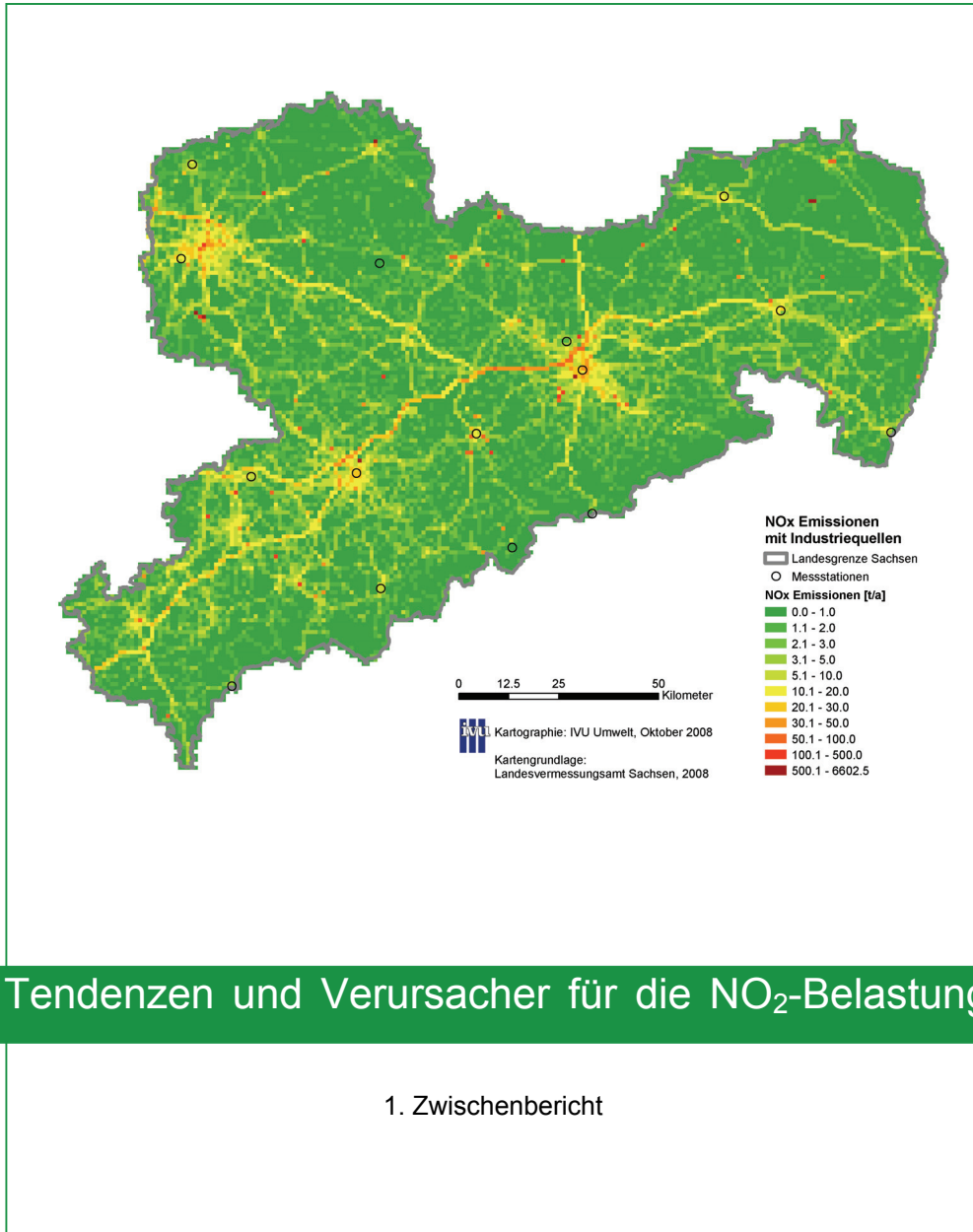




Das Lebensministerium



Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

## **Tendenzen und Verursacher für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen**

### **1. Zwischenbericht**

IVU Umwelt GmbH

Volker Diegmann, Dr. Götz Wiegand,

Dr. Lina Neunhäuserer, Anna Mahlau

Mail: volker.diegmann@ivu-umwelt.de

und

TÜV NORD Mobilität GmbH & CO. KG

Heinz Steven

IFM - Antrieb / Emissionen

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Problemstellung .....	1
1.1	Einordnung des Vorhabens .....	1
1.2	Ziele des Vorhabens .....	1
2	Inhalt des 1. Zwischenberichts .....	1
3	Ermittlung der Tendenzen für die NO <sub>2</sub> -Belastung in Sachsen im Vergleich zum bundesdeutschen Trend .....	2
3.1	Statistische Analyse der sächsischen Daten .....	2
3.1.1	Datenverfügbarkeit .....	2
3.1.2	Clusteranalyse .....	5
3.1.2.1	NO-Zeitreihen .....	5
3.1.2.2	NO <sub>2</sub> -Zeitreihen .....	8
3.1.2.3	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis .....	10
3.1.2.4	Ozon .....	10
3.1.3	Trendanalyse auf Stundenwertbasis .....	12
3.1.3.1	Mann-Kendall-Test für saisonbehafte Daten .....	12
3.1.3.2	Ergebnisse für NO <sub>x</sub> , NO <sub>2</sub> und Ozon .....	13
3.1.3.3	Ergebnisse für das NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Verhältnis .....	15
3.2	Vergleich der sächsischen NO <sub>2</sub> -Messungen mit bundesdeutschen Messdaten .....	17
3.2.1	Jahresdaten Sachsen .....	17
3.2.2	Jahresdaten Deutschland .....	19
3.2.3	Vergleich der Jahresdaten für Sachsen und Deutschland .....	21
3.2.4	Vergleich zum Romberg-Ansatz .....	22
3.3	Quantifizierung des meteorologischen Einflusses, Berücksichtigung der Ozonchemie ..	25
3.3.1	Entwicklung der Ozonwerte und meteorologischer Komponenten im Jahresmittel .....	25
3.3.2	Statistische Analyse möglicher Einflussfaktoren .....	28
3.3.2.1	Betrachtete Stationen .....	28
3.3.2.2	Eingangsdaten .....	33
3.3.2.2.1	Immissionen .....	33
3.3.2.2.2	Photochemisches Gleichgewicht .....	33
3.3.2.2.3	Verkehrsdaten .....	34
3.3.2.2.4	Meteorologische Daten .....	35
3.3.2.3	Einflussfaktoren Emissionen und Ozonchemie .....	35
3.3.2.3.1	Korrelationsmatrizen .....	35
3.3.2.3.2	Multivariate Regressionsanalyse .....	38
3.3.2.4	Einflussfaktoren Meteorologie .....	38
3.3.2.4.1	Korrelationsmatrizen .....	39

3.3.2.4.2	Multivariate Regressionsanalyse.....	42
3.4	Prüfung eines möglichen Bedarfs für die Weiterentwicklung des sächsischen Luftmessnetzes .....	42
3.4.1	Betrachtetes Messnetz .....	43
3.4.2	Methodik.....	44
3.4.2.1	Berechnungen mit FLADIS.....	44
3.4.2.2	Ausbreitungsrechnungen mit LASAT .....	45
3.4.2.2.1	Modellgebiet und Orographie .....	45
3.4.2.2.2	Meteorologie.....	46
3.4.2.2.3	Emissionen.....	47
3.4.2.2.4	Immissionsberechnung.....	49
3.4.3	Ergebnisse .....	51
3.4.4	Auswertung .....	55
4	Ermittlung der wesentlichen Verursacher für die NO <sub>2</sub> -Belastung in Sachsen.....	60
4.1	Überprüfung der in den Luftreinhalteplänen getroffenen Aussagen .....	60
4.2	Vertiefende Analyse der Kraftfahrzeugtechnik und Abgasminderungstechnologien .....	61
4.2.1	Modellierung der Emissionsfaktoren für NO <sub>x</sub> .....	61
4.2.1.1	Vorbemerkungen.....	61
4.2.1.2	Modifizierungen für Pkw .....	62
4.2.1.3	Modifizierungen für leichte Nutzfahrzeuge .....	64
4.2.1.4	Modifizierungen für schwere Nutzfahrzeuge .....	66
4.2.2	Erstellung einer modifizierten Emissionsdatenbasis für Bezugsjahre zwischen 2008 und 2020 .....	66
4.2.3	Vorschlag zum NO <sub>2</sub> -Anteil am NO <sub>x</sub> -Abgas .....	75
4.3	Ableitung von Fortschreibungsbedarf für das sächsische Emissionskataster .....	75
5	Prognose der Entwicklung bis 2020 .....	76
5.1	Aussagen der Luftreinhaltepläne.....	76
5.1.1	Prognose 2010 .....	76
5.1.2	Prognose 2015 .....	77
5.2	Prognose der Entwicklung für die Bergstraße und die Lützner -Straße.....	78
5.3	Einfluss der Klimaänderung auf die NO <sub>2</sub> -Belastungssituation .....	82
6	Erste Schlussfolgerungen für Maßnahmen zur Minderung der NO <sub>2</sub> -Belastung.....	84
7	Zusammenfassung .....	85
8	Literaturverzeichnis .....	88

## Abkürzungsverzeichnis

[...]	Kennzeichnung Volumenkonzentration
[...] <sup>B</sup>	Kennzeichnung Überdach-Konzentration als Volumenkonzentration
a	Beschleunigung
AKTerm	Ausbreitungsklassen-Zeitreihe
AP	Aktionsplan
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BJ	Bezugsjahr
d. h.	das heißt
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
DWD	Deutscher Wetterdienst
E-Faktoren	Emissionsfaktoren
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
EoI	Exchange of Information; Informationsaustausch Luftqualität innerhalb der EU (2001/752/EG)
EURO x	EURO 1 bis EURO 6, EURO I bis EURO VI; Abgasnormen
FT	Ferntransport
FuE	Forschung und Entwicklung
GFA	Großfeuerungsanlage
ggf.	gegebenenfalls
GWL	Großwetterlage
Haus	Hausbrand
HBEfa	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
Hum	relative Feuchte
Ind	Industrie – Gewerbe - Großfeuerungsanlagen
k <sub>1</sub>	NO <sub>2</sub> -Photolysefrequenz
k <sub>3</sub>	Reaktionskonstante für Ozonabbau durch NO in NO <sub>2</sub> und O <sub>2</sub>
k. A.	keine Angabe
Kap.	Kapitel
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
Kfz	Kraftfahrzeug
Klein	Kleinverbraucher
Krad	Motorrad, Kraftrad, einspuriges Kraftfahrzeug
Land	Landwirtschaft
LfUG	Sächsisches Landsamt für Umwelt und Geologie (bis 01.08.2008)
LfULG	Sächsisches Landsamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (seit 01.08.2008)

LIMBA	Luftimmissionsdatenbank des Umweltbundesamtes
LKW	Lastkraftwagen
LNfz	Leichte Nutzfahrzeuge
LRP	Luftreinhalteplan
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>2</sub> Emis	NO <sub>2</sub> -Emissionen
NO <sub>2</sub> zuNO <sub>x</sub>	NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub> -Emissionsverhältnis
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid
O	atomarer Sauerstoff
O <sub>2</sub>	molekularer Sauerstoff
O <sub>3</sub>	Ozon
OI	Optimale Interpolation
PCE	Photochemical Equilibrium; Photochemisches Gleichgewicht
Pkw	Personenkraftwagen
PM10	Partikel (Particulate Matter) <10 µm (aerodynamischer Durchmesser)
Pre	Luftdruck
Rad	Strahlung
RB	Regierungsbezirk
RP	Regierungspräsidium
SCR	selektive katalytische Reduktion von Stickstoffoxiden in Abgasen
SNfz	Schwere Nutzfahrzeuge
Sum	Summe
SumKfz	Summe der Kraftfahrzeuge
Tem	Temperatur
THG	Treibhausgas
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
ÜS	Überschreitung
v	Geschwindigkeit
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VS	Verkehr Sonstige (Flugverkehr, Schifffahrt, Schienenverkehr)
WiG	Windgeschwindigkeit
WiR	Windrichtung
z. B.	zum Beispiel
zul.	zulässig

## **1 Einführung und Problemstellung**

### **1.1 Einordnung des Vorhabens**

Das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) ist u. a. zuständig für die Überwachung der Luftqualität und die Prüfung von Maßnahmen zur Einhaltung von Grenzwerten bzw. zur Verminderung von Luftverunreinigungen.

Die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen liegt in den drei Ballungsräumen Dresden, Chemnitz und Leipzig über den Grenzwerten für 2010 bzw. über den zurzeit geltenden Grenzwerten inklusive der Toleranzmarge. Diese Überschreitungen sind neben den Grenzwertüberschreitungen bei PM10 die Auslöser für die Aufstellung von Luftreinhalteplänen. Die Luftreinhaltepläne müssen verhältnismäßige und verursachergerechte Maßnahmen zur Minderung der Belastung bis zur Einhaltung der Grenzwerte beinhalten.

Als Hauptverursacher für die NO<sub>2</sub>-Belastung gilt der Straßenverkehr. Durch die Entwicklung der Motortechnik und der Abgasnachbehandlung sind bisher nicht ausreichend untersuchte Einflüsse auf die direkten NO<sub>2</sub>-Emissionen und damit die Belastungen an verkehrsreichen Straßen entstanden. Die weitere Entwicklung auf technischem Gebiet und die Auswirkungen auf die Immissionsbelastung sind vor dem Hintergrund sich ändernder meteorologischer Bedingungen (Klimawandel) abzuschätzen. Nur so können weitere zielführende Maßnahmen in Luftreinhalteplänen erkannt und modelliert werden.

### **1.2 Ziele des Vorhabens**

Um die NO<sub>2</sub>-Belastung und ihre Entwicklung in Sachsen zu analysieren, wurde vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie das FuE-Vorhaben "Tendenzen und Verursacher für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen" initiiert, zu dem mit diesem Text der 1. Zwischenbericht vorliegt. Die Ziele des Vorhabens sind:

- a) Ermittlung der Tendenzen für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen im Vergleich zum bundesdeutschen Trend
- b) Ermittlung der wesentlichen Verursacher für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen
- c) Prognose der Entwicklung bis 2020
- d) Schlussfolgerungen für Maßnahmen zur Minderung der NO<sub>2</sub>-Belastung

## **2 Inhalt des 1. Zwischenberichts**

Der 1. Zwischenbericht stellt die Arbeiten im Projekt des Jahres 2008 vor. Darin werden alle Arbeitspakete der Projektbeschreibung gemäß der Leistungsbeschreibung durch das Land Sachsen und des Angebots durch den Auftragnehmer in ihrem derzeitigem Bearbeitungsstand beschrieben.

Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Ermittlung der Tendenzen für die NO<sub>2</sub>-Belastung auf der Basis von Messdaten (Kapitel 3) mit den Unterpunkten:

- Statistische Analyse der sächsischen Daten (Kapitel 3.1)
- Vergleich der sächsischen NO<sub>2</sub>-Messungen mit bundesdeutschen Messdaten (Kapitel 3.2)
- Quantifizierung des meteorologischen Einflusses und Berücksichtigung der Ozonchemie (Kapitel 3.3)
- Prüfung eines möglichen Bedarfs für die Weiterentwicklung des sächsischen Luftmessnetzes (Kapitel 3.4)

In Ergänzung zur statistischen Analyse in Kapitel 3 wurden die vollständigen Auswertungen zur Clusteranalyse, Trendanalyse und Korrelationsanalyse im Anlagenband zum 1. Zwischenbericht zusammengefasst.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Ermittlung der wesentlichen Verursacher für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen (Kapitel 4) mit dem Hauptaugenmerk auf der vertiefenden Analyse der Kraftfahrzeugtechnik und Abgasminderungstechnologien (Kapitel 4.2), die die Prognose der Emissionsentwicklung bis 2020 beinhaltet (Kapitel 4.2.2). Autor der Analyse der Kraftfahrzeugtechnik in Kapitel 4.2 ist Heinz Steven (TÜV Nord).

In Kapitel 5 wird u. a. die in Kapitel 4.2.2 prognostizierte Emissionsentwicklung auf zwei exemplarische Hotspots angewendet und mit der Emissionsentwicklung auf der Basis aktueller Daten verglichen, um den Einfluss der Emissionsdatenbasis auf die NO<sub>2</sub>-Belastung zu überprüfen (Kapitel 5.2). Zudem wird der Einfluss der langfristigen Klimaentwicklung auf die mittelfristige Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Belastung diskutiert (Kapitel 5.3).

Kapitel 6 enthält erste Schlussfolgerungen für Maßnahmen zur Minderung der NO<sub>2</sub>-Belastung.

Der 1. Zwischenbericht bildet damit eine gute Basis für die sich im Frühjahr 2009 anschließende Aktualisierung, bei der ausgewählte Fragestellungen vertiefend analysiert und die Datenbasis, wo nötig, aktualisiert werden kann.

### **3 Ermittlung der Tendenzen für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen im Vergleich zum bundesdeutschen Trend**

#### **3.1 Statistische Analyse der sächsischen Daten**

Der Freistaat Sachsen betreibt zur Überwachung und Beurteilung der Luftqualität ein stationäres Luftgütemessnetz mit ca. 30 Messstationen. Erfasst werden an diesen Stationen u. a. die Konzentrationen von

- Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> und NO)
- Ozon (O<sub>3</sub>).

Zusätzlich werden an allen Stationen auch meteorologische Komponenten gemessen.

Für die vom Auftraggeber bereitgestellten Messdaten der letzten Jahre wurden statistische Analysen zur Ermittlung von Trends durchgeführt. Dabei wurden die Stationen mittels einer Clusteranalyse nach unterschiedlichen Merkmalen differenziert. Die Ergebnisse der Clusteranalyse wurden mit der Stationsklassifizierung (gemäß Eol) abgeglichen. Bei der Trendanalyse wurde eine differenzierte Betrachtung von NO<sub>x</sub>, NO und NO<sub>2</sub> durchgeführt sowie das Verhältnis von NO<sub>2</sub> zu NO<sub>x</sub> untersucht.

##### **3.1.1 Datenverfügbarkeit**

Für die Datenauswertung wurden Messzeitreihen aus den Jahren 1995 bis 2007 ausgewertet. Tabelle 3-1 zeigt für den Stoff NO<sub>2</sub> die Liste der Messstationen, für die im Untersuchungszeitraum 01.01.1995 – 31.12.2007 Daten vorlagen, mit Eol-Klassifizierung, Messbeginn, Mittelwert über den angegebenen Zeitraum sowie die Anzahl der verfügbaren Werte bzw. deren Anteil bezogen auf den Untersuchungszeitraum. Die Messdaten lagen in stündlicher Auflösung vor.

Die Datenverfügbarkeit für NO<sub>2</sub> ist in Abbildung 3-1 dargestellt. Sortierkriterium der Stationen entlang der Abszisse ist dabei der Mittelwert der NO<sub>2</sub>-Immissionen über den Untersuchungszeitraum. Der auf der Ordinate aufgetragene Index stellt die numerische Repräsentation des Kalenderdatums (Anzahl Stunden seit Beginn des Untersuchungszeitraums) dar. Fehlwerte sind rot kodiert, die Graustufen bilden die Stundenwerte der gemessenen



Konzentrationen ab. Abbildung 3-2 veranschaulicht die Anzahl der Fehlwerte der einzelnen Stationen. Tabelle und Abbildungen zeigen, dass im Jahr 2001 eine (Leipzig-Lützner Str.) und im Jahr 2005 zwei (Chemnitz-Leipziger Str., Dresden-Bergstr.) Verkehrsmessstationen in Betrieb gingen, die im Mittel mit die höchsten NO<sub>2</sub>-Werte messen.

**Tabelle 3-1: Mittelwert und Verfügbarkeit für NO<sub>2</sub>-Messungen der Messstationen im Zeitraum 1995 bis 2007**

Stationsname	Kürzel	Höhe (m)	Eol Gebietstyp	Eol Stationstyp	Messbeginn	Mittelwert (µg/m <sup>3</sup> )	verfügbare Werte	verfügb. Anteil (%)
Annaberg-Buchholz	Annaberg-R	545	urban	Hintergrund	01.09.1994	29.7	108675	95.4
Bautzen	Bautzen-U	203	urban	Hintergrund	01.09.1994	26.2	109071	95.7
Borna	Borna-V	145	urban	Verkehr	01.09.1994	36	108319	95.1
Chemnitz-Leipziger Str.	ChmtzLpz-V	327	urban	Verkehr	01.01.2005	60.4	24230	21.3
Chemnitz-Mitte	ChmtzMit-U	300	urban	Hintergrund	01.12.1990	30.9	107052	93.9
Chemnitz-Nord	ChmtzNor-V	296	urban	Verkehr	01.09.1994	39.2	108555	95.3
Collmburg	Collm-R	313	rural abgel.	Hintergrund	01.10.1998	12.9	77900	68.4
Delitzsch	Delitzsc-U	100	urban	Hintergrund	01.09.1994	24.9	108328	95.1
Dresden-Bergstr.	DrdnBerg-V	150	urban	Verkehr	01.01.2005	57	24184	21.2
Dresden-HerzoginGarten	DDHerzog-U	112	urban	Hintergrund	01.01.2006	26.3	17291	15.2
Dresden-Nord	DrdnNord-V	112	urban	Verkehr	01.09.1994	46.1	106608	93.6
Freiberg	Freiberg-U	393	urban	Hintergrund	01.09.1994	31.1	109131	95.8
Glauchau	Glauchau-U	233	urban	Hintergrund	01.09.1994	29	108340	95.1
Görlitz	Goerlitz-V	210	urban	Verkehr	01.09.1994	31.6	107401	94.3
Hoyerswerda	Hoywerda-U	117	urban	Hintergrund	01.09.1994	18.8	108210	95.0
Klingenthal	Klinthal-U	540	urban	Hintergrund	01.09.1994	19	108762	95.4
Leipzig-Lützner Str.	LpzLuet-V	110	urban	Verkehr	01.01.2001	47.6	40723	35.7
Leipzig-Mitte	LpzMit-V	110	urban	Verkehr	01.12.1990	48.8	106433	93.4
Leipzig-West	LpzWest-U	115	urban	Hintergrund	01.09.1994	22.9	108679	95.4
Plauen-Süd	Plausued-V	343	urban	Verkehr	06.08.1998	33.1	78593	69.0
Radebeul-Wahnsdorf	RadeWahn-RU	246	rural stadtnah	Hintergrund	01.12.1967	18.6	105454	92.5
Schwarzenberg	Schwarzbg-R	787	rural abgel.	Hintergrund	06.02.1998	12.4	83713	73.5
Zinnwald	Zinnwald-R	877	rural reg.	Hintergrund	01.05.1978	12.9	105414	92.5
Zittau-Ost	ZittOst-UR	230	vorurban	Hintergrund	01.07.1990	16	107678	94.5
Zwickau	Zwickau-V	265	urban	Verkehr	01.09.1994	35.3	106465	93.4

Farblegende
Verkehr
Städtisch Hintergrund
Vorstädt. Hintergrund
Ländlich stadtnah
Ländlich abgelegen/regional

