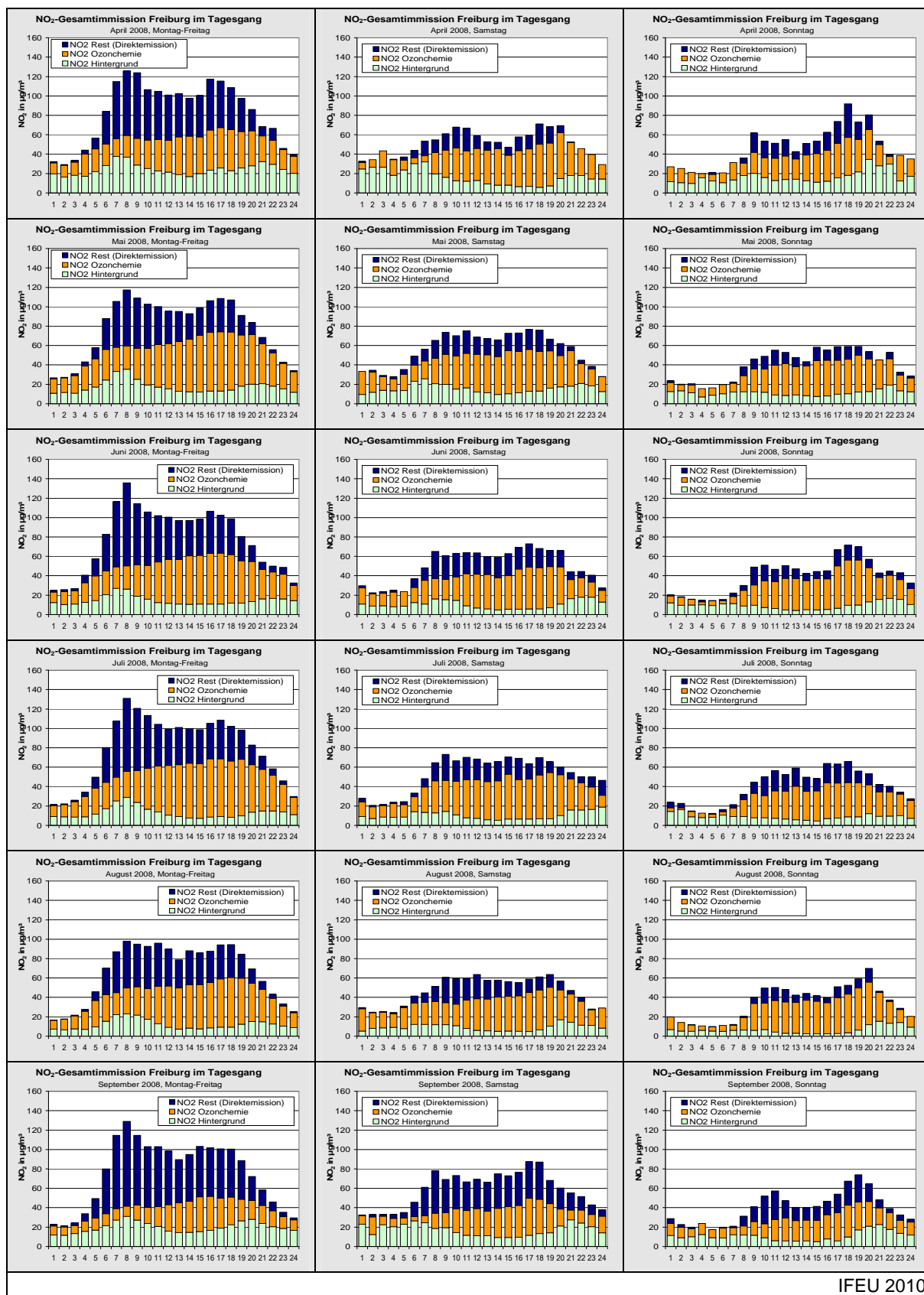


Abb. 26 Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an der Messstation Freiburg-Schwarzwaldstraße im Zeitraum April bis September 2008

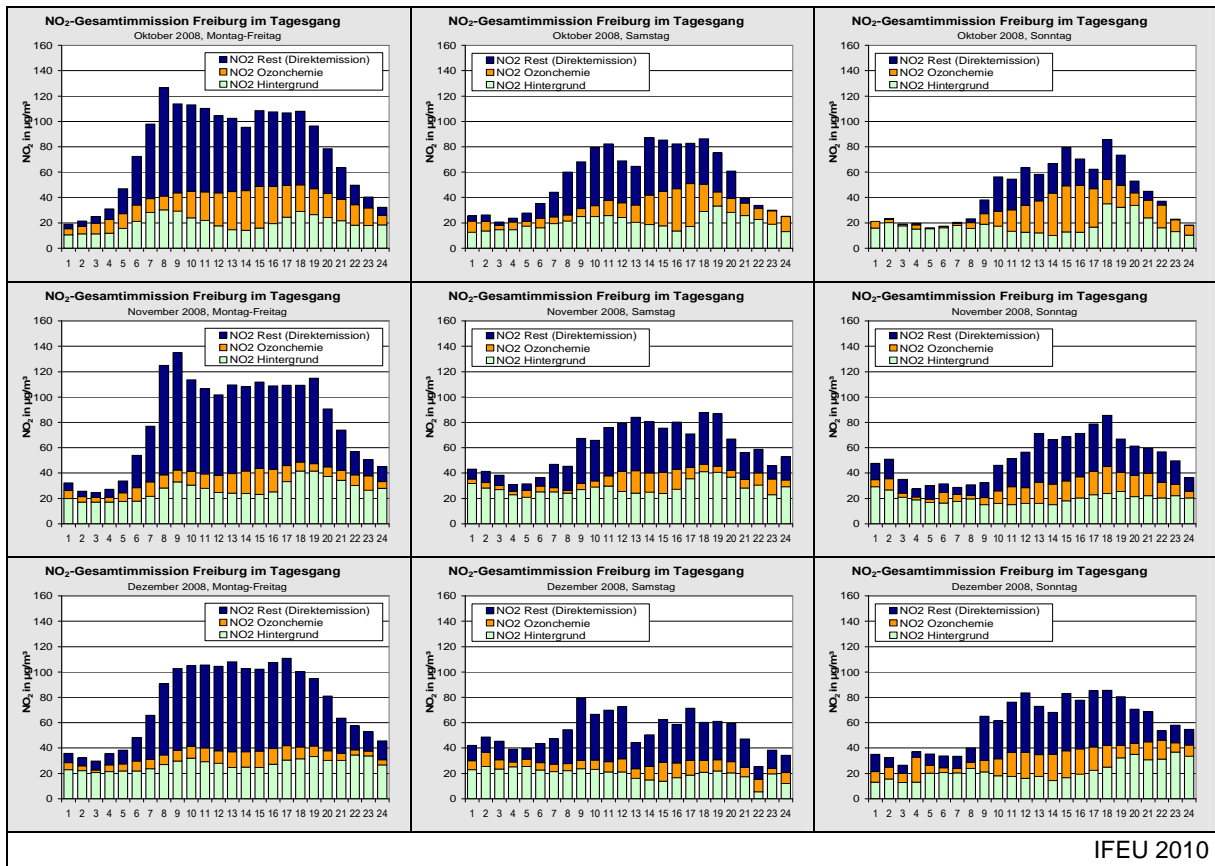


Abb. 27 Tagesgänge der NO<sub>2</sub>-Gesamtmission an der Messstation Freiburg-Schwarzwaldstraße im Zeitraum Oktober bis Dezember 2008