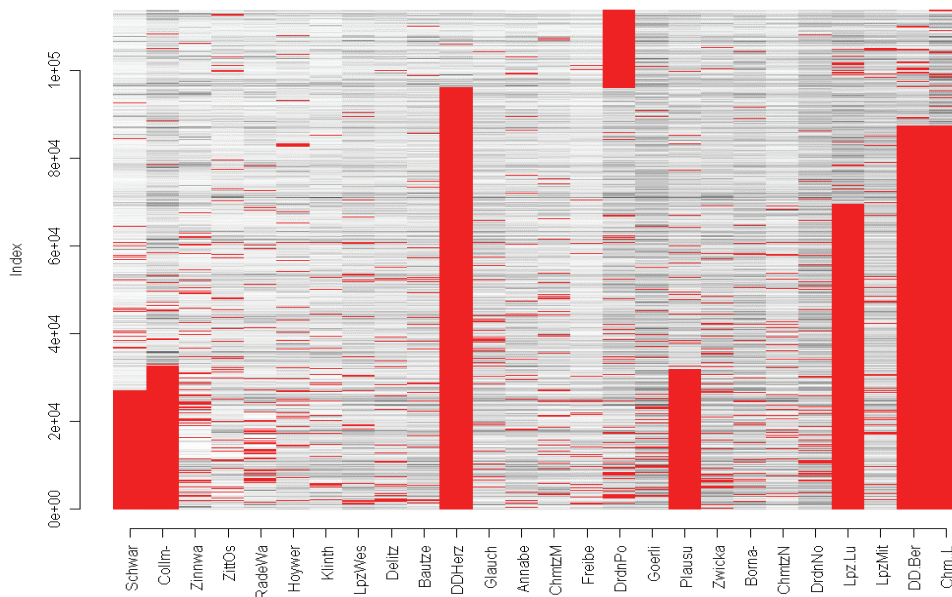


Abbildung 3-1: Datenverfügbarkeit für NO<sub>2</sub>-Messungen

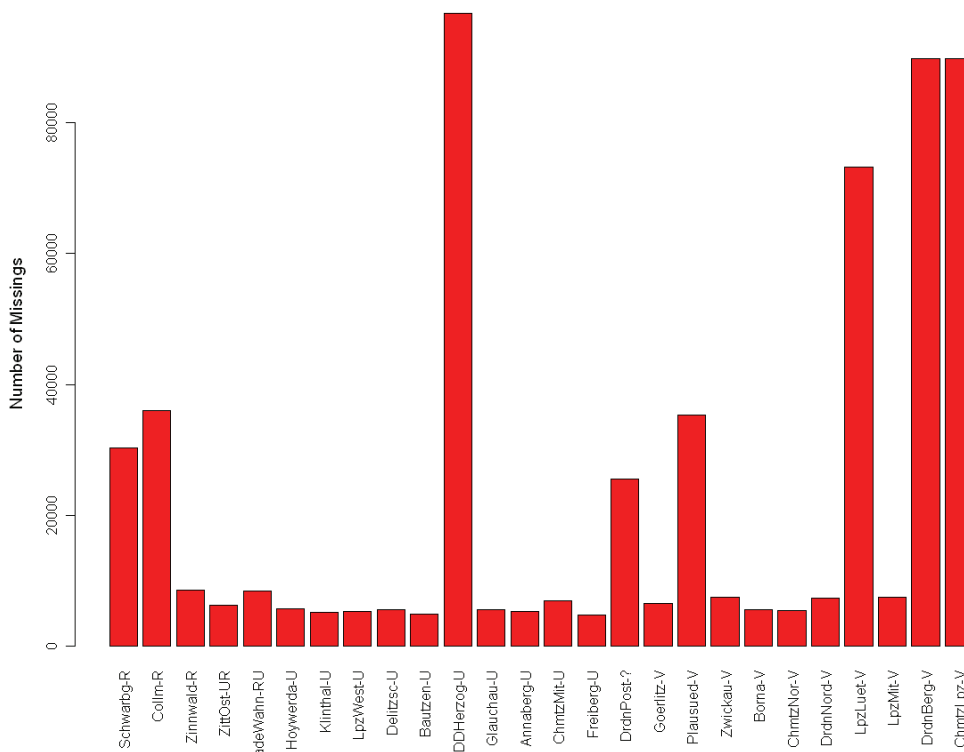


Abbildung 3-2: Anzahl Fehlerte bei NO<sub>2</sub>-Messungen von 1995 bis 2007

### 3.1.2 Clusteranalyse

Mit Hilfe einer Clusteranalyse wurden die Messstationen auf der Basis ihrer stundenfein aufgelösten Messzeitreihen differenziert. Eine Clusteranalyse der Zeitreihen einer Größe – hier der gemessenen Konzentrationen – deckt ähnliche Strukturen in den Zeitreihen auf. In der vorliegenden Untersuchung wurde das hierarchische Clusteranalyseverfahren unter Verwendung der euklidischen Distanz eingesetzt. Dazu wurde die Open-Source-Software "R" (R DEVELOPMENT CORE TEAM (2007)) verwendet.

Im ersten Schritt der Clusteranalyse werden die euklidischen Distanzen zwischen allen Elementen, hier die Messzeitreihen der Stationen, untereinander berechnet. Die euklidische Distanz ist im allgemeinen Fall des n-dimensionalen euklidischen Raums definiert durch die euklidische Norm des Differenzvektors zwischen zwei Elementen A und B, d. h.:

$$\text{dist}(A,B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}$$

Im vorliegenden Fall entspricht n der Anzahl der Messwerte der Zeitreihen im Untersuchungszeitraum.  $a_i$  bzw.  $b_i$  entspricht dem Messwert der Zeitreihe A bzw. B zu jedem Eintrag der Zeitreihe.

Im zweiten Schritt werden die beiden Elemente (hier Zeitreihen) mit der kleinsten Distanz zu einem Cluster verschmolzen, und als Position des Clusters wird der Schwerpunkt der beiden Elemente berechnet. Diese beiden Schritte werden so oft durchgeführt, bis alle Elemente zu einer gewünschten Anzahl von Clustern oder ggf. zu einem einzigen Cluster verschmolzen sind. Die auf diese Weise entstandene Baumstruktur wird in der Regel mit einem Dendrogramm visualisiert.

#### 3.1.2.1 NO-Zeitreihen

Das Dendrogramm der Clusteranalyse für NO ist in Abbildung 3-3 dargestellt, Abbildung 3-4 zeigt die Lage der aktuell NO messenden Stationen in Sachsen.

Aus der Clusteranalyse bilden sich deutlich die Verkehrsstationen heraus (roter Kasten rechts in Abbildung 3-3). Die ländlichen Messstationen und Übergangsstationen (ländlich stadtnah und vorstädtischer Hintergrund) finden sich ebenfalls an zusammen hängenden Ästen (roter Kasten links in Abbildung 3-3). Demnach stimmen die Ergebnisse der Clusteranalyse mit der EoI-Klassifizierung weitgehend überein. Davon abweichend ordnet sich die Station Zwickau-Werdauer Straße nicht als Verkehrsstation, sondern zu den urbanen Hintergrundstationen ein (blaue Ellipse rechts in Abbildung 3-3). Hoyerswerda, als städtische Hintergrundstation klassifiziert, findet sich nah bei den ländlichen bzw. Übergangsstationen wieder (blaue Ellipse links in Abbildung 3-3).

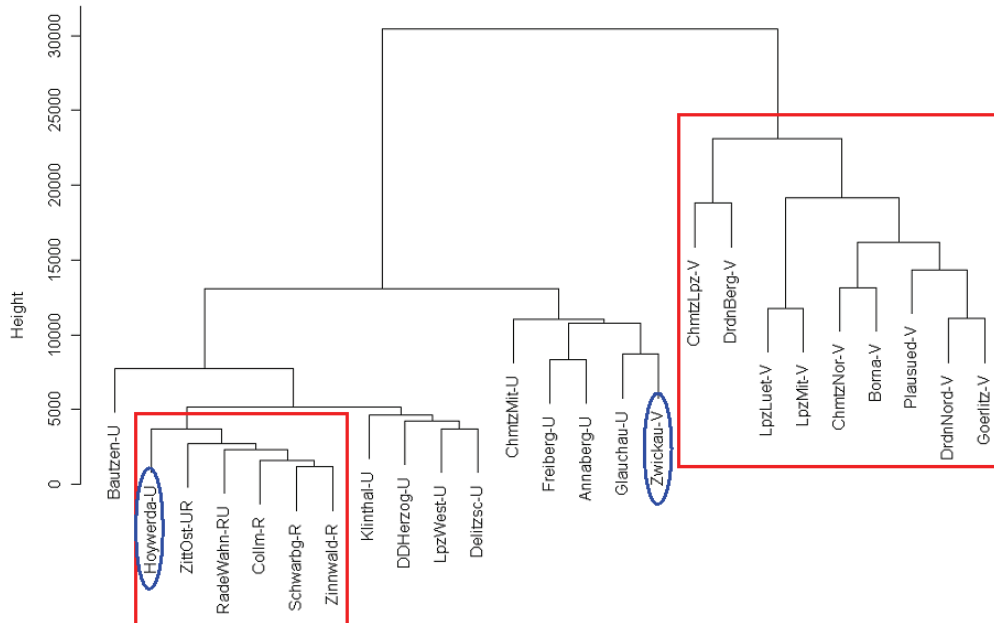


Abbildung 3-3: Dendrogramm NO

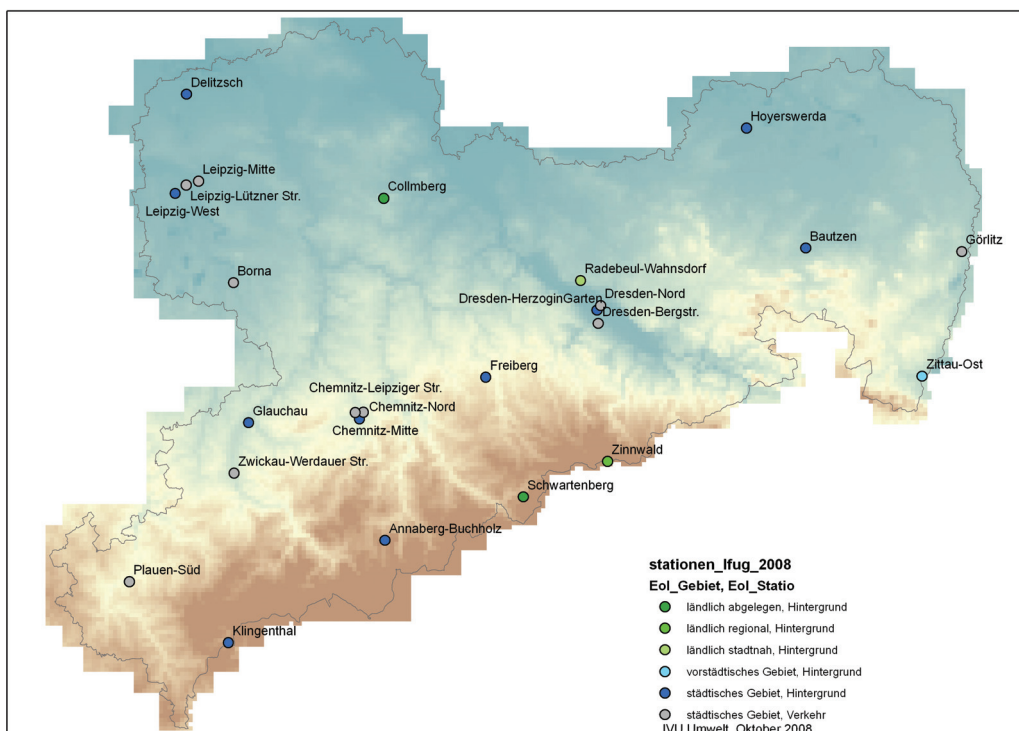
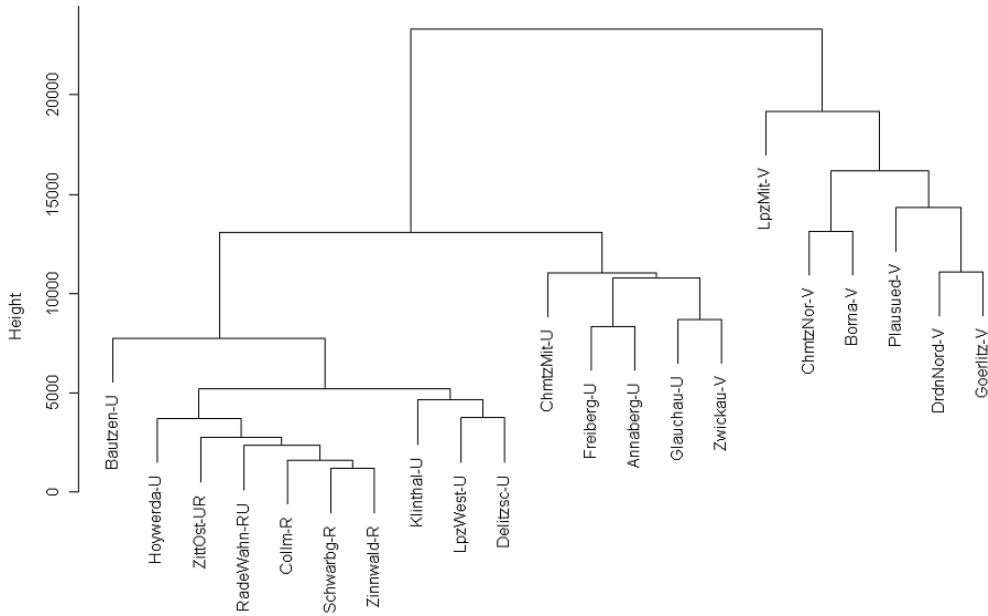


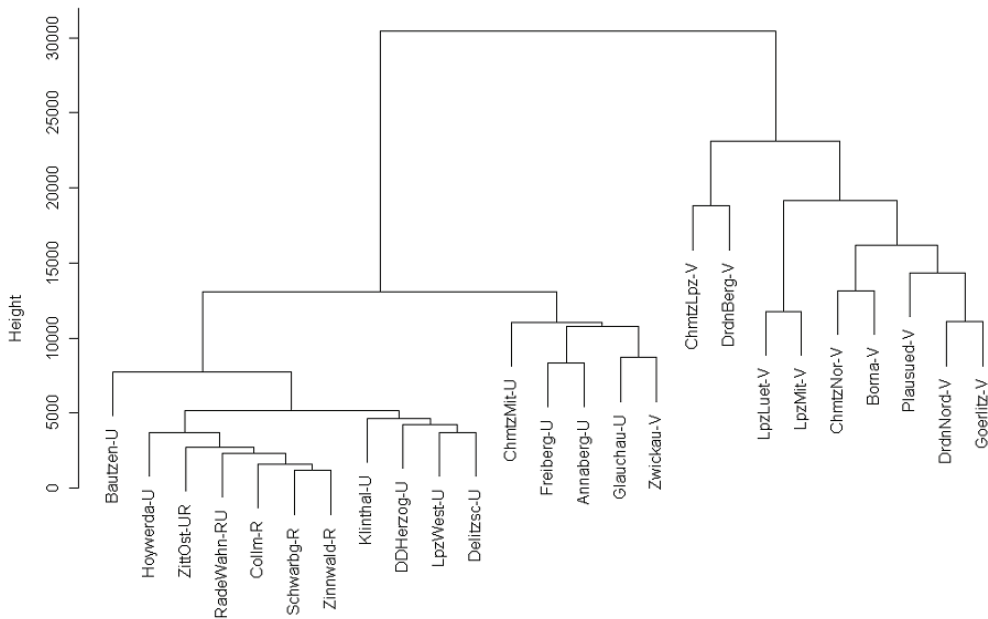
Abbildung 3-4: Stationen mit aktuellen NO-Messungen

Die Clusterung zeigt sich für die hier untersuchten Messzeitreihen bezüglich der Länge des Auswertungszeitraums stabil. Dies wird im Folgenden am Beispiel von NO gezeigt, die Dendrogramme aller betrachteten Größen finden sich für jeweils zwei unterschiedlich lange Auswertungszeiträume im Anlagenband, Kapitel A. In der Abbildung 3-5 ist das Dendrogramm für die Stationen dargestellt, die kontinuierlich vom 01.01.2001 bis zum 31.12.2007 NO gemessen haben. Darunter ist in Abbildung 3-6 das Dendrogramm der seit dem 01.01.2006 kontinuierlich NO messenden Stationen ausgegeben. Die Struktur der beiden Baumdiagramme ist identisch. Bei der Auswertung über die letzten zwei Jahre (Abbildung 3-6) werden die drei neu hinzugekommenen Verkehrsstationen

den bereits bestehenden Stationen zugeordnet. Die Station Dresden-HerzoginGarten ordnet sich korrekt bei den städtischen Hintergrundstationen ein. Die Station Zwickau wird in beiden Fällen eher im städtischen Hintergrund verortet als direkt verkehrsbezogen. Aufgrund der zeitlichen Stabilität der Clusterung werden im Folgenden die Clusteranalysen über die letzten zwei Jahre verwendet, die alle aktuell messenden Stationen berücksichtigen.



**Abbildung 3-5: Dendrogramm NO (Auswertungszeitraum 2001 – 2007)**



**Abbildung 3-6: Dendrogramm NO (Auswertungszeitraum 2006 - 2007)**

### 3.1.2.2 NO<sub>2</sub>-Zeitreihen

Das Dendrogramm der Clusteranalyse für die NO<sub>2</sub>-Messungen ist in Abbildung 3-7 dargestellt, die Lage der aktuell NO<sub>2</sub> messenden Stationen in Abbildung 3-8. Die Verkehrsmessstationen mit den höchsten NO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit Werten über 40 µg/m<sup>3</sup> nach Tabelle 3-1 bilden eine eigene Teilmenge (Chemnitz-Leipziger Str., Dresden-Bergstr., Leipzig-Mitte, Leipzig-Lützner Str., Dresden-Nord; rotes Rechteck links in Abbildung 3-7).

Die drei weiteren Verkehrsstationen (Chemnitz-Nord, Borna, Zwickau) bilden mit den geographisch im westlichen Zentrum von Sachsen gelegenen Stationen im urbanen Hintergrund (Chemnitz-Mitte, Glauchau) eine Teilmenge, die sich um die urbanen Hintergrundstationen Annaberg, Freiberg und Dresden-HerzoginGarten sowie die Verkehrsstation Plauen-Süd ergänzen lässt.

Als Verkehrsstation liegt die Station Görlitz in einer Teilmenge mit den im NO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveau dicht beieinander liegenden Stationen Bautzen, Delitzsch und Leipzig-West, wobei die Station Görlitz das niedrigste NO<sub>2</sub>-Niveau aller Verkehrsmessstationen aufweist.

Die Stationen mit dem niedrigsten NO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveau im ländlichen Bereich und auch im urbanen Hintergrund (Klingenthal und Hoyerswerda) bilden einen Teilmenge, in der die beiden Bergstationen Zinnwald und Schwarzenberg sich noch einmal abspalten.

In Abbildung 3-9 sind die aktuell NO<sub>2</sub> messenden Stationen vor dem NO<sub>x</sub>-Emissionskataster aus dem Bezugsjahr 2004/2005 dargestellt.

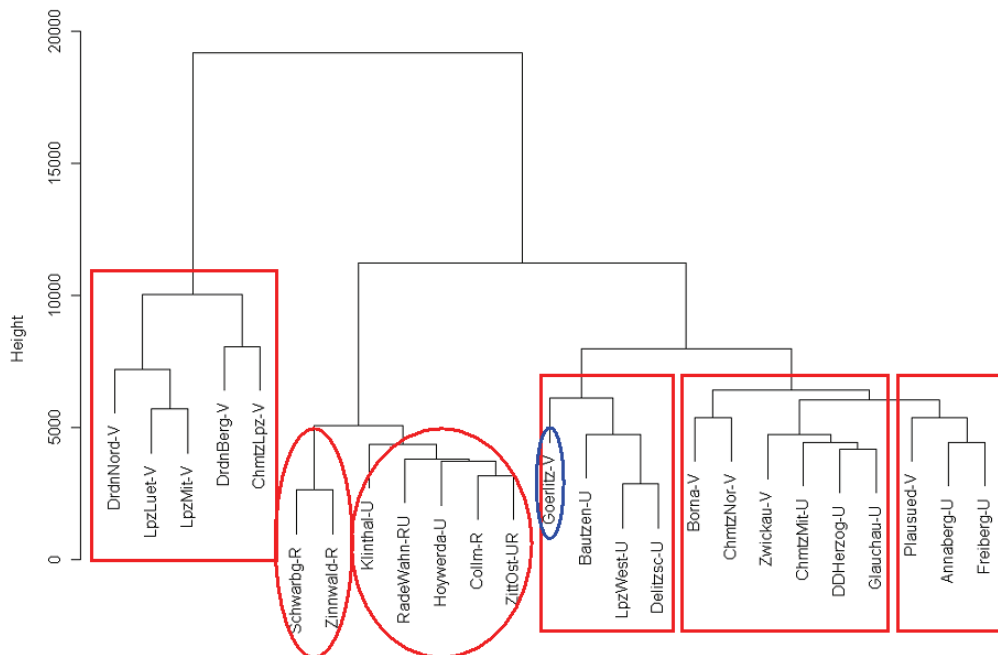


Abbildung 3-7: Dendrogramm NO<sub>2</sub>

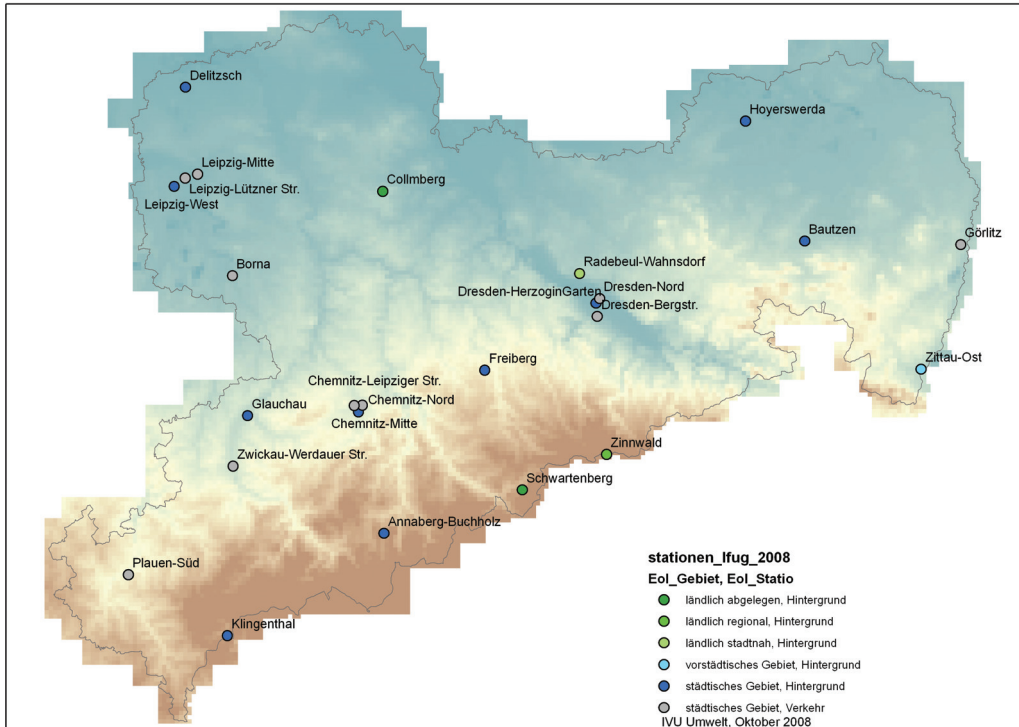


Abbildung 3-8: Stationen mit aktuellen NO<sub>2</sub>-Messungen

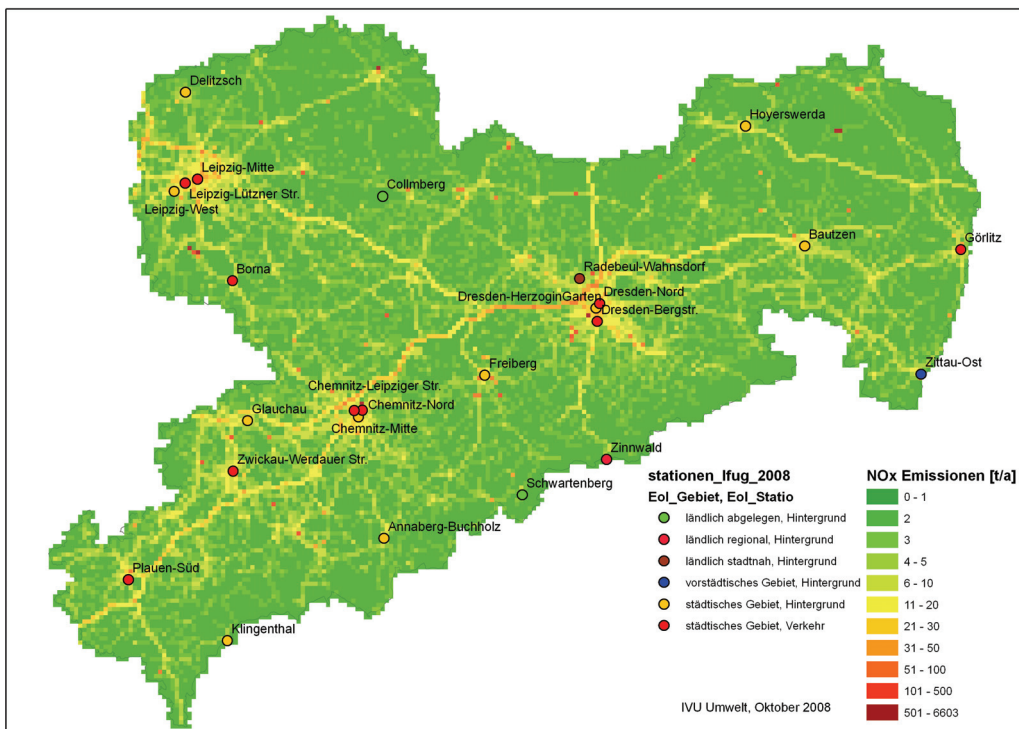


Abbildung 3-9: Stationen mit aktuellen NO<sub>2</sub>-Messungen vor dem NO<sub>x</sub>-Emissionskataster mit Bezugsjahr 2004/2005

### 3.1.2.3 NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis

Für das Dendrogramm in Abbildung 3-10 ist aus den gleichzeitig vorliegenden stündlichen NO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Messungen jeweils das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis gebildet worden. Wie schon bei der Clusteranalyse für NO (Kapitel 3.1.2.1) bildet sich für die Verkehrsstationen eine eigene Teilmenge heraus (roter Kasten in Abbildung 3-10), während sich die Verkehrsstation Zwickau bei den urbanen Hintergrundstationen wiederfindet (blaue Ellipse in Abbildung 3-10).

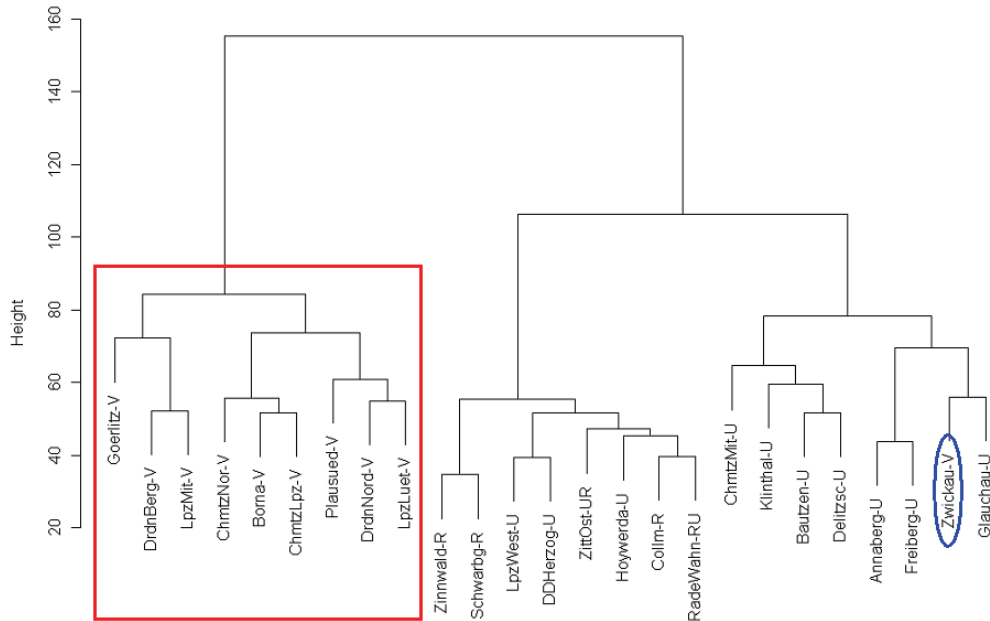


Abbildung 3-10: Dendrogramm der gemessenen NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisse ab 2006

### 3.1.2.4 Ozon

Die Clusteranalyse für die Stundenmittelwerte aller aktuell Ozon messenden Stationen ist als Dendrogramm in Abbildung 3-11 dargestellt.

Die ausgebildeten Äste des Baumdiagramms lassen sich gut durch räumliche Zuordnungen erklären (siehe Abbildung 3-12). So bildet sich

- der Nordwesten mit Leipzig, Schkeuditz und Delitzsch,
- der Nordosten von Hoyerswerda bis Niesky und Zittau Ost, wozu Collmberg und Radebeul-Wahnsdorf assoziiert werden können,
- der Südwesten von Plauen bis Freiberg und
- die südlichen höher gelegenen Stationen von Carlsfeld bis Zinnwald

aus. Einen eigenen Ast bilden die Stationen in Dresden. Die Station Klingenthal stellt einen Sonderfall dar.



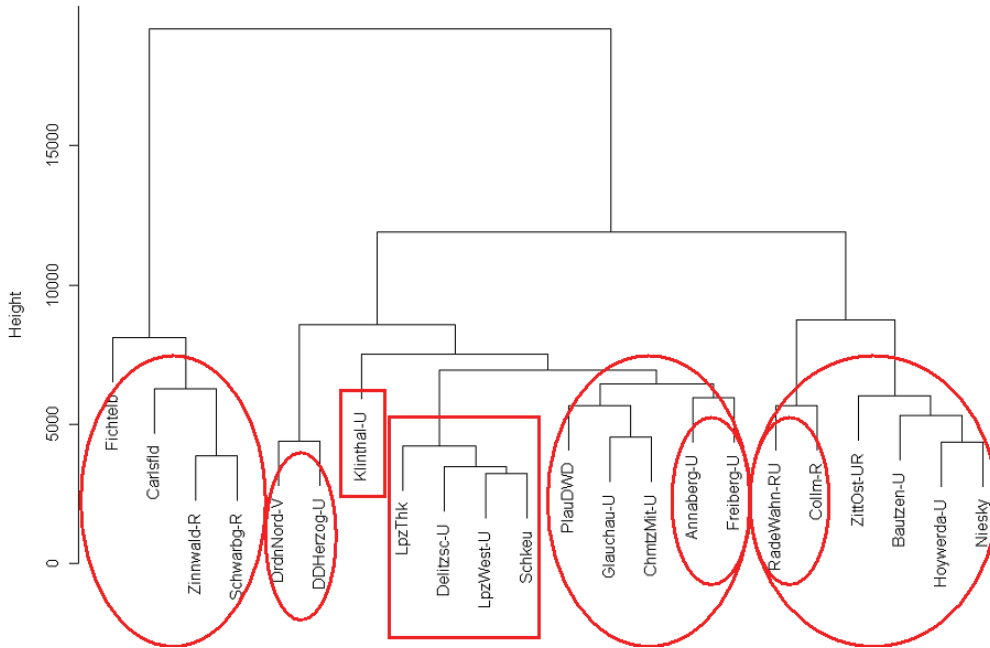


Abbildung 3-11: Dendrogramm Ozon

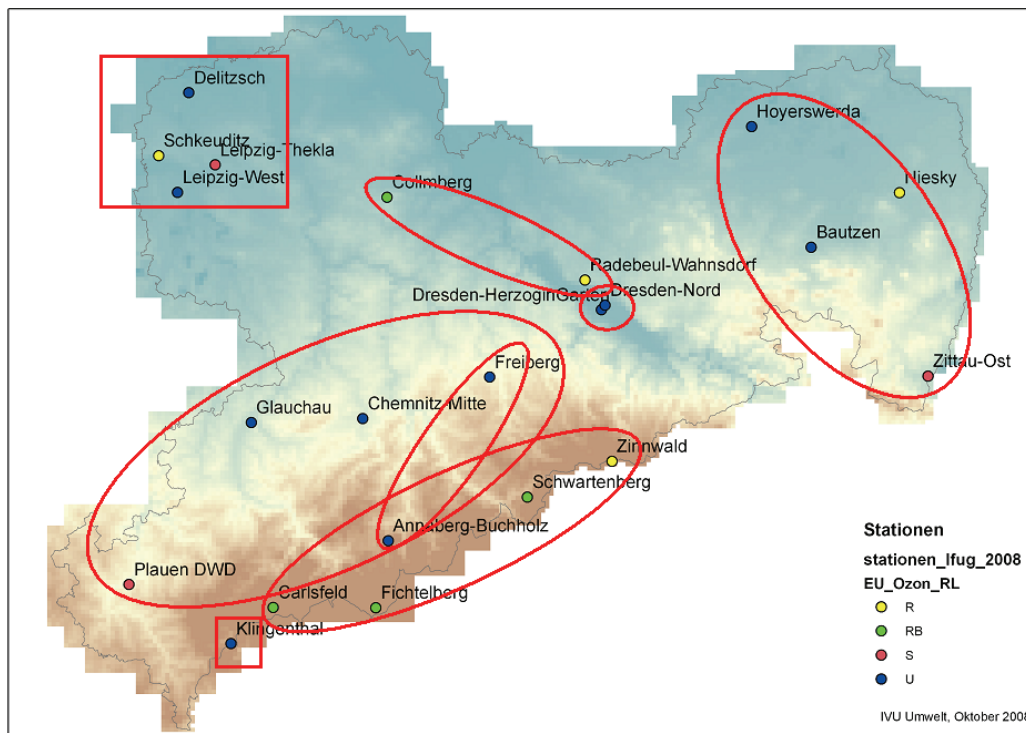


Abbildung 3-12: Stationen mit aktuellen Ozon-Messungen

### 3.1.3 Trendanalyse auf Stundenwertbasis

#### 3.1.3.1 Mann-Kendall-Test für saisonbehaftete Daten

Der nicht-parametrische Mann-Kendall-Test stellt, im Gegensatz zu parametrischen Tests, wenige Anforderungen an die Daten. Eine unverzichtbare Annahme ist aber, dass die Daten unabhängig sind und aus identischer Verteilung stammen (iid-Annahme, independent identical distributed). Dieses ist bei den stündlichen NO<sub>2</sub>-Messungen nicht der Fall. Zwar kann mit einiger Berechtigung angenommen werden, dass die Daten aus einer identischen Verteilung stammen, unabhängig sind die Daten aber bestimmt nicht. Sie sind im Gegenteil in einer recht komplexen Überlagerung von Tages-, Wochen- und Jahresgang autokorreliert.

Man kann der Verletzung der Unabhängigkeitsannahme auf zwei Arten begegnen:

- 1 Durch Einführung der effektiven Stichprobengröße, die aus der Autokorrelationsfunktion geschätzt werden kann, siehe z. B. YUE, S. & C.Y. WANG (2004).
- 2 Durch Verwendung von aggregierten Daten, siehe HIPEL, K.W. & A.I. McLEOD (2005) und R DEVELOPMENT CORE TEAM (2007).

Im Rahmen dieser Studie wird auf die zweite Art vorgegangen. Hierzu werden die stündlichen Daten auf Monatsmittelwerte aggregiert und die Funktion "Seasonal-MannKendall" aus dem Package "Kendall" angewendet, siehe R DEVELOPMENT CORE TEAM (2007). Dieses Vorgehen ist unseres Erachtens zulässig, da die zeitliche Feinstruktur der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in diesem Zusammenhang nicht interessiert, man ist vielmehr an dem längerfristigen Trend interessiert.

Das Ergebnis des Mann-Kendall-Tests ist die Signifikanz und die Richtung eines Trends. Signifikant ist ein Trend bei 5%-Irrtumswahrscheinlichkeit im zweiseitigen Test. Als aufwärts- bzw. abwärtsgerichtet wird ein Trend nach dem Vorzeichen bezeichnet. Eine weitergehende Quantifizierung des Trends ist wegen des verwendeten nichtparametrischen Verfahrens nicht möglich.

Es wurde der Trend in dem gesamten zur Verfügung stehenden Zeitraum untersucht. Eventuelle Strukturbrüche wurden zunächst nicht untersucht. Zur besseren Visualisierung wurde eine lokal gewichtete polynomiale Regression (R-function "lowess") rot in die Abbildungen der Trendanalysen eingezeichnet.

### 3.1.3.2 Ergebnisse für NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> und Ozon

An den folgenden Trenddarstellungen (Abbildung 3-13) für drei verschiedene Stationen soll exemplarisch das Verhalten der NO<sub>x</sub>-, NO<sub>2</sub>- und Ozon-Entwicklung diskutiert werden. Die Trendanalysen für den vollständigen Datensatz der Messstationen sind im Anlagenteil in Kapitel B.4 dargestellt.

Die drei Stationen sind

- Bautzen als urbane Hintergrundstation mit einem über den ganzen Zeitraum gemittelten NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert von 26.2 µg/m<sup>3</sup>,
- Chemnitz-Nord als urbane Verkehrsstation mit einem NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert von 39.2 µg/m<sup>3</sup> (Chemnitz-Mitte für Ozon) und
- Leipzig-Mitte als urbane Verkehrsstation mit einem NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert von 47.6 µg/m<sup>3</sup> (Leipzig-West für Ozon).

Bei allen Messgrößen, vor allem bei NO<sub>x</sub> und Ozon, sind deutliche Jahresgänge zu erkennen. So haben NO<sub>x</sub> und eingeschränkt NO<sub>2</sub> ein ausgeprägtes Wintermaximum, während Ozon im Sommer die lokalen Maxima aufweist.

An den Stationen Bautzen und Chemnitz-Nord ist eine signifikante Trendabnahme bei NO<sub>x</sub> und NO<sub>2</sub> zu erkennen, während Ozon signifikant steigt. Dem gegenüber steht in Leipzig-Mitte ein nicht signifikanter Trend bei NO<sub>x</sub> mit Bruch im Zeitraum 2000 bis 2002 in Kombination mit einem signifikant steigenden Trend der NO<sub>2</sub>-Belastung und ebenfalls signifikant steigendem Trend der Ozonbelastung.

Die abnehmende Tendenz bei NO<sub>x</sub> ist ein allgemein auftretendes Phänomen, wobei der an der Station Leipzig-Mitte auftretende Bruch im Zeitraum 2000 – 2002 in den hier durchgeführten Trendanalysen (Anlagenteil, Kapitel B.4) häufiger vorkommt.

Ebenso ist die NO<sub>2</sub>-Konzentration bei fast allen Stationen signifikant rückläufig. Die Station Leipzig-Mitte stellt mit einer signifikanten Zunahme einen Sonderfall dar.

Die Ozonzunahme über den gesamten Zeitraum von 1995 bis 2007 ist eher die Regel als die Ausnahme. Es ist aber festzustellen, dass ab dem Zeitraum 2000 bis 2002 die Zunahme stagniert oder sogar eine Abnahme eintritt. An ausgewählten Stationen tritt in den letzten Jahren eine gegenüber der Station Leipzig-West nochmals deutlichere Ozonabnahme auf (Niesky, Plauen-DWD, Dresden-HerzoginGarten, weniger: Leipzig-Thekla und Schkeuditz).

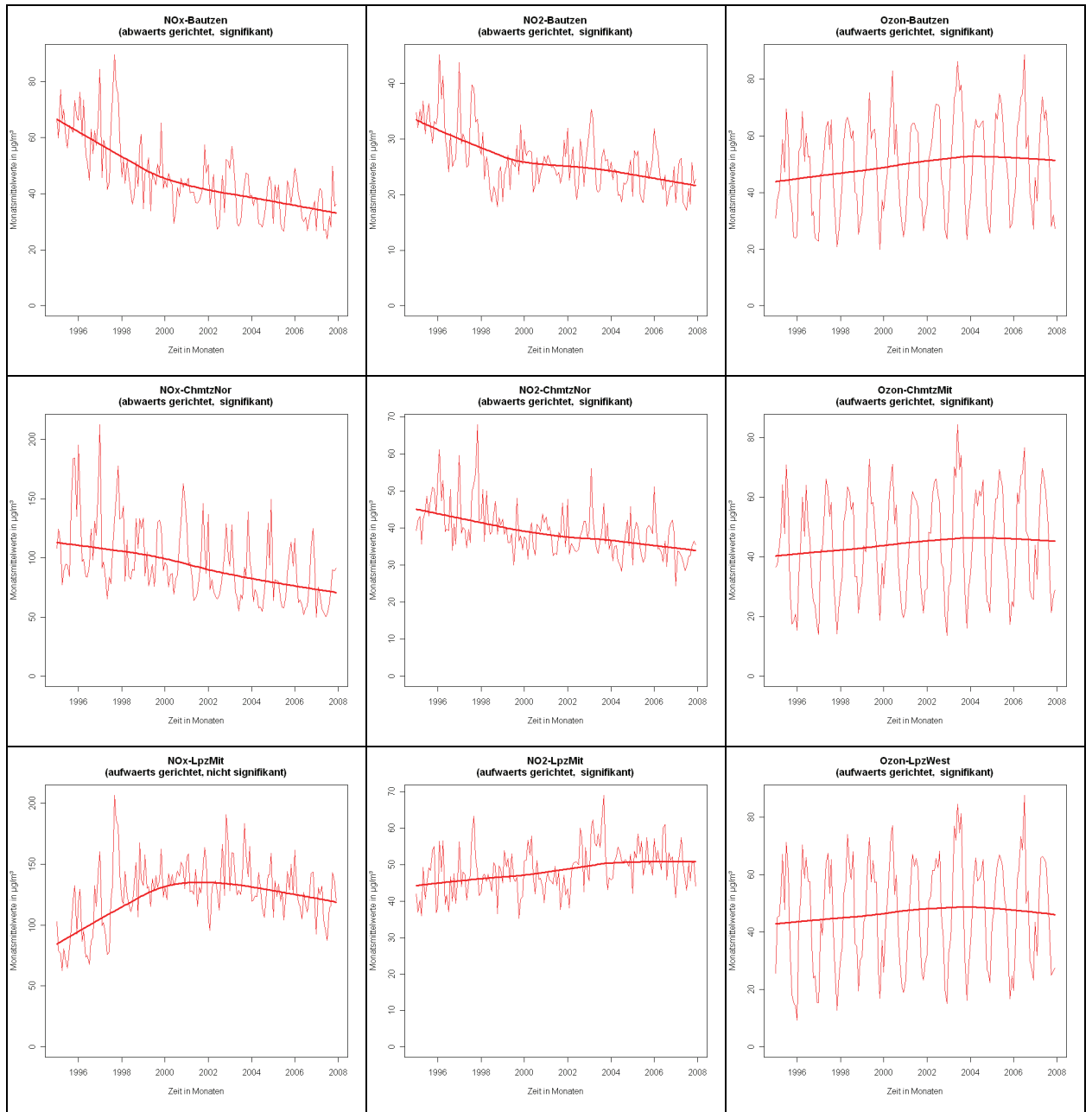


Abbildung 3-13: Trendanalyse für ausgewählte Stationen für  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$  und Ozon

### 3.1.3.3 Ergebnisse für das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis

In Abbildung 3-14 sind die Trendanalysen für das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis für die Verkehrsstationen dargestellt. Die vollständigen Trendanalysen für alle Stationen finden sich im Anlagenband, Kapitel B.4.

In den einzelnen Graphen ist neben den Verhältnisdaten aus den Messungen (rot) zum Vergleich das sich aus dem Romberg-Ansatz (Kapitel 3.2.4, ROMBERG, E., R. BÖSINGER, A. LOHMEYER, R. RUHNKE, E. RÖTH. (1996)) ergebene Verhältnis auf Basis der gemessenen NO<sub>x</sub>-Werte eingezeichnet (grün).

Bei sechs der zehn Verkehrsstationen ist ein signifikanter Aufwärtstrend des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses festzustellen. Für die anderen Stationen kann kein signifikanter Trend abgeleitet werden.

Bei den drei Stationen Görlitz, Borna und Plauen-Süd führt der Romberg-Ansatz zu einem deutlich höheren NO<sub>2</sub>-Anteil, als es die Messungen ergeben. Bei diesen drei Stationen liegt das NO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveau aber deutlich unter dem ab 2010 gültigen Grenzwert.

Bei den anderen Stationen, bis auf Zwickau, liegen die Abschätzungen des NO<sub>2</sub>-Anteils nach Romberg bei den gemessenen Verhältnissen. Das Konzentrationsniveau dieser Stationen liegt knapp unter dem NO<sub>2</sub>-Grenzwert (Chemnitz-Nord mit im Mittel 39 µg/m<sup>3</sup>) bzw. deutlich über diesem Wert.

Eine Ausnahme bildet bei dieser Auswertung auch wieder die Station Zwickau, die bereits in der Clusteranalyse eher als urbane Hintergrundstation eingeordnet wurde denn als Verkehrsstation. Hier liegt das gemessene NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis mit steigender Tendenz über dem Romberg-Ansatz, obwohl das NO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveau eher unter dem Grenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> liegt, mit stark fallender Tendenz.

Das Verhalten des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnisses an den Stationen Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße ist auf Grund des im Verhältnis kurzen Messzeitraums noch nicht interpretierbar.

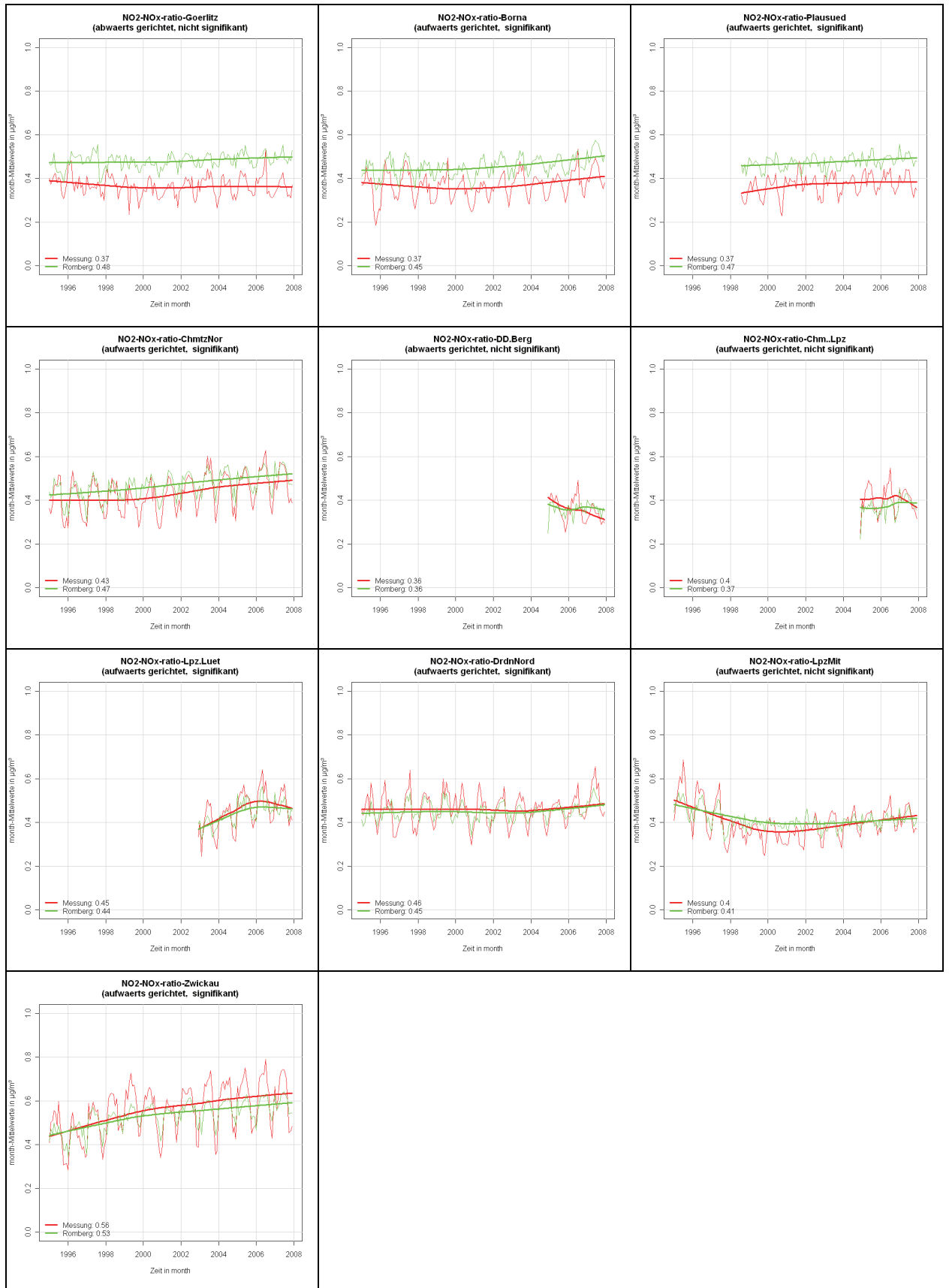


Abbildung 3-14: Trendanalyse für das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis für Verkehrsstationen

### 3.2 Vergleich der sächsischen NO<sub>2</sub>-Messungen mit bundesdeutschen Messdaten

Um die Entwicklung der NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen mit der Situation im gesamten Bundesgebiet vergleichen zu können, wurden Zeitreihen auf der Basis von Jahresmittelwerten, klassifiziert nach den verschiedenen Eol-Stationstypen, gebildet und analysiert. Dazu wurden vom Umweltbundesamt in Dessau (UBA) alle gemeldeten bundesdeutschen Messdaten für den Untersuchungszeitraum abgefragt und für die weitere Auswertung aufbereitet.

Die Aussagen von Trendanalysen sind immer abhängig vom betrachteten Zeitraum und der Anzahl der für diesen Zeitraum zur Verfügung stehenden Daten. Um das Gewicht einzelner Werte möglichst klein zu halten, ist es sinnvoll, einen möglichst langen Zeitraum zu berücksichtigen. Für die hier durchgeführten Untersuchungen lagen Daten für die Jahre 1995 – 2007 vor.

#### 3.2.1 Jahresdaten Sachsen

Abbildung 3-15 (oben) zeigt die Entwicklung der Jahresmittelwerte von NO<sub>2</sub> für die Jahre 1995 bis 2007 getrennt nach Eol-Klassifizierung Ländlich, Städtisch und Verkehr. Dabei ist zum einen das Mittel für alle vorliegenden Messdaten einer Stationsklassifizierung gebildet worden und zum anderen nur das Mittel aller kontinuierlich über den gesamten untersuchten Zeitraum 1995 bis 2007 messenden Stationen. In Abbildung 3-15 (unten) ist die gleiche Darstellung für die Jahresmittelwerte von NO<sub>x</sub> wiedergegeben. In beiden Abbildungen ist jeweils für die Mittelwerte der kontinuierlich messenden Stationen eine Trendgerade als Ergebnis einer linearen Regression eingezeichnet.

Der Vergleich der über alle Messwerte gemittelten Werte mit den kontinuierlich messenden Stationen zeigt im städtischen Bereich keinen nennenswerten Unterschied. Im ländlichen Bereich liegen die Kurven für NO<sub>2</sub> bzw. NO<sub>x</sub> ebenfalls dicht beieinander, leichte Differenzen ergeben sich, nachdem die Stationen Schwartenberg und Collmberg im Jahr 1998 mit Messungen begonnen haben. Bei den verkehrsbezogenen Messstationen zeigt sich vor allem ein großer Unterschied ab 2005, da ab diesem Zeitpunkt drei der vier am höchsten belasteten Stationen erst den Messbetrieb aufgenommen haben.

Betrachtet man nur die kontinuierlich messenden Stationen, so fällt das Jahr 2003 bei den NO<sub>2</sub>-Messungen im Verkehr und im städtischen Hintergrund sowie bei NO<sub>x</sub> im Verkehr als Extremjahr auf.

Die linearen Trendgeraden für die kontinuierlich messenden Stationen zeigen für den Zeitraum 1995 - 2007 in allen Fällen nach unten, wobei gerade im ländlichen und städtischen Hintergrund die fallende Tendenz auch sehr gut mit den Verlaufskurven der Jahresmittelwerte harmoniert. Bei den NO<sub>2</sub>-Messungen im Verkehr ist nur zwischen 1995 und 2002 ein deutlicher Abnahmetrend zu erkennen, ab 2003 ist das Verhalten der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte sehr variabel. Nimmt man die Trendgeraden zum Vergleich, fällt die Abnahme der Jahresmittelwerte von NO<sub>x</sub> im Verkehr deutlich stärker aus als bei NO<sub>2</sub>.

Zur Untersuchung der Stabilität der Tendaussage für NO<sub>2</sub> wird das erste und das letzte Jahr (1995: Beginn der Messungen; 2007: günstige meteorologische Ausbreitungsbedingungen) aus der Zeitreihe entfernt und die Trendanalyse erneut durchgeführt. Auch für den Zeitraum 1996 – 2006 zeigen die Trendgeraden der kontinuierlich messenden Stationen eine abnehmende Tendenz, die jedoch für die Verkehrsstationen nur schwach und für die ländlichen Stationen kaum noch erkennbar ist (Abbildung 3-16). Alle Stationstypen zeigen zwischen 2004 und 2006 leicht steigende Werte. Ob sich dies zu einem Trend stabilisiert oder die sich über den betrachteten

Gesamtzeitraum ergebende abnehmende Tendenz erhalten bleibt, können erst zukünftige Messwerte zeigen.

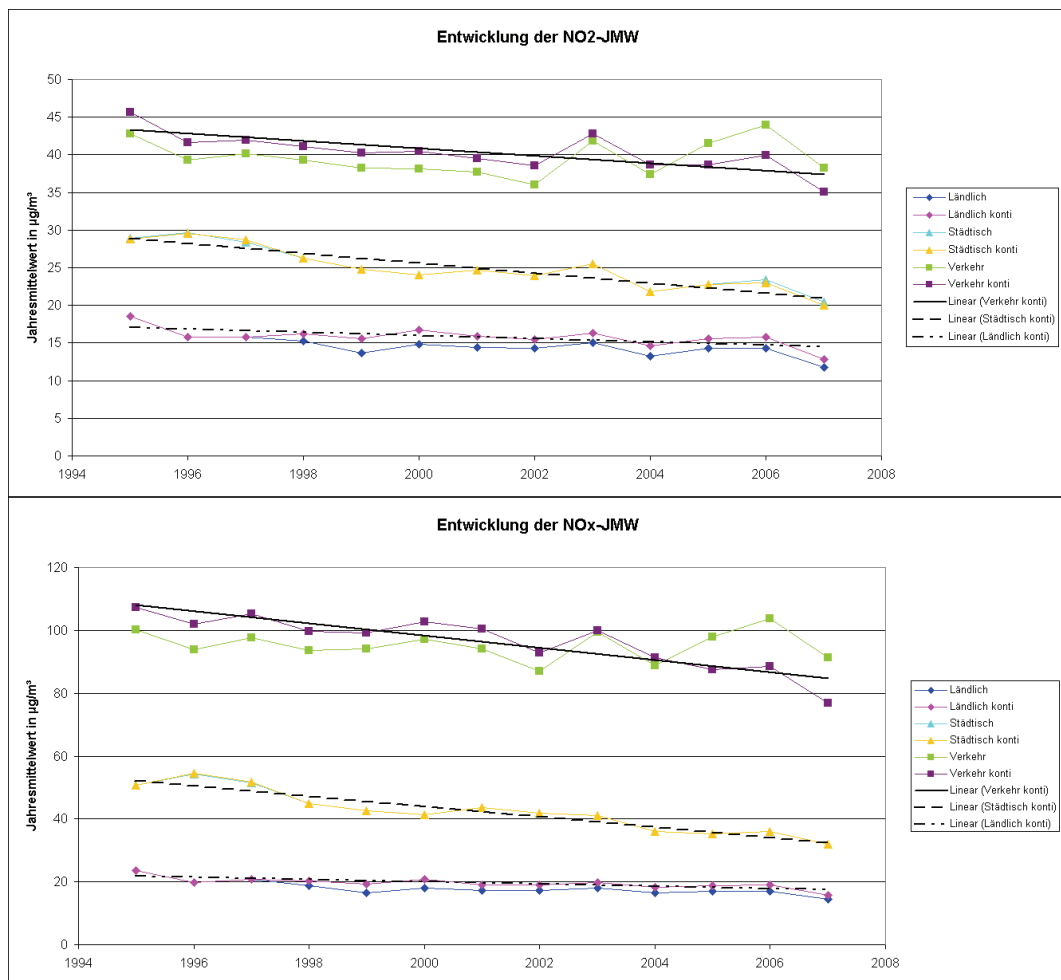


Abbildung 3-15: Entwicklung des NO<sub>2</sub>- (oben) und NO<sub>x</sub>- (unten) Jahresmittelwerts für verschiedene Stationstypen in Sachsen über den Zeitraum 1995 – 2007

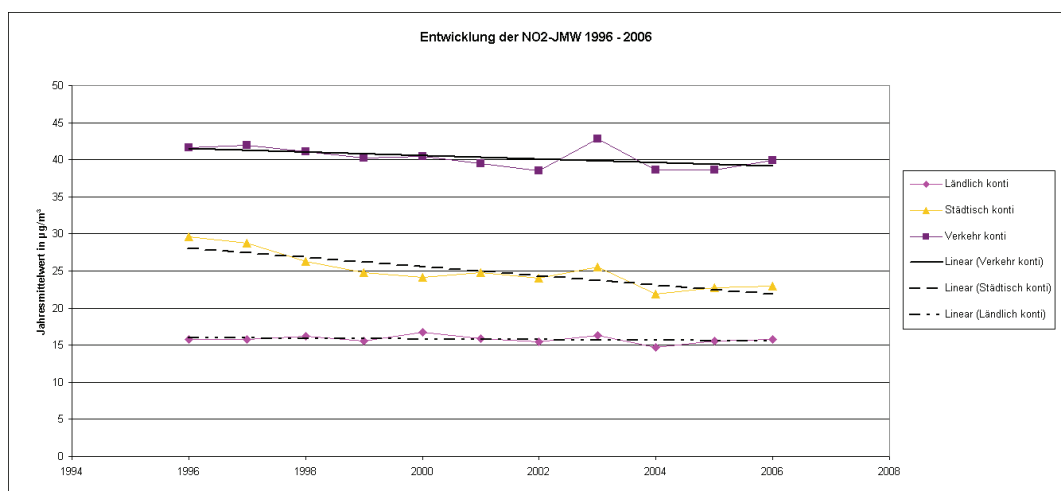
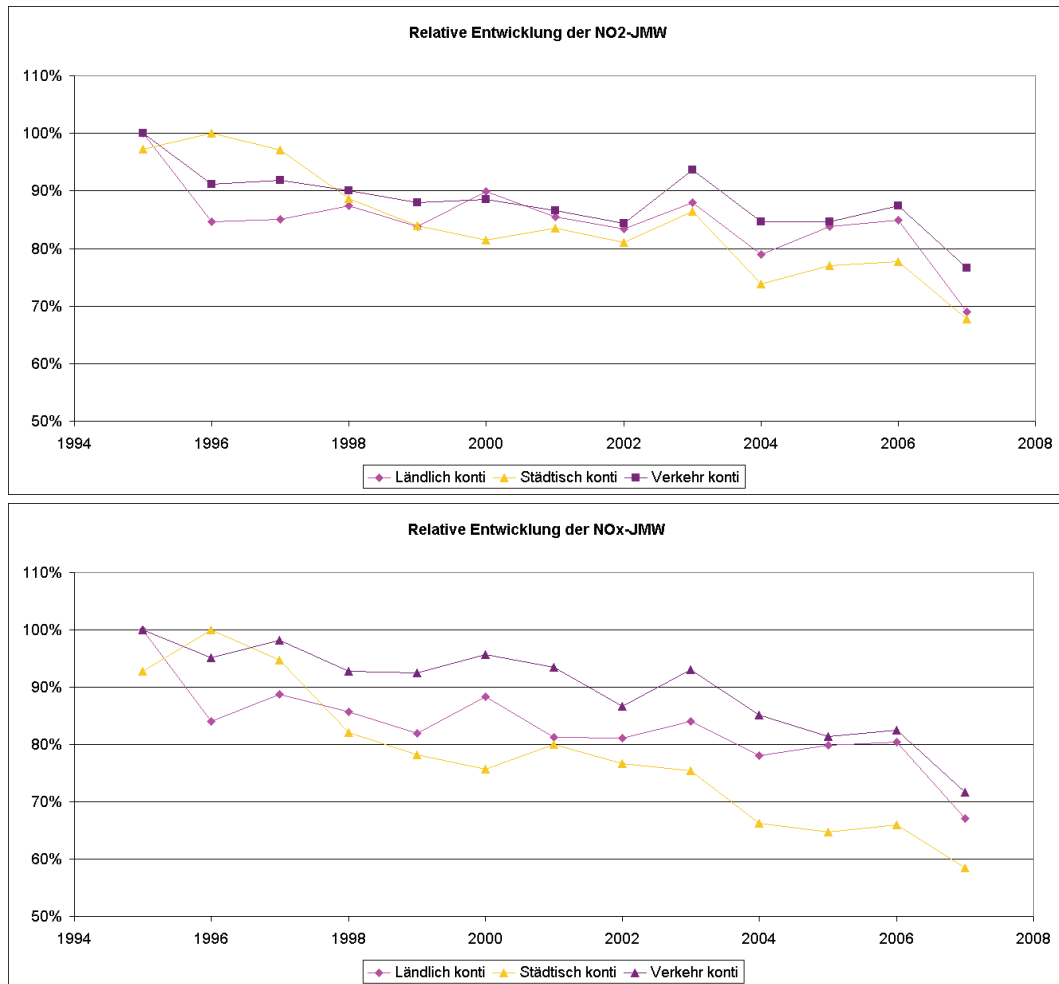


Abbildung 3-16: Entwicklung des NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerts für verschiedene Stationstypen in Sachsen über den Zeitraum 1996 – 2006



Abbildung 3-17 zeigt die Jahresmittelwerte für NO<sub>2</sub> (oben) und NO<sub>x</sub> (unten), bezogen auf das jeweilige Maximum ihrer Zeitreihe. Demnach ist relativ gesehen der stärkste Rückgang bezüglich der NO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Konzentrationen an den städtischen Hintergrundstationen zu verzeichnen, und zwar stärker für NO<sub>x</sub> als für NO<sub>2</sub>. Es folgen die ländlichen Hintergrundstationen, bei denen der Rückgang für NO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> ähnlich stark ist. Den geringsten Rückgang zeigen die Verkehrsmessstationen, wobei auch hier die Werte für NO<sub>x</sub> etwas stärker sinken als die für NO<sub>2</sub>.



**Abbildung 3-17: Relative Entwicklung des NO<sub>2</sub>- (oben) und NO<sub>x</sub>- (unten) Jahresmittelwerts für verschiedene Stationstypen in Sachsen über den Zeitraum 1995 – 2007**

### 3.2.2 Jahresdaten Deutschland

Vom Umweltbundesamt wurden die Messdaten der NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Belastung für den Untersuchungszeitraum 1995 bis 2007 für Deutschland zur Verfügung gestellt (im Folgenden als UBA-Datensatz bezeichnet). Die daraus abgeleiteten Jahresmittelwerte für die kontinuierlich über den gesamten Zeitraum 1995 bis 2007 messenden Stationen sind in Abbildung 3-18 dargestellt. Wie für die sächsischen Daten fällt das Jahr 2003 auch bei den Daten aus dem UBA-Datensatz bei NO<sub>2</sub> vor allem im Verkehr und im städtischen Hintergrund sowie bei NO<sub>x</sub> im Verkehr als Extremjahr auf. Die linearen Trendgeraden über gesamten betrachteten Zeitraum 1995 – 2007 zeigen wie schon für die sächsischen Daten eine generell sinkende Tendenz. Insbesondere die Jahresmittelwerte der ländlichen Stationen, aber auch die des städtischen Hintergrunds liegen dicht an der Trendgeraden. Die Werte der Verkehrsstationen sind etwas variabler. Für NO<sub>2</sub> bleibt wie bei den

sächsischen Daten abzuwarten, ob der leichte Anstieg der Messwerte zwischen 2004 und 2006 durch zukünftige Messwerte als Trend bestätigt wird oder eine Episode bleibt.

In Abbildung 3-19 sind die gemittelten Werte auf das jeweilige Maximum ihrer Zeitreihe bezogen worden, so dass sich die relative Abweichung zum Maximum ablesen lässt. Zusätzlich ist in dieser Abbildung die auf der Basis des HBEfa Version 2.1 (INFRAS (2004)) berechnete Emissionsabnahme für eine durchschnittliche deutsche Verkehrssituation eingetragen worden. Die fallende Tendenz der Jahresmittelwerte geht – bis auf das Extremjahr 2003 - mit der Abnahme der  $\text{NO}_x$ -Emissionen einher. Allerdings ist zu beobachten, dass der relative Rückgang der Messwerte in den letzten Jahren des Untersuchungszeitraums geringer ausfällt.

Der stärkste relative Rückgang bezüglich der  $\text{NO}_2$ - und  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen ist wie für Sachsen an den städtischen Hintergrundstationen zu verzeichnen, und zwar stärker für  $\text{NO}_x$  als für  $\text{NO}_2$ . Die ländlichen Hintergrundstationen folgen für  $\text{NO}_2$ , für  $\text{NO}_x$  ist der relative Rückgang allerdings deutlich geringer als der an den Verkehrsstationen. Die Verkehrsstationen zeigen hingegen einen deutlich geringeren Rückgang als die ländlichen Stationen für  $\text{NO}_2$ .

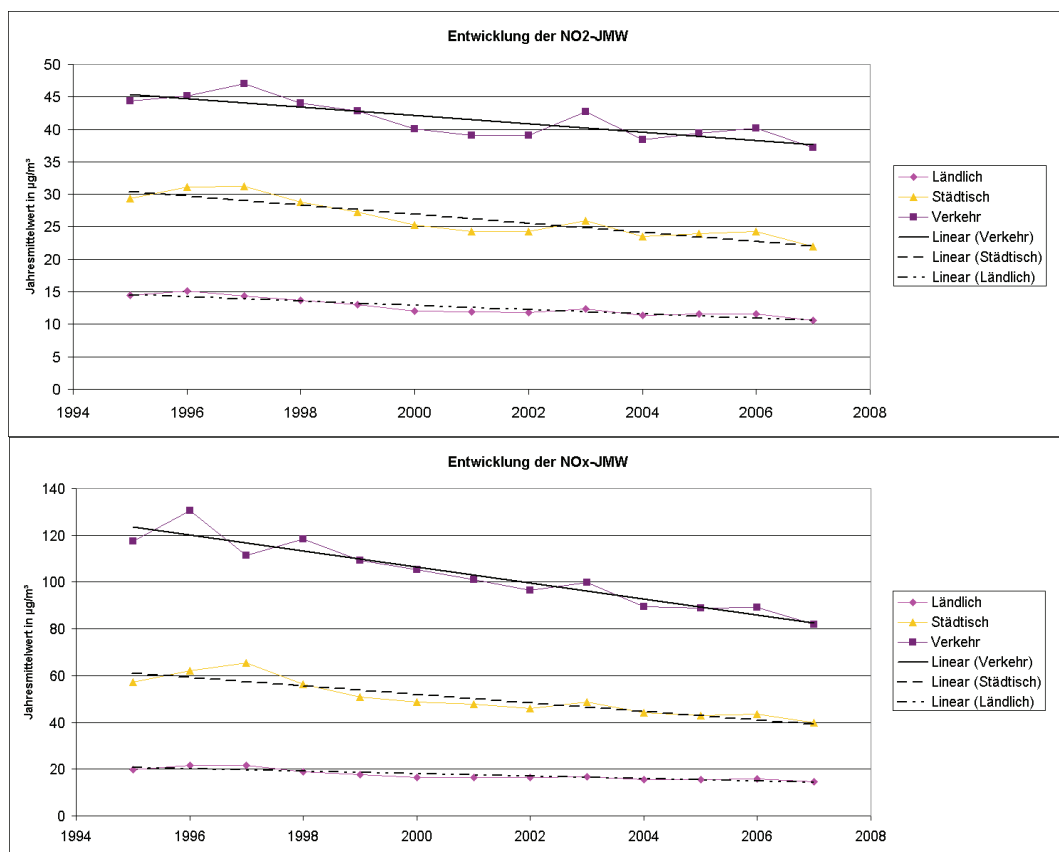
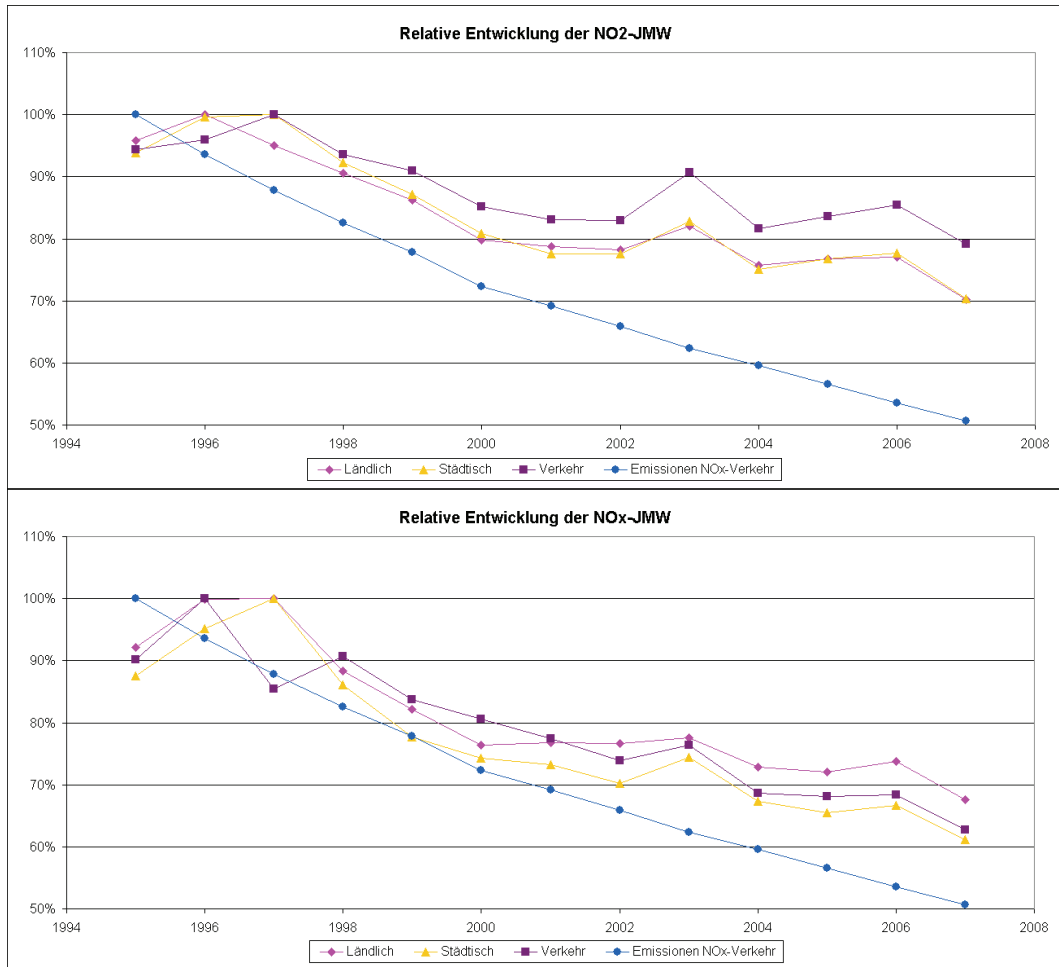


Abbildung 3-18: Entwicklung der  $\text{NO}_2$ - (oben) und  $\text{NO}_x$ - (unten) Mittelwerte im UBA-Datensatz



**Abbildung 3-19: Relative Entwicklung der NO<sub>2</sub>- (oben) und NO<sub>x</sub>- (unten) Mittelwerte im UBA-Datensatz und der Kfz-Emissionen von NO<sub>x</sub>**

### 3.2.3 Vergleich der Jahresdaten für Sachsen und Deutschland

Ein direkter Vergleich der Entwicklung der sächsischen Jahresmittelwerte der kontinuierlich messenden Stationen mit den bundesdeutschen Daten für den Untersuchungszeitraum 1995 – 2007 zeigt eine gute Übereinstimmung. Beide Datensätzen weisen eine über den Gesamtzeitraum generell fallende Tendenz auf, die in Abhängigkeit von der Stationsklassifizierung mehr oder minder stark ausgeprägt ist. Das Jahr 2003 sticht insbesondere bei den NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerten der Verkehrsstationen und der städtischen Stationen sowie bei den NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwerten der Verkehrsstationen als Extremjahr heraus. Bei den NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerten wird, wie schon in Kapitel 3.2.1 und 3.2.2 diskutiert, ab 2004 der abnehmende Trend aus den Jahren vor 2003 abgelöst durch ein variables Verhalten, das erst bei Vorliegen zukünftiger Messwerte sinnvoll bewertet werden kann (Abbildung 3-20).

Für die Verkehrsstationen zeigen die Zeitreihen ab dem Jahr 2000 für Sachsen und die bundesdeutschen Daten sehr ähnliche Werte, davor wurden im bundesdeutschen Durchschnitt höhere Werte gemessen als in Sachsen. Im städtischen Bereich liegen die bundesdeutschen Jahresmittel geringfügig höher als die sächsischen, und zwar etwas stärker für NO<sub>x</sub> als für NO<sub>2</sub>. An den ländlichen Stationen sind die NO<sub>x</sub>-Werte des UBA-Datensatzes und Sachsens sehr ähnlich, während überraschenderweise die NO<sub>2</sub>-Jahresmittel für Gesamtdeutschland niedriger sind als für

Sachsen. Dies spricht dafür, dass im bundesdeutschen Durchschnitt an ländlichen Stationen NO einen etwas größeren Anteil an NO<sub>x</sub> hat als in Sachsen.

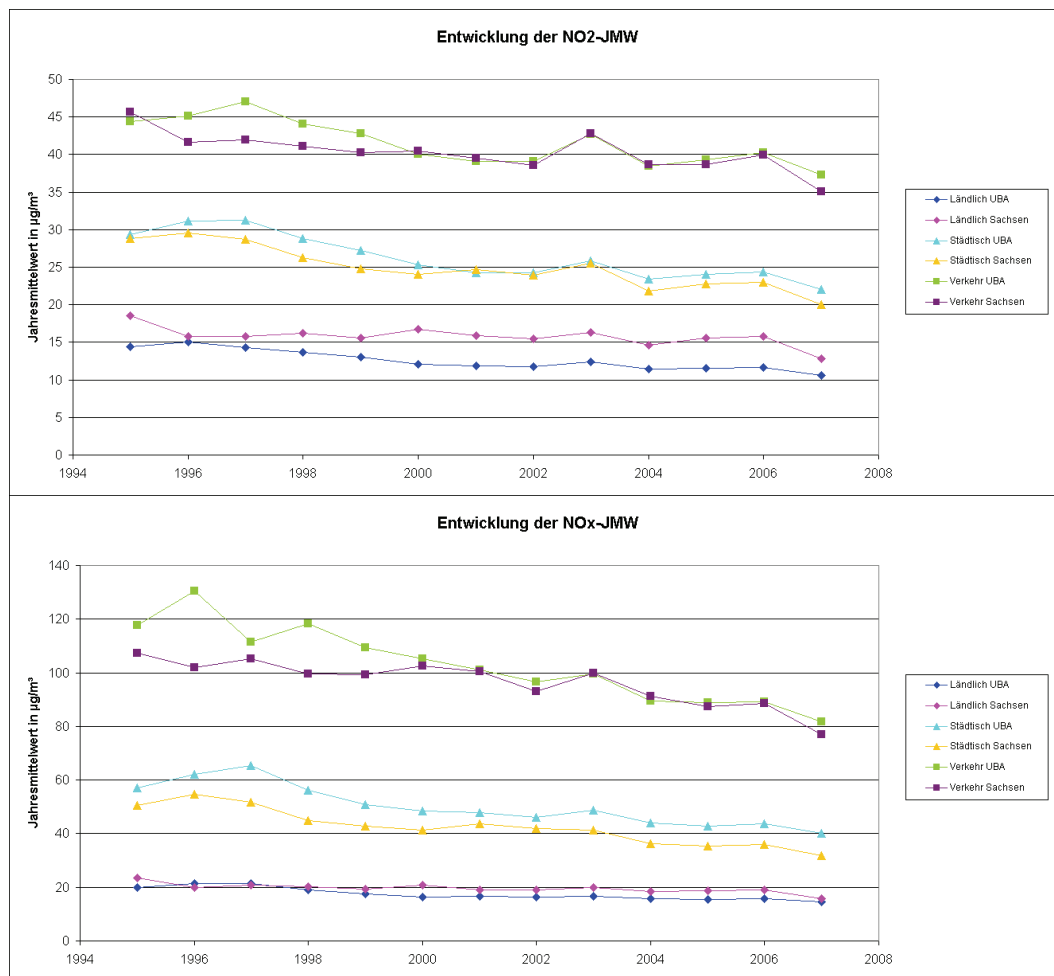


Abbildung 3-20: Vergleich der Entwicklung der NO<sub>2</sub>- (oben) und NO<sub>x</sub>- (unten) Mittelwerte in Sachsen und im UBA-Datensatz

### 3.2.4 Vergleich zum Romberg-Ansatz

Ein praktikabler weitverbreiteter Ansatz zur Verbindung der Emissionen von NO<sub>x</sub> mit der Immission NO<sub>2</sub> besteht in der Anwendung des Romberg-Ansatzes (ROMBERG, E., R. BÖSINGER, A. LOHMEYER, R. RUHNKE, E. RÖTH. (1996)). Dabei wird der Jahresmittelwert von NO<sub>2</sub> über eine aus einer Regressionsanalyse auf Basis von historischen Messdaten zu NO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> abgeleiteten analytischen Funktion berechnet. Ein Beispiel für eine solche Ableitung findet sich in Abbildung 3-21. Dieser Ansatz geht davon aus, dass das Verhältnis von NO<sub>2</sub> zu NO<sub>x</sub> in erster Näherung eine Funktion der NO<sub>x</sub>-Konzentration ist. Weitere Einflussgrößen, wie der Emissionsanteil von NO<sub>2</sub>, die Ozonkonzentration oder auch der Stationstyp<sup>1</sup> gehen nicht in die Regression ein. Damit wird auch keine zeitliche Entwicklung berücksichtigt.

Bei Betrachtung der Verteilung der NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Wertepaare in Abbildung 3-21 wird ein weiteres Manko des Romberg-Ansatzes deutlich. Im Vergleich zum mittleren und unteren NO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveau gehen nur wenige Werte im oberen Niveau in die Regression ein.

<sup>1</sup> LIMBA-Auswertung ist stationsbezogen

Auswertungen von  $\text{NO}_2$ -Grenzwertüberschreitungen in den Jahren 2000 bis 2006 zeigen, dass der Romberg-Ansatz in aktueller Zeit das Verhältnis von  $\text{NO}_2$  zu  $\text{NO}_x$  unterschätzt (siehe Abbildung 3-22, IVU UMWELT (2005), LAMBRECHT, U. (2006)). Mit den folgenden Untersuchungen soll die Anwendbarkeit des Romberg-Ansatzes in Sachsen und im Vergleich dazu bei den UBA-Daten näher analysiert werden.

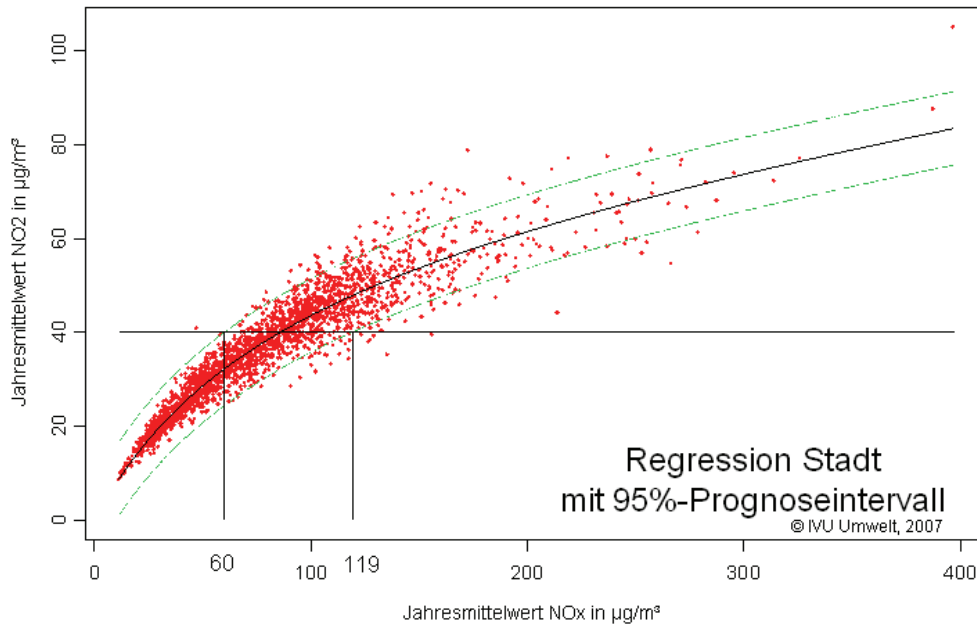


Abbildung 3-21: Romberg-Ansatz am Beispiel der LIMBA-Auswertung (IVU UMWELT (2002))

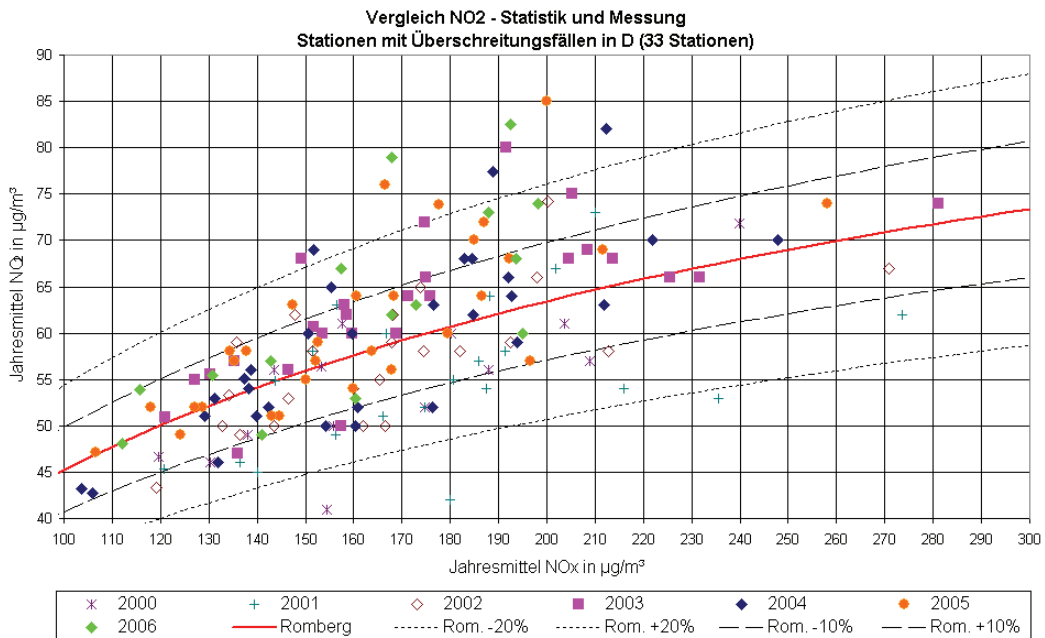
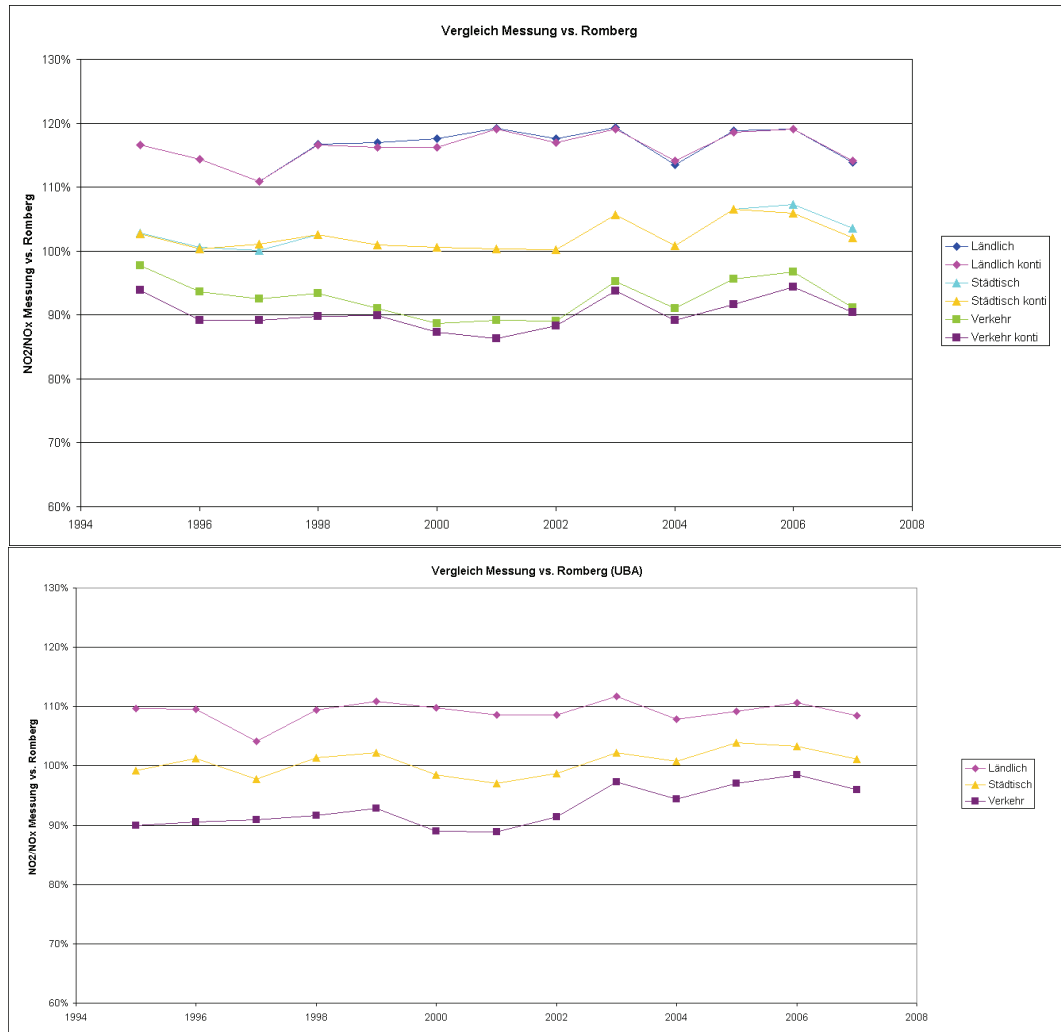


Abbildung 3-22: Vergleich Romberg-Statistik mit Messungen im  $\text{NO}_2$ -Jahresmittelwertbereich über  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$

In der Abbildung 3-23 ist dargestellt, wie sich das gemessene  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnis zum Romberg-Ansatz über den Untersuchungszeitraum verhält. Die Unterscheidung in die Stationstypisierung zeigt dabei deutlich die Abhängigkeit des  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses. Ländliche Stationen werden

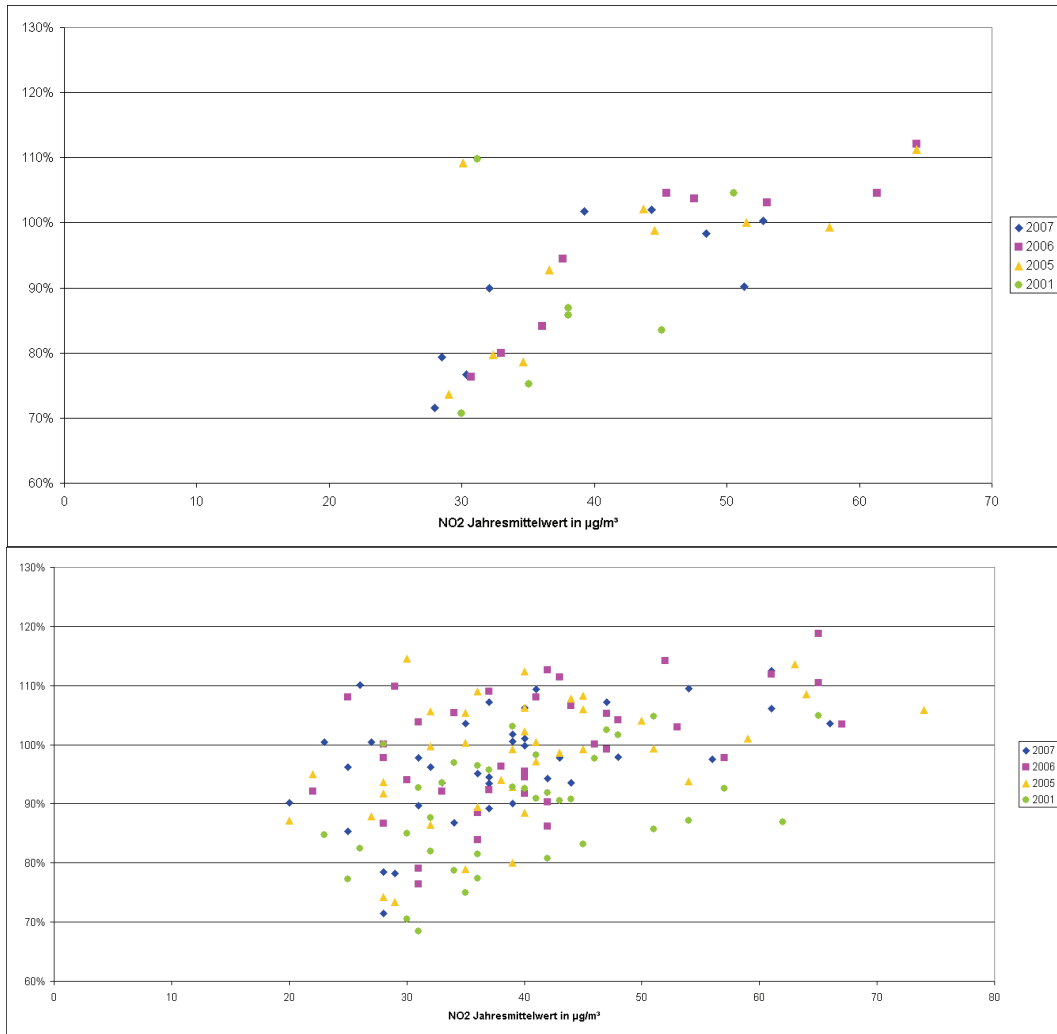
durch Romberg unterschätzt, während städtische Hintergrundstationen gut getroffen werden. Verkehrsstationen werden überraschenderweise eher überschätzt. Dies gilt sowohl für die sächsischen Daten als auch für den UBA-Datensatz.

In den letzten Jahren ist das Verhältnis  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  zum Romberg-Ansatz für alle drei Stationstypen leicht angestiegen. So nähert sich der Romberg-Ansatz bei den Verkehrsstationen im Mittel den Messungen an. Dabei erreicht die Übereinstimmung im Jahr 2006 im UBA-Datensatz fast 100 %.



**Abbildung 3-23: Vergleich des gemessenen  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$ -Verhältnisses zum Romberg-Ansatz gemittelt für verschiedene Stationstypen in Sachsen (oben) und im UBA-Datensatz (unten)**

In Abbildung 3-24 ist für vier ausgewählte Jahre dargestellt, wie sich das Verhältnis Messung  $\text{NO}_2/\text{NO}_x$  zum Romberg-Ansatz in Abhängigkeit des  $\text{NO}_2$ -Jahresmittelwerts darstellt. Dabei ist sowohl bei den sächsischen Daten als auch im UBA-Datensatz zu erkennen, dass bei einem niedrigen  $\text{NO}_2$ -Niveau der Romberg-Ansatz eher überschätzt (Verhältnis  $<100\%$ ), während er bei höheren Konzentrationen eher unterschätzt.



**Abbildung 3-24: Verhältnis des NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Anteils aus Messungen zum Rombergansatz gegenüber gemessenen NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerten in Sachsen (oben) und im UBA-Datensatz (unten)**

### 3.3 Quantifizierung des meteorologischen Einflusses, Berücksichtigung der Ozonchemie

#### 3.3.1 Entwicklung der Ozonwerte und meteorologischer Komponenten im Jahresmittel

In Abbildung 3-25 ist die Entwicklung der über die verschiedenen Stationstypen gemittelten Ozonkonzentration für den Zeitraum 1995 bis 2007 in Sachsen und 1990 bis 2007 für Deutschland dargestellt. Wie zu erwarten, liegt das Ozonniveau an den ländlichen Hintergrundstationen am höchsten, während das Niveau im direkten Verkehrsumfeld am niedrigsten ist.

Wie schon bei den NO<sub>x</sub>-Konzentrationen stellt das Jahr 2003 auch bei den Ozonkonzentrationen einen signifikanten Ausreißer nach oben dar. Im bundesdeutschen Durchschnitt steigen die Jahresmittelwerte im betrachteten Zeitraum für alle drei abgebildeten Stationstypen an. In Sachsen ist in diesem Zeitraum unter der Berücksichtigung der kontinuierlich messenden Stationen sowohl im ländlichen Hintergrund als auch bei den verkehrsbezogenen Stationen ebenfalls ein Trend zu steigenden Ozon-Werten zu erkennen. Im städtischen Hintergrund in Sachsen ist dieser Trend anders als bei den bundesdeutschen Daten nur schwach ausgeprägt.

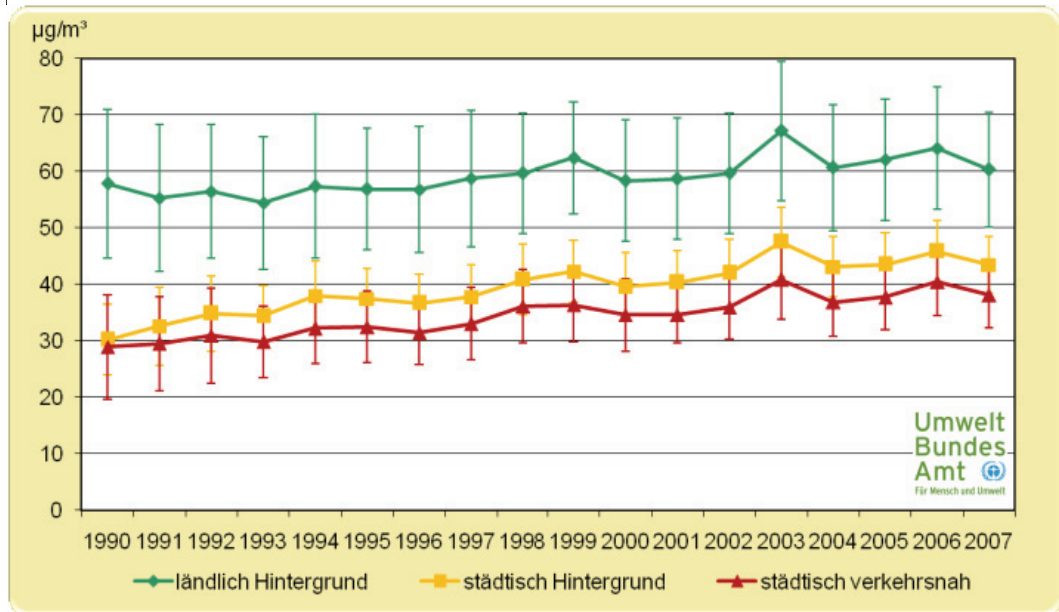
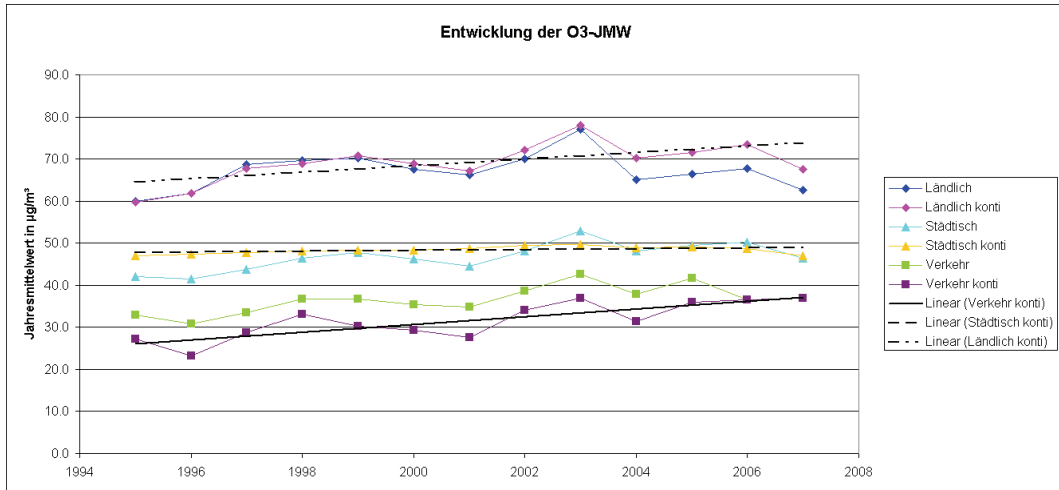
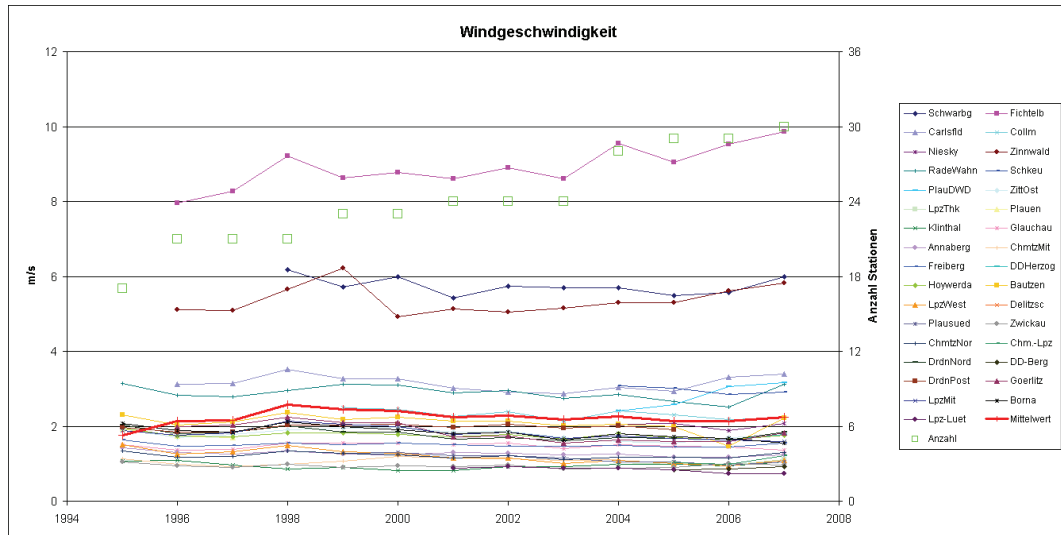


Abbildung 3-25: Ozon-Jahresmittelwerte für verschiedene Stationstypen für die sächsischen Messungen (oben) und als Auswertung des UBA für Deutschland (unten)



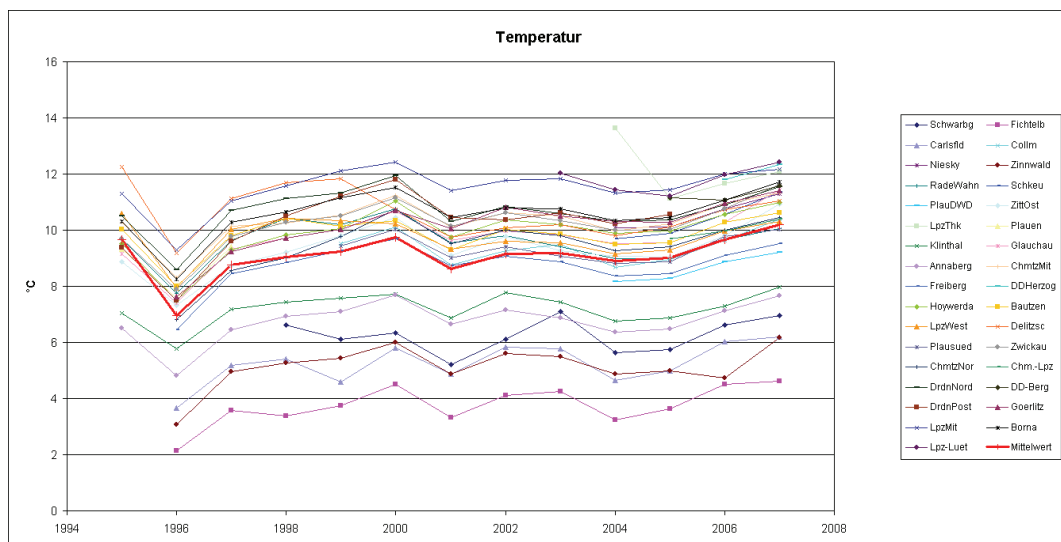
In Abbildung 3-26 ist die Entwicklung des Jahresmittelwerts der Windgeschwindigkeit für alle Stationen und im Mittel (rote Linie) dargestellt. Zusätzlich ist mit den grünen Quadraten die Anzahl der zur Verfügung stehenden Stationen eingezeichnet.

Die höchsten Windgeschwindigkeiten werden an den hoch gelegenen Messstationen Schwarzenberg, Fichtelberg und Zinnwald gemessen. Der Mittelwert über alle Stationen weist keinen Trend auf, sondern bewegt sich immer um die 2 m/s.



**Abbildung 3-26: Entwicklung der Windgeschwindigkeit (Mittelwert – rote Linie, Anzahl Stationen – grüne Quadrate)**

In Abbildung 3-27 ist analog zur Auswertung der Windgeschwindigkeit der zeitliche Verlauf der Jahresmittelwerte der gemessenen Temperaturen der sächsischen Stationen dargestellt. Als Jahr mit einem deutlich niedrigeren Mittelwert der Temperatur fällt 1996 auf.



**Abbildung 3-27: Entwicklung der Temperatur (Mittelwert – rote Linie)**

### **3.3.2 Statistische Analyse möglicher Einflussfaktoren**

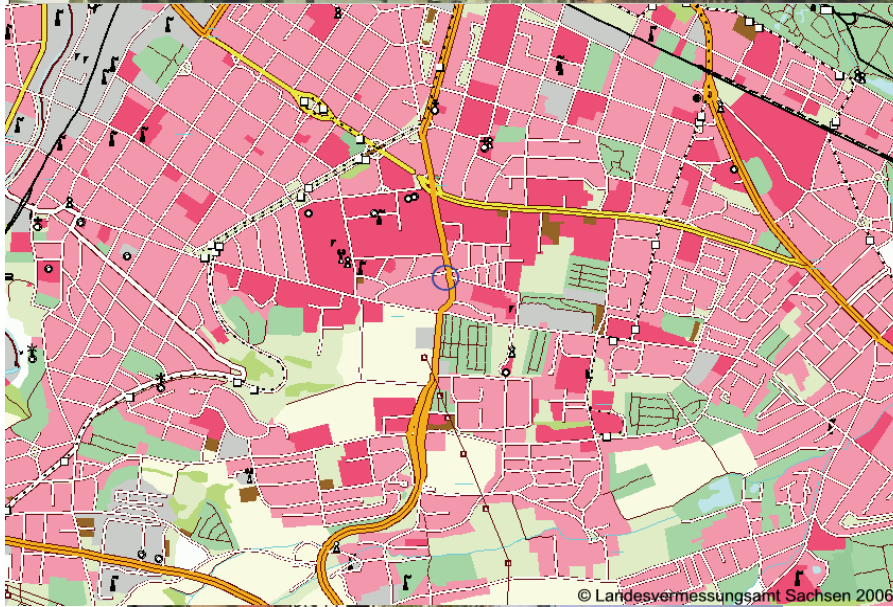
Als mögliche Einflussfaktoren auf die NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung im Straßenraum wurden

- die NO<sub>x</sub>-Zusatzbelastung,
- die Anzahl der Kraftfahrzeuge,
- die NO<sub>2</sub>-Emissionen des Kfz-Verkehrs,
- das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Emissionsverhältnis,
- die photochemischen Reaktionen von NO, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> sowie
- die Meteorologie

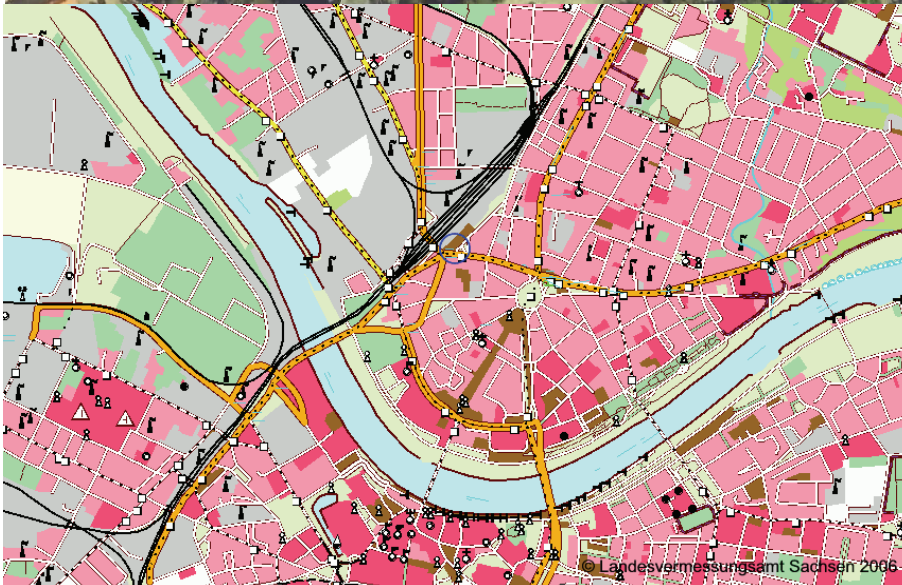
betrachtet. Als Zusatzbelastung wird dabei der Anteil der Schadstoffbelastung bezeichnet, der aus dem Kraftfahrzeugverkehr der engeren Umgebung der Messstelle stammt. Die Zusammenhänge der NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung mit den genannten Kenngrößen wurden mit Hilfe von Korrelationsmatrizen und multivariaten Regressionsanalysen auf Basis der im sächsischen Messnetz ermittelten Daten untersucht.

#### **3.3.2.1 Betrachtete Stationen**

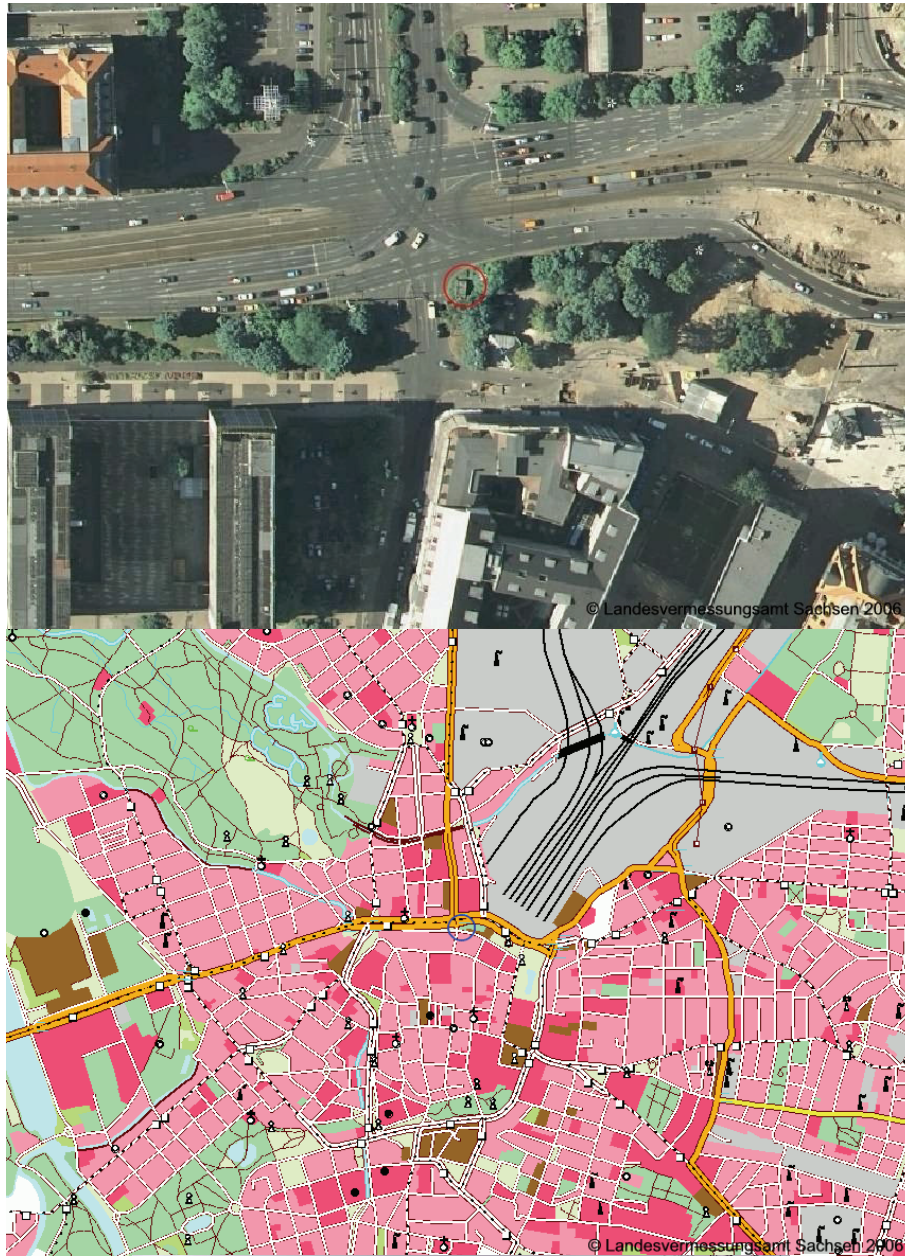
Zur Bestimmung der Korrelationsmatrizen und Durchführung der Regressionsanalysen wurden diejenigen Messstationen verwendet, für die Daten aus Verkehrszählungen vorliegen. Für den Untersuchungszeitraum traf dies in Sachsen auf vier Immissionsmessstellen zu, deren Umgebungen in Abbildung 3-28 bis Abbildung 3-31 dargestellt sind.



**Abbildung 3-28: Luftbild, Umgebungskarte und Foto der Station Dresden-Bergstraße**



**Abbildung 3-29: Luftbild, Umgebungskarte und Foto der Station Dresden-Nord**



**Abbildung 3-30: Luftbild, Umgebungskarte und Foto der Station Leipzig-Mitte**

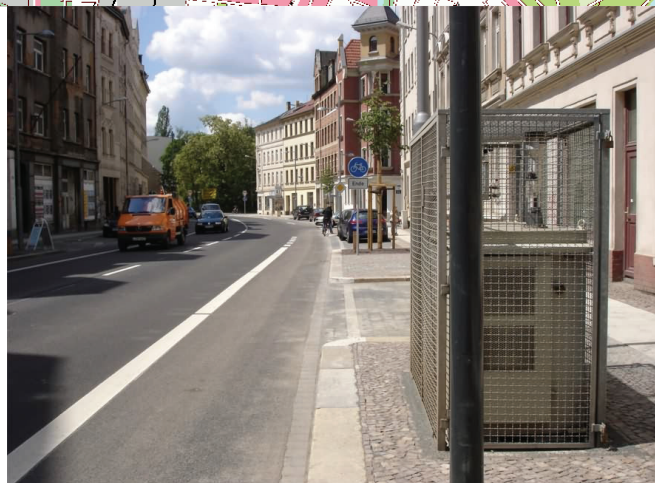
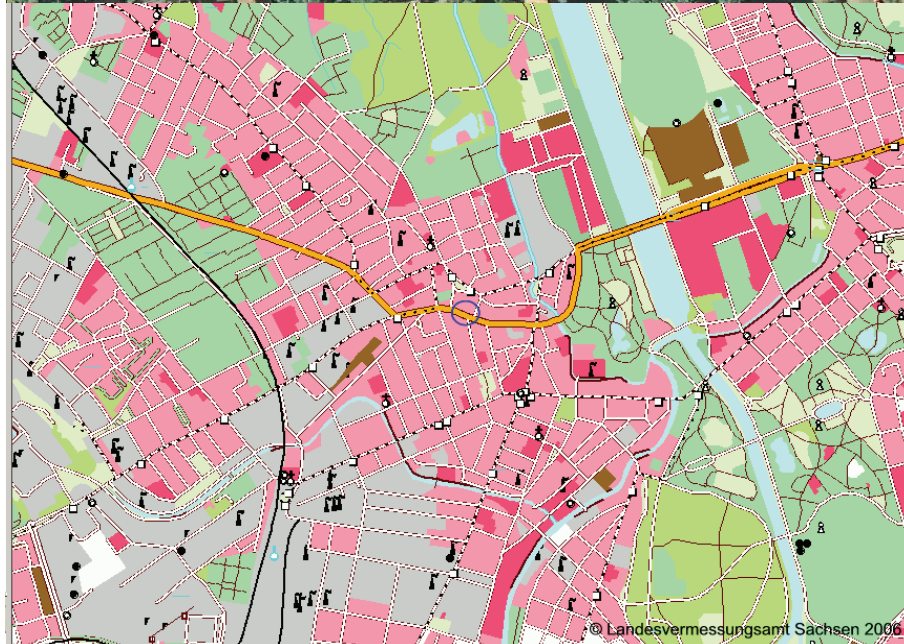


Abbildung 3-31: Luftbild, Umgebungskarte und Foto der Station Leipzig-Lützner Straße

### 3.3.2.2 Eingangsdaten

Sowohl die Daten der Verkehrszählungen als auch die Immissionsmessungen und die meteorologischen Daten sind, sofern nicht anders aufgeführt, Stundenmittelwerte.

#### 3.3.2.2.1 Immissionen

Messstationen, die Immissionsmessungen durchführen, messen die Gesamtbelastung. Diese kann man sich zusammengesetzt denken aus einer Vorbelastung, das ist die Überdach-Konzentration, und einer Zusatzbelastung, das ist die Konzentration, die aus dem Kraftfahrzeugverkehr der engeren Umgebung der betrachteten Messstelle stammt. Um die Zusatzbelastung aus Immissionsmessungen zu ermitteln, muss die Vorbelastung bekannt sein. Da die Überdach-Konzentration nicht gemessen wird, wurde auf die urbane Hintergrundstation zurückgegriffen, die der betreffenden Messstelle am nächsten liegt. Dieses sind für die vier hier untersuchten Verkehrs-Messstationen (Kapitel 3.3.2.1):

**Tabelle 3-2: Messstationen Verkehr mit zugehöriger Hintergrundstation und Entfernung zwischen den Stationen**

Messstation Verkehr	Messstation Hintergrund	Entfernung [km]
Dresden-Bergstraße	Radebeul-Wahnsdorf	11.11
Dresden-Nord	Radebeul-Wahnsdorf	7.66
Leipzig-Mitte	Leipzig-West	6.28
Leipzig-Lützner Straße	Leipzig-West	3.28

Für Dresden wurde statt der näher gelegenen städtischen Hintergrundstation Dresden-HerzoginGarten die Station Radebeul-Wahnsdorf verwendet. Wie in Tabelle 3-1 aufgeführt ist, wurde in Dresden-HerzoginGarten zum 01.01.2006 mit Messungen begonnen. Daten dieser Station liegen also zum jetzigen Zeitpunkt nur für zwei Jahre vor. Dieser Zeitraum wird insbesondere im Hinblick auf die statistische Analyse des meteorologischen Einflusses in Kapitel 3.3.2.4 als zu kurz erachtet. Von der stattdessen gewählten Station Radebeul-Wahnsdorf liegen dagegen Daten für den gesamten Untersuchungszeitraum 1995 – 2007 vor.

Aus den Daten der Hintergrundmessstellen nach Tabelle 3-2 wurde auch das stündliche photochemische Gleichgewicht für die vier Messstationen berechnet.

#### 3.3.2.2.2 Photochemisches Gleichgewicht

Folgende drei Reaktionsgleichungen laufen im Wesentlichen im Straßenraum ab (WIEGAND, G.; YAMARTINO, R. J. (1986)):

- a: Photolyse des  $\text{NO}_2$  in  $\text{NO}$  und  $\text{O}$  bei Strahlung mit Wellenlänge  $<410 \mu\text{m}$
- b: Rekombination von Sauerstoffatomen ( $\text{O}$ ) mit  $\text{O}_2$  zu  $\text{O}_3$
- c: Ozonabbau durch  $\text{NO}$  in  $\text{NO}_2$  und  $\text{O}_2$

Im Folgenden sind Volumenkonzentrationen durch eckige Klammern gekennzeichnet.

In der für die Ausbreitung im Straßenraum relevanten Zeitskala sind dies die entscheidenden Reaktionen, da sie unter den meisten Bedingungen um Größenordnungen schneller ablaufen als konkurrierende Reaktionen, an denen  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  oder  $\text{O}_3$  beteiligt sind. Als Folge der drei Prozesse a bis c stellt sich in kürzester Zeit ein photostationäres Gleichgewicht ein, das durch folgende Gleichgewichtsbeziehungen beschrieben wird:

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

Mit  $k_1$  = NO<sub>2</sub>-Photolysefrequenz

$k_3$  = Reaktionskonstante für Reaktion c

Wenn man diese Beziehung auf die stündlichen Konzentrationen in Straßenräumen anwenden will, muss man folgende Probleme lösen:

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

Deshalb wird die Gleichgewichtsbeziehung anstatt über das Verhältnis der Reaktionskonstanten  $k_1$  und  $k_3$  über eine empirische Größe "PCE"<sup>2</sup> definiert, die aus den Überdach-Konzentrationen<sup>3</sup>  $[NO]^B$ ,  $[NO_2]^B$  und  $[O_3]^B$  in Volumenkonzentrationen, z. B. ppb, bestimmt wird:

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

Dieses photochemische Gleichgewicht wurde aus den stündlichen Messungen von O<sub>3</sub>, NO und NO<sub>2</sub> an den urbanen Hintergrundmessstellen (Tabelle 3-2) berechnet und wurde in der Regressionsanalyse zur Abbildung des Einflusses der Photochemie auf die Zusatzbelastung von NO<sub>2</sub> verwendet.

### 3.3.2.2.3 Verkehrsdaten

Es lagen Daten aus Verkehrszählungen für die vier in Kapitel 3.3.2.1 beschriebenen Stationen Dresden-Bergstraße, Dresden-Nord, Leipzig-Mitte und Leipzig-Lützner Straße vor. Die zeitliche Verfügbarkeit der Daten schwankt zwischen 101 Tagen (Leipzig-Mitte) und 1'250 Tagen (Dresden-Nord). Aufgrund dieser relativ kurzen Zeiträume ist die Aussage der folgenden Analysen bezüglich der Verkehrsvariablen nur bedingt belastbar.

Die Zuordnung der Immissionsmessstellen zu den gezählten Verkehrsströmen auf Basis der Abbildungen in Kapitel 3.3.2.1 ist nicht immer eindeutig möglich. Am besten ist das für die Immissionsmessstationen "Dresden-Bergstraße" und "Leipzig-Lützner Straße" möglich. Bei den Stationen "Dresden-Nord" und "Leipzig Mitte" ist das aufgrund der verschiedenen Verkehrsströme und der offenen Struktur der Bebauung nur eingeschränkt möglich.

<sup>2</sup> "PCE" = Photochemical Equilibrium

<sup>3</sup> Superscript "B" für Background



**Tabelle 3-3: Verkehrszählstellen mit zugehörigen Messzeiträumen und Verkehrsdaten**

Name der Verkehrszählstelle	Messzeitraum			Verkehrsdaten
	Von	Bis	Anzahl Tage	DTV in Kfz/Tag
Dresden Bergstraße	27.06.2007	31.12.2007	188	26332
Dresden-Nord	30.07.2004	31.12.2007	1250	37109
Leipzig Mitte	22.09.2007	31.12.2007	101	45516
Leipzig Lützner Straße	01.01.2007	31.12.2007	365	20972

#### 3.3.2.2.4 Meteorologische Daten

Als meteorologische Größen wurden Windgeschwindigkeit und –richtung, Temperatur, Strahlung, relative Luftfeuchte und Luftdruck auf Zusammenhänge mit der NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung untersucht. Unter der Annahme, dass die Hintergrundstationen (Tabelle 3-2) ungestörter von Bebauungseinflüssen sind, wurden die dort gemessenen Windvariablen verwendet. Für die übrigen meteorologischen Variablen wurden direkt die Messwerte der jeweiligen Verkehrsmessstelle verwendet, sofern sie dort gemessen wurden, ansonsten ebenfalls die Messwerte der zugehörigen Hintergrundstation.

#### 3.3.2.3 Einflussfaktoren Emissionen und Ozonchemie

In diesem Kapitel wird der Einfluss der verkehrlichen Faktoren und der Ozonchemie auf die NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung analysiert.

#### 3.3.2.3.1 Korrelationsmatrizen

Die in diesem und in Kapitel 3.3.2.4.1 dargestellten Korrelationsmatrizen zeigen die statistischen Beziehungen zwischen jeweils zwei der untersuchten Größen für die vier betrachteten Verkehrsmessstationen (Abbildung 3-32 bis Abbildung 3-35). Dazu ist auf der Hauptdiagonalen jeder Matrix das Histogramm der jeweiligen Variable eingezeichnet. Über der Hauptdiagonalen wird der Korrelationskoeffizient nach Pearson größenabhängig aufgetragen. Unter der Hauptdiagonalen sind die Scatter-Plots jeweils zweier Größen dargestellt, die durch eine lineare Regressionsgrade (grün) und eine mit einem lokalen Regressionsverfahren abgeleitete Kurve (blau) ergänzt werden. Die Korrelationsmatrizen wurden auf der Basis der stündlichen Messwerte und Daten ermittelt. Tabelle 3-4 führt die im Folgenden auf ihre Beziehung zur NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung untersuchten Variablen auf. Die NO<sub>2</sub>-Emissionen wurden dabei mit dem Emissionsmodell IMMIS<sup>em</sup> (IVU UMWELT (2008)) berechnet.

**Tabelle 3-4: Beschreibung der Variablenamen in den Korrelationsmatrizen**

Variable	Bedeutung
NOx	NOx-Zusatzbelastung
NO2	NO <sub>2</sub> -Zusatzbelastung
PCE	Photochemisches Gleichgewicht
NO2Emis	NO <sub>2</sub> -Emission (mit IMMIS <sup>em</sup> )
NO2zuNOx	NO <sub>2</sub> /NOx-Emissionsverhältnis
SumKfz	Summe der Kraftfahrzeuge

Die Korrelationsmatrizen in Abbildung 3-32 bis Abbildung 3-35 zeigen, dass der engste Zusammenhang für die NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung mit der NO<sub>x</sub>-Zusatzbelastung besteht (Korrelationskoeffizienten >0.80). Ein engerer Zusammenhang wird auch mit den NO<sub>2</sub>-Emissionen sowie mit der Anzahl der Kraftfahrzeuge gesehen. In Dresden liegen die Korrelationskoeffizienten dafür zwischen 0.37 und 0.66, in Leipzig zwischen 0.55 und 0.58. In Dresden wird weiterhin ein Korrelationskoeffizient von 0.37 bzw. 0.31 zwischen der NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung und dem NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Emissionsverhältnis ermittelt, in Leipzig sind die Werte für diesen Zusammenhang allerdings minimal. Auffällig ist der geringe Zusammenhang zwischen NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung und photochemischem Gleichgewicht.

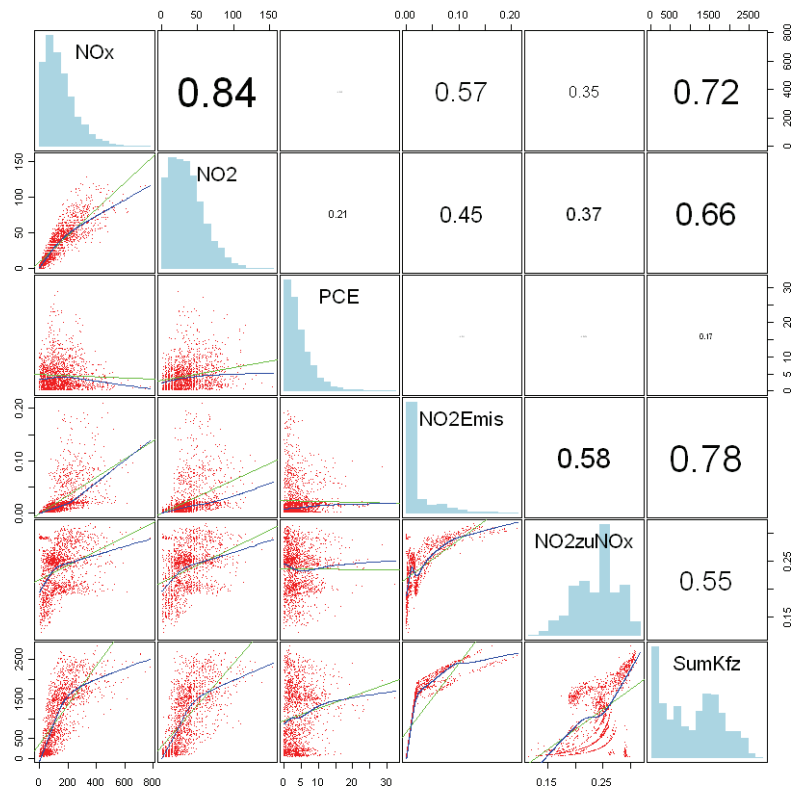


Abbildung 3-32: Korrelationsmatrix Dresden-Bergstraße

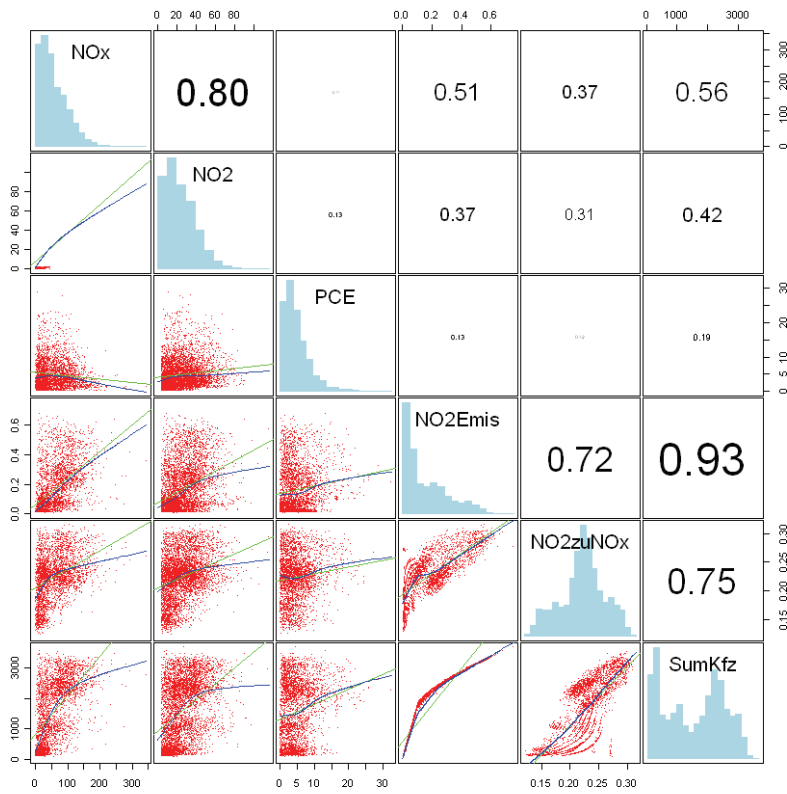


Abbildung 3-33: Korrelationsmatrix Dresden-Nord

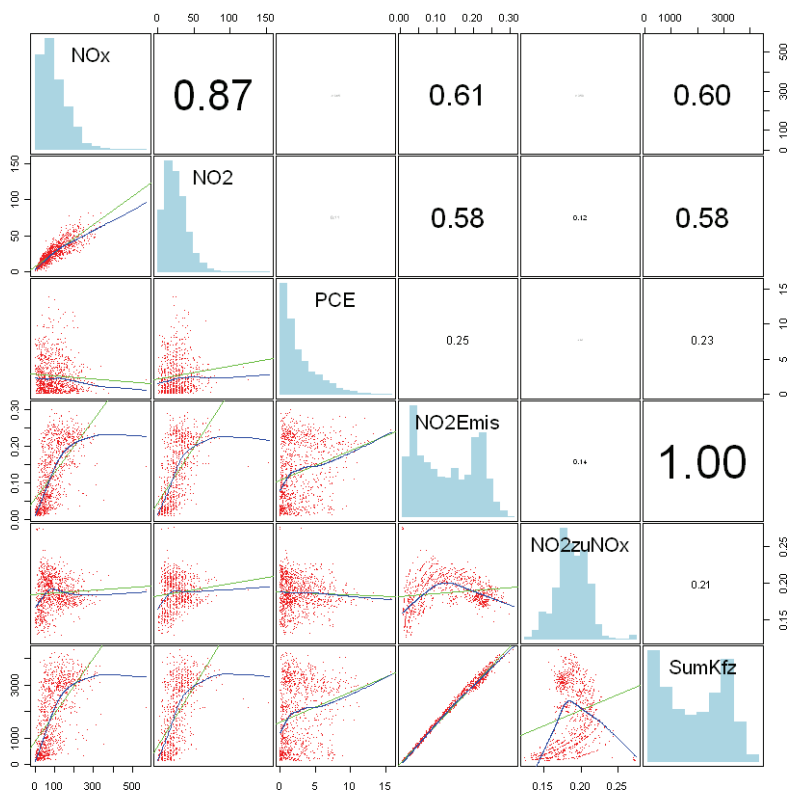


Abbildung 3-34: Korrelationsmatrix Leipzig-Mitte

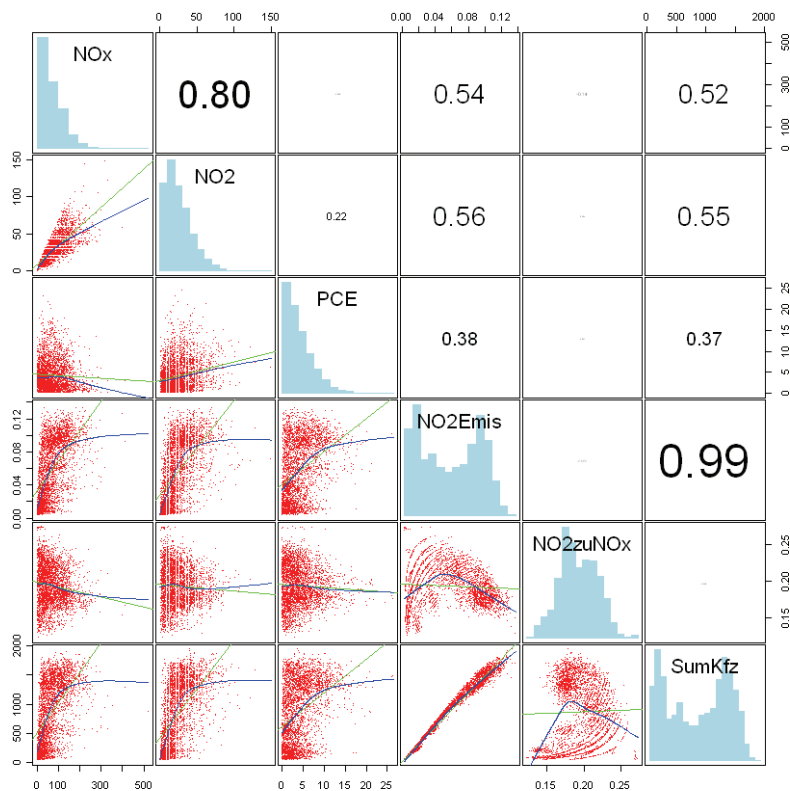


Abbildung 3-35: Korrelationsmatrix Leipzig-Lützner Straße

### 3.3.2.3.2 Multivariate Regressionsanalyse

Für jede der vier betrachteten Messstationen wurde eine multivariate Regressionsanalyse mit Stundenwerten durchgeführt von der NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung auf die NO<sub>x</sub>-Zusatzbelastung, das photochemische Gleichgewicht, die NO<sub>2</sub>-Emissionen der Kraftfahrzeuge in der betreffenden Straße, das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis in diesen Emissionen und die Summe der Kraftfahrzeuge.

Der sich aus den vier Regressionsanalysen ergebende Erklärungswert liegt im Mittel bei 0.74, d. h., es werden circa 74% der Variation in den NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastungen durch die Variation in den betrachteten Variablen erklärt.

Bereits aus den Korrelationsmatrizen in Kapitel 3.3.2.3.1 wurde deutlich, dass der engste Zusammenhang zwischen der NO<sub>2</sub>- und der NO<sub>x</sub>-Zusatzbelastung besteht. Dem entsprechend trägt die NO<sub>x</sub>-Zusatzbelastung den größten Erklärungsanteil, der mittlere Erklärungsanteil nur durch die NO<sub>x</sub>-Zusatzbelastung ist 0.68.

Trotzdem sind die übrigen Variablen alle signifikant, das bedeutet, dass sie alle zur Erklärung beitragen, wenn auch überraschend gering. Gründe für diesen geringen Beitrag können sein:

- mögliche Unzulänglichkeiten bei der NO<sub>2</sub>-Emissionsmodellierung,
- die Entfernung der urbanen Hintergrundstationen für das photochemische Gleichgewicht (bis circa 12 Kilometer) und
- die Kürze der Zeitreihen (≤ ein kompletter Jahresgang).

### 3.3.2.4 Einflussfaktoren Meteorologie

Es wurde der Einfluss der meteorologischen Variablen auf die hintergrundbereinigte NO<sub>2</sub>-Konzentration (Zusatzkonzentration) analysiert.

#### 3.3.2.4.1 Korrelationsmatrizen

Die Korrelationsmatrizen wurden auf der Basis der stündlichen Messwerte ermittelt. Tabelle 3-5 führt die im Folgenden auf ihre Beziehung zur NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung untersuchten Variablen auf:

**Tabelle 3-5: Beschreibung der Variablennamen in den Korrelationsmatrizen**

Variable	Bedeutung
NO2	NO <sub>2</sub> -Zusatzbelastung
WiR	Windrichtung
WiG	Windgeschwindigkeit
Tem	Temperatur
Rad	Strahlung
Hum	relative Feuchte
Pre	Luftdruck

Abbildung 3-36 bis Abbildung 3-39 zeigen die Korrelationsmatrizen für die vier betrachteten Messstationen. Ein wirklich enger Zusammenhang der NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung mit einer der untersuchten meteorologischen Größen besteht nicht. Korrelationskoeffizienten in der Größenordnung 0.32 bis 0.48 (außer für Dresden-Nord) treten für Temperatur und relative Feuchte auf. Für die Strahlung ergibt sich ein Korrelationskoeffizient von 0.22 bis 0.33, wobei auch hier Dresden-Nord wieder deutlich darunter liegt.

Die Station Leipzig-Lützner Straße liegt als einzige der vier Stationen in einer klassischen Straßenschlucht. Auch die Lage der Station Dresden-Bergstraße kann ansatzweise als Straßenschlucht bezeichnet werden. Hier ist das Windfeld durch die sich ausbreitende Wirbelströmung definiert. Dies ist bei den offen bebauten Straßenräumen der Stationen Dresden-Nord und Leipzig-Mitte nicht der Fall. Tatsächlich lässt sich für Leipzig-Lützner Straße und Dresden-Bergstraße ein Korrelationskoeffizient von rund 0.25 zwischen NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung und Windgeschwindigkeit ermitteln. Für die anderen beiden Stationen ist der Korrelationskoeffizient an dieser Stelle minimal.

Die Korrelationskoeffizienten in Zusammenhang mit der Windrichtung sind nicht interpretierbar, da es sich um eine zyklische Variable handelt.

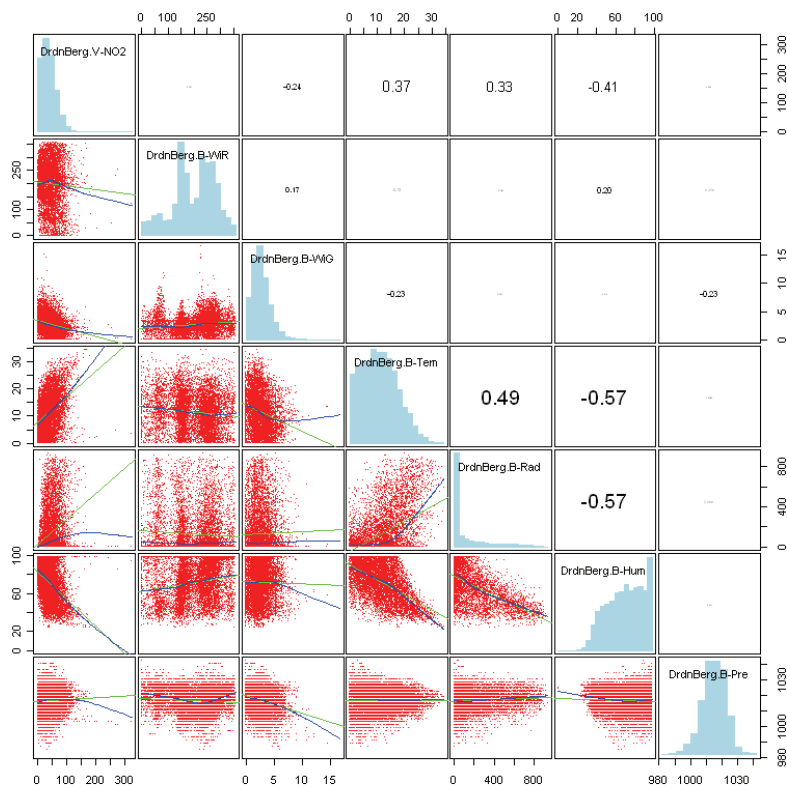


Abbildung 3-36: Korrelationsmatrix Meteorologie Dresden-Bergstraße

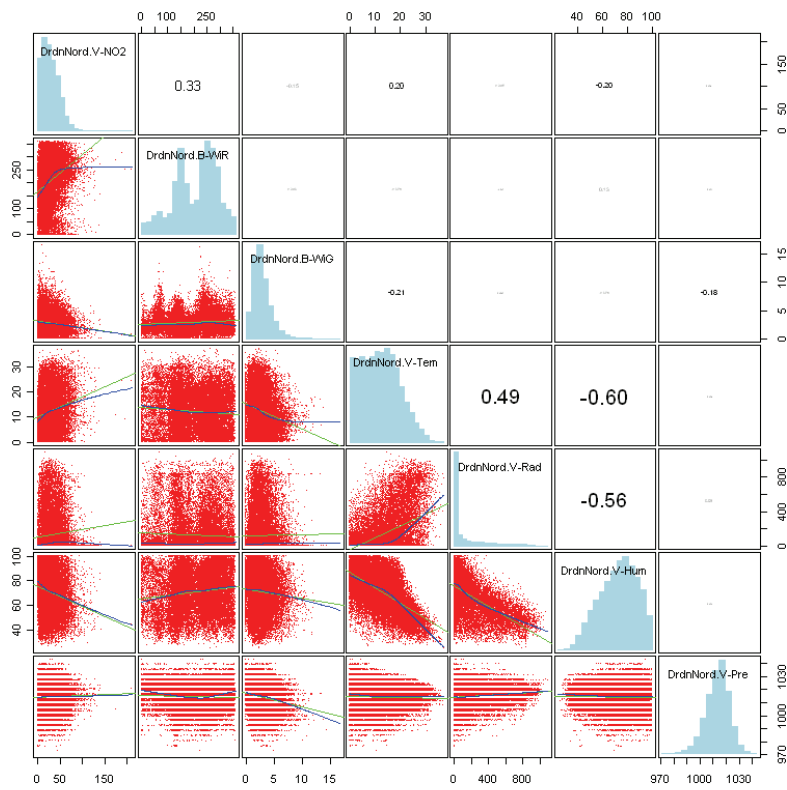


Abbildung 3-37: Korrelationsmatrix Meteorologie Dresden-Nord

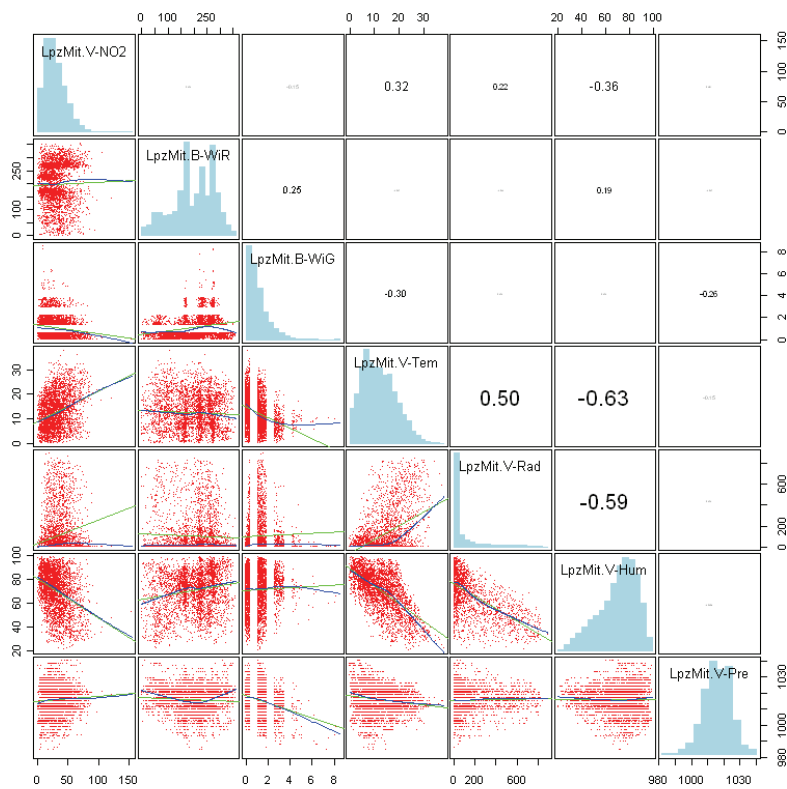


Abbildung 3-38: Korrelationsmatrix Meteorologie Leipzig-Mitte

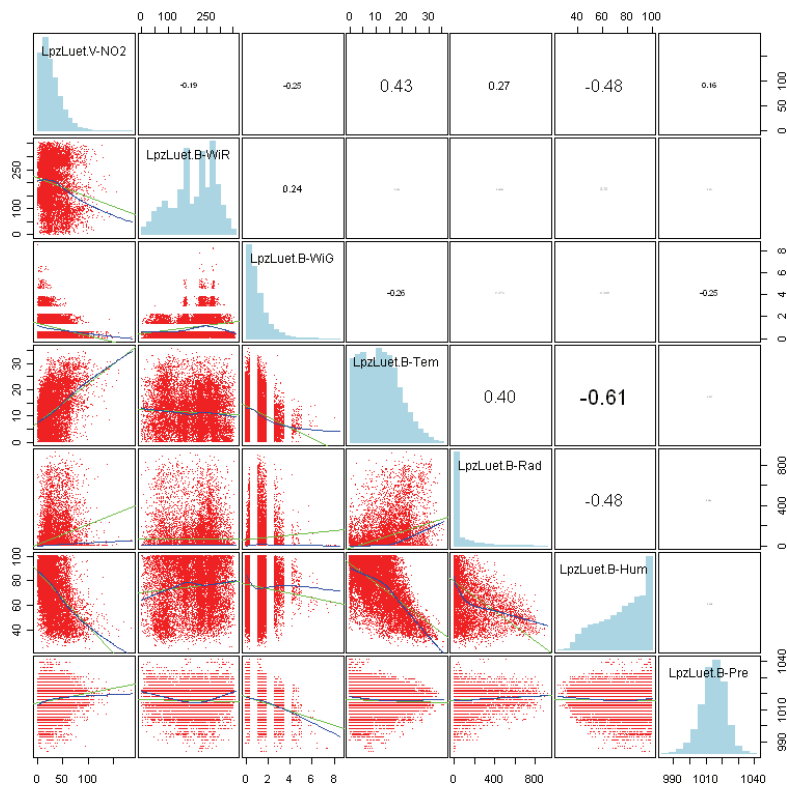


Abbildung 3-39: Korrelationsmatrix Meteorologie Leipzig-Lützner Straße

#### **3.3.2.4.2 Multivariate Regressionsanalyse**

Für jede der vier betrachteten Stationen wurde eine Regressionsanalyse mit Stundenwerten von der NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastung auf die meteorologischen Variablen durchgeführt.

Hierbei wurde die zyklische Variable "Windrichtung" in acht Dummy-Variablen, entsprechend den 45°-Sektoren, umgewandelt. Die Dummy-Variable für den Sektor von 0° bis 45° ist "Eins", wenn der Wind aus der Richtung von 0° bis 45° kommt, sonst "Null", bei den anderen sieben Windrichtung-Dummies verhält es sich entsprechend.

Der Bezugszeitraum der Regressionsanalysen ist der Untersuchungszeitraum 1995 – 2007. Aufgrund von Fehlwerten gehen für die Station Dresden-Bergstraße knapp 20500 Stundenwerte in die Analyse ein, für Dresden-Nord rund 76600 Stundenwerte, für Leipzig-Mitte rund 8800 Stundenwerte und für Leipzig-Lützner Straße knapp 34000. D. h., im Mittel über die vier Straßen gehen circa 35'000 Stundenwerte in die Berechnung ein, das sind knapp vier Jahre. Der hohe Anteil an nicht berücksichtigten Stunden kommt dadurch zustande, dass die multivariate Regressionsanalyse nur Stunden berücksichtigt, in denen für alle betrachteten Variablen ein Wert vorliegt.

Der sich aus den vier Regressionsanalysen ergebende Erklärungswert liegt im Mittel bei 0.31, d. h. es werden circa ein Drittel der Variation in den NO<sub>2</sub>-Zusatzbelastungen durch die Variation in den meteorologischen Variablen erklärt.

Die Windvariablen (Windrichtung-Dummies und Windgeschwindigkeit) tragen im Mittel der vier Straßen 18% zur Erklärung bei. Wie bereits in Kapitel 3.3.2.4.1 beschrieben, liegt die Station Leipzig-Lützner Straße als einzige der vier Stationen in einer klassischen Straßenschlucht, in der das Windfeld durch die sich ausbreitende Wirbelströmung definiert ist. Auch die Lage der Station Dresden-Bergstraße kann ansatzweise als Straßenschlucht bezeichnet werden. Dem entsprechend tragen die Windvariablen hier einen größeren Erklärungsanteil als an den anderen beiden Stationen. Dies spiegelt sich in einem höheren Erklärungswert dieser beiden Stationen wieder, nämlich 39 % für Leipzig-Lützner Straße und 33 % für Dresden-Bergstraße gegenüber 28 % für Dresden-Nord und 24 % für Leipzig-Mitte.

Die übrigen Variablen sind überwiegend signifikant, das bedeutet, dass sie zur Erklärung beitragen. Begründbare Einflüsse der Variablen "Temperatur", "relative Feuchte" und "Luftdruck" sind schwer zu finden, der statistische Einfluss auf die NO<sub>2</sub>-Zusatzkonzentration ist möglicherweise auf den gemeinsamen Jahres- und Tagesgang (Saisoneinfluss) zurückzuführen. Die Variable "Strahlung" hat sicherlich einen direkten Einfluss auf die NO<sub>2</sub>-Zusatzkonzentration über die photochemischen Zusammenhänge, aber die Trennung von Saisoneinfluss und direktem Einfluss mit statistischen Mitteln ist nicht möglich.

#### **3.4 Prüfung eines möglichen Bedarfs für die Weiterentwicklung des sächsischen Luftmessnetzes**

Im Rahmen des vorliegenden Projekts soll das Luftmessnetz des Freistaats Sachsen auf redundante bzw. für die flächenhafte Aussage wichtige Messstandorte untersucht werden.

Die Untersuchungen wurden mit dem Programmsystem FLADIS (IVU UMWELT (2006A)) durchgeführt. FLADIS ist ein Programmsystem für die Analyse und Visualisierung von Messnetzdaten. Es berechnet eine flächenhafte Darstellung der Verteilung von z. B. Luftschadstoffkonzentrationen in einem Untersuchungsgebiet auf der Basis von Mess- und/oder Modelldaten. Mit Hilfe des statistischen Verfahrens der Kreuzvalidierung erlaubt FLADIS Aussagen über den Einfluss einzelner Stationen auf die flächenhafte Darstellung und unterstützt so die Optimierung des in die Berechnung eingeflossenen Messnetzes. Die dabei angewendete Methodik entspricht der VDI



Richtlinie 4280 Blatt 5 "Ermittlung der Unsicherheit räumlicher Beurteilungen der Luftqualität" (KRdL (2007)).

Für den Freistaat Sachsen wurden Berechnungen mit FLADIS auf Basis der Messdaten für NO<sub>x</sub> für das Jahr 2006 durchgeführt. Dabei wurde zum einen das Ergebnis einer reinen Interpolation der Messdaten betrachtet, zum anderen wurde das Interpolationsergebnis mit den Ergebnissen einer Ausbreitungsrechnung mit dem Modell LASAT (JANICKE (2007)) gekoppelt, um in Bereichen abseits der Messstationen zusätzliche Informationen wie Orographie, Meteorologie und Emissionsstruktur zu nutzen.

### 3.4.1 Betrachtetes Messnetz

Abbildung 3-40 zeigt die NO<sub>x</sub>-Messstationen mit Daten für das Bezugsjahr 2006. Da es um flächenhafte Aussagen geht, werden verkehrsnahen Stationen nicht berücksichtigt. Damit verbleiben 15 Messstationen, die mit Hilfe der Kreuzvalidierung untersucht werden. Tabelle 3-6 listet die Stationen mit den zugehörigen Stationscodes und der EoI-Typisierung auf. Die Typen "ländlich regional" und "ländlich abgelegen" sowie "ländlich stadtnah" und "vorstädtischer Hintergrund" wurden dabei jeweils zusammengefasst.

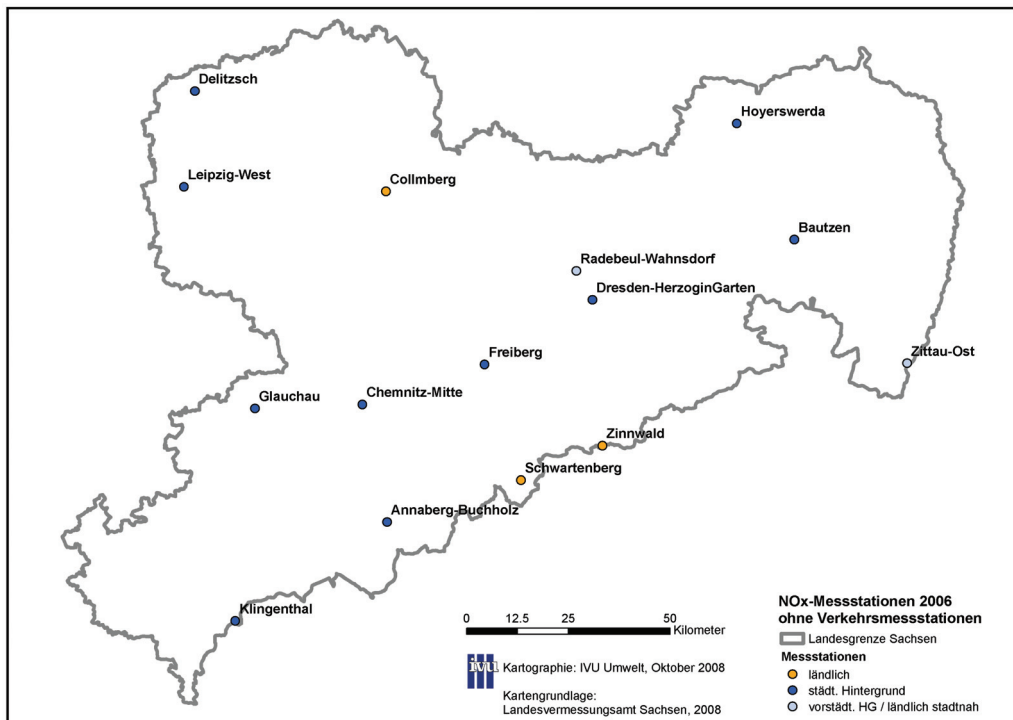


Abbildung 3-40: NO<sub>x</sub>-Messstationen im Bezugsjahr 2006 ohne Verkehrsmessstationen.

**Tabelle 3-6: Namen der verwendeten Messstationen mit Code und Typisierung.**

Messstation	Code	Typisierung
Annaberg-Buchholz	DESN001	städtischer Hintergrund
Bautzen	DESN004	städtischer Hintergrund
Chemnitz-Mitte	DESN011	städtischer Hintergrund
Collmberg	DESN076	ländlich regional / ländlich abgelegen
Delitzsch	DESN012	städtischer Hintergrund
Dresden-HerzoginGarten	DESN085	städtischer Hintergrund
Freiberg	DESN017	städtischer Hintergrund
Glauchau	DESN019	städtischer Hintergrund
Hoyerswerda	DESN050	städtischer Hintergrund
Klingenthal	DESN024	städtischer Hintergrund
Leipzig-West	DESN059	städtischer Hintergrund
Radebeul-Wahnsdorf	DESN051	vorstädtischer Hintergrund / ländlich stadtnah
Schwartenberg	DESN074	ländlich regional / ländlich abgelegen
Zinnwald	DESN052	ländlich regional / ländlich abgelegen
Zittau-Ost	DESN045	vorstädtischer Hintergrund / ländlich stadtnah

### 3.4.2 Methodik

#### 3.4.2.1 Berechnungen mit FLADIS

Mit FLADIS wurde zum einen eine reine Interpolation der Messwerte der in Kapitel 3.4.1 beschriebenen Messstationen durchgeführt. Für die räumliche Interpolation von Messwerten sind zur Zeit sieben Verfahren in FLADIS implementiert, darunter eine lineare Interpolation nach Triangulierung, Inverse-Distanz-Methoden, Radiale-Basisfunktions-Methoden und das statistische Verfahren der Optimalen Interpolation (OI) in der Modifikation nach Flemming (FLEMMING, J. (2003)). Für die vorliegende Untersuchung wurde die Hardy'sche Multiquadriken-Methode, die zu den Radialen-Basisfunktions-Methoden zählt, zur Interpolation der Messwerte gewählt. Da die Messwerte in stundenfeiner Auflösung vorlagen, wurde die Interpolation für jeden Zeitschritt durchgeführt und abschließend das Jahresmittel gebildet.

Zum anderen wurden in einem zweiten Ansatz die interpolierten Messwerte in jedem Zeitschritt mit den Ergebnissen einer LASAT-Ausbreitungsrechnung (Kapitel 3.4.2.2) gekoppelt und auch hier wieder abschließend das Jahresmittel gebildet. Auf diese Weise fließen zusätzliche Informationen wie Orographie, Meteorologie und Emissionsstruktur, die der Ausbreitungsrechnung zu Grunde gelegen haben, in das Ergebnis der FLADIS-Rechnung ein und ermöglichen eine Beurteilung des Messnetzes auch abseits der vorhandenen Stationen.

Für beide Ansätze wurde ebenfalls für jeden Zeitschritt eine Kreuzvalidierung nach dem "leave-one-out"-Verfahren gemäß der VDI Richtlinie 4280 Blatt 5 (KRdL (2007)) durchgeführt, um Aussagen über den Einfluss einzelner Stationen auf die flächenhafte Darstellung der NO<sub>x</sub>-Verteilung zu erhalten.

Bei NO<sub>2</sub> und NO handelt es sich um chemisch aktive Substanzen, deren Emissionen nur für die Summe NO<sub>x</sub> bestimmt werden können. Die LASAT-Ausbreitungsrechnungen, in die die Emissionen eingehen, wurden daher für NO<sub>x</sub> durchgeführt. Zwar kann aus dem Jahresmittelwert der NO<sub>x</sub>-Gesamtbelastung mittels statistischer Verfahren der Jahresmittelwert der NO<sub>2</sub>-Gesamt-

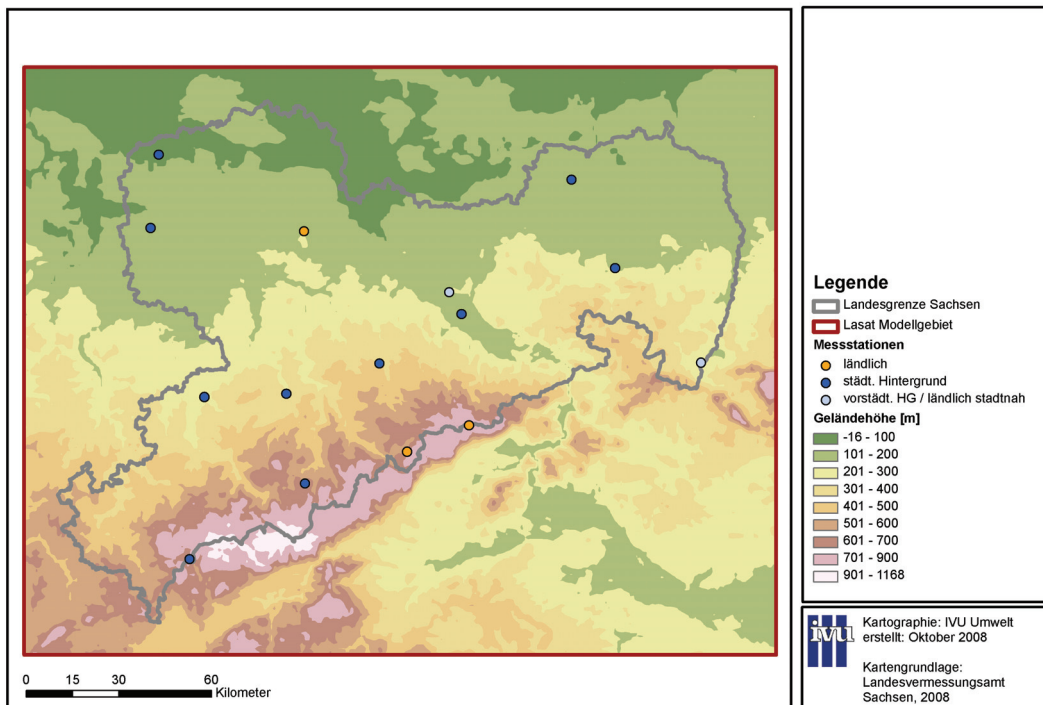
belastung bestimmt werden (IVU UMWELT (2002)). Da jedoch die Berechnung und Kreuzvalidierung in FLADIS auf der Basis stündlicher Zeitschritte erfolgen, wurde auch hier durchgängig NOx betrachtet.

### 3.4.2.2 Ausbreitungsrechnungen mit LASAT

Das Ausbreitungsmodell LASAT (Version 3.0) ist ein Partikelmodell nach Richtlinie VDI 3945 Blatt 3 (KRdL (2000)). Es berechnet die Ausbreitung von Spurenstoffen in der Atmosphäre, indem es für ein repräsentatives Ensemble von Spurenstoff-Partikeln die Bewegung mit Hilfe eines stochastischen Prozesses simuliert (Lagrange-Verfahren). Ein Partikelmodell ermöglicht die rechnerische Behandlung von zeitabhängigen Ausbreitungssituationen und komplexen Quellkonfigurationen. Das Ergebnis der Ausbreitungsrechnung ist die Konzentrationsverteilung im Modellgebiet, die aus den berücksichtigten Emissionsquellen resultiert.

#### 3.4.2.2.1 Modellgebiet und Orographie

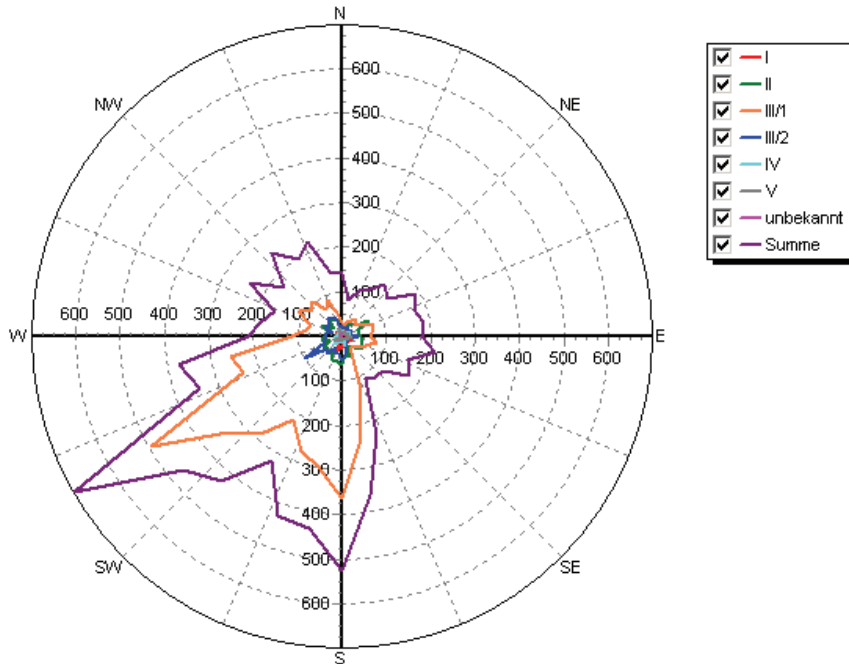
Die LASAT-Ausbreitungsrechnungen für das Gebiet des Freistaats Sachsen wurden unter Berücksichtigung der Orographie durchgeführt. Es wurde zunächst ein Modellgebiet definiert, das mit 243 km x 190 km in jede horizontale Raumrichtung mindestens 10 km Abstand zur Grenze Sachsens aufweist, um Randeffekte der Modellrechnung im Bereich des Untersuchungsgebiets (Sachsen) zu vermeiden (Abbildung 3-41). Die horizontale Auflösung des LASAT-Rechengitters beträgt 1 km. Anschließend wurde für den Bereich des Modellgebiets die Orographie ebenfalls mit einer Auflösung von 1 km ermittelt, so dass für jede Rasterzelle des Rechengitters ein Wert der Geländehöhe vorliegt (Abbildung 3-41).



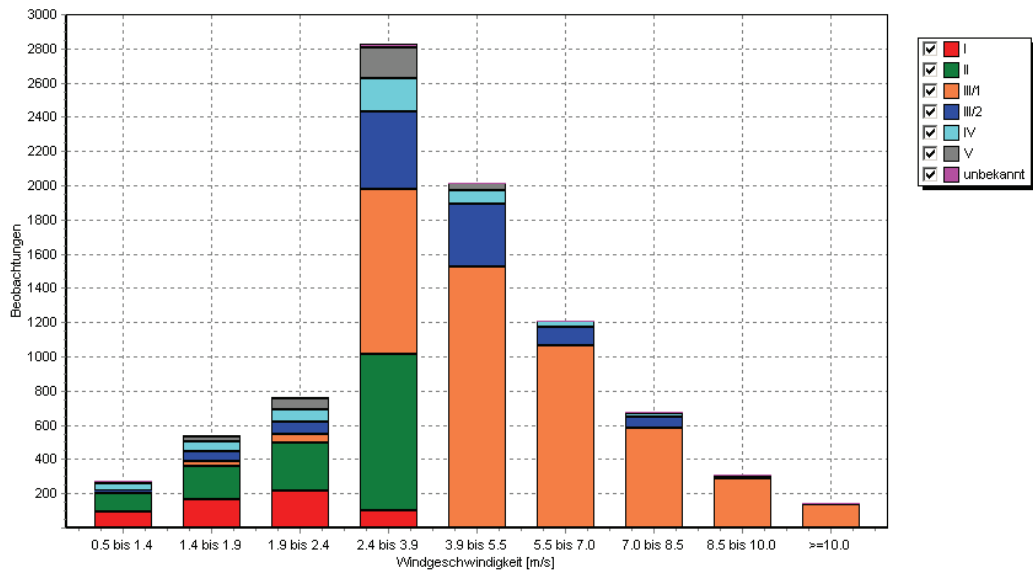
**Abbildung 3-41: LASAT-Modellgebiet und Orographie auf der Grundlage eines 1 km-Rasters. Zur Orientierung die Lage der verwendeten NOx-Messstationen.**

### 3.4.2.2.2 Meteorologie

Das Ausbreitungsmodell LASAT berücksichtigt die lokalen meteorologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet über eine Ausbreitungsklassen-Zeitreihe (AKTerm). Für die vorliegende Untersuchung wurde die AKTerm mit Bezugsjahr 2006 der Messstation Leipzig-Schkeuditz des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Abbildung 3-42 zeigt die Windrose und Abbildung 3-43 die Verteilung der Windgeschwindigkeitshäufigkeiten der AKTerm.



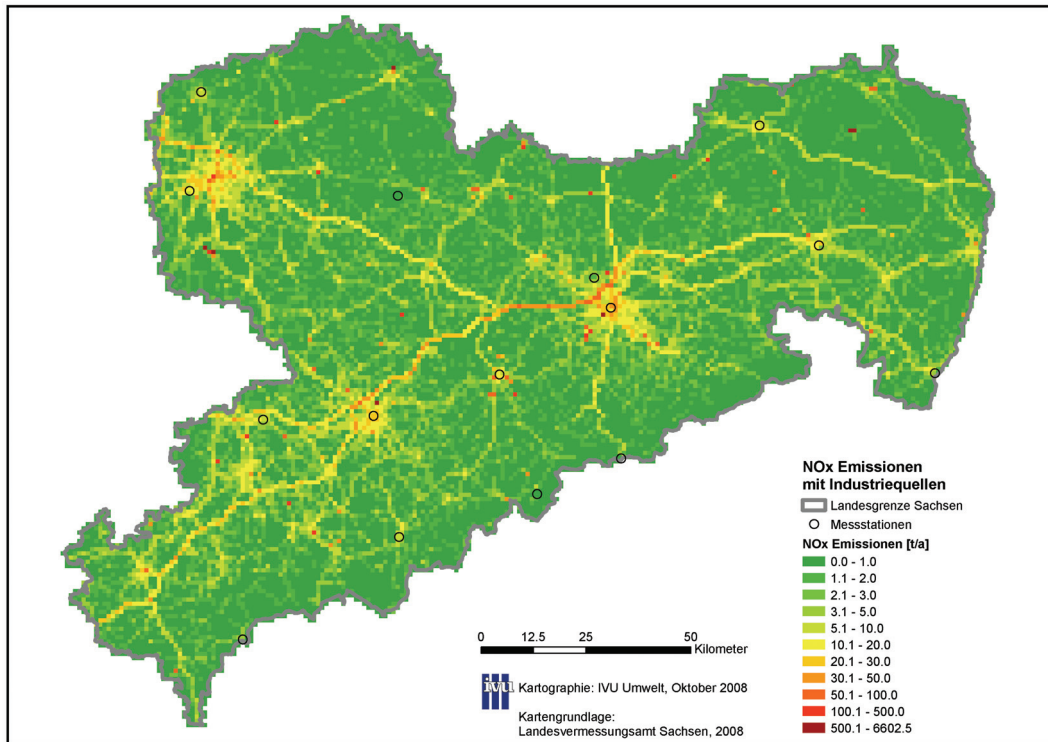
**Abbildung 3-42: Windrose (Ausbreitungsklassenhäufigkeit gegen Windrichtung) für die AKTerm 2006 der Windmessstation Leipzig-Schkeuditz.**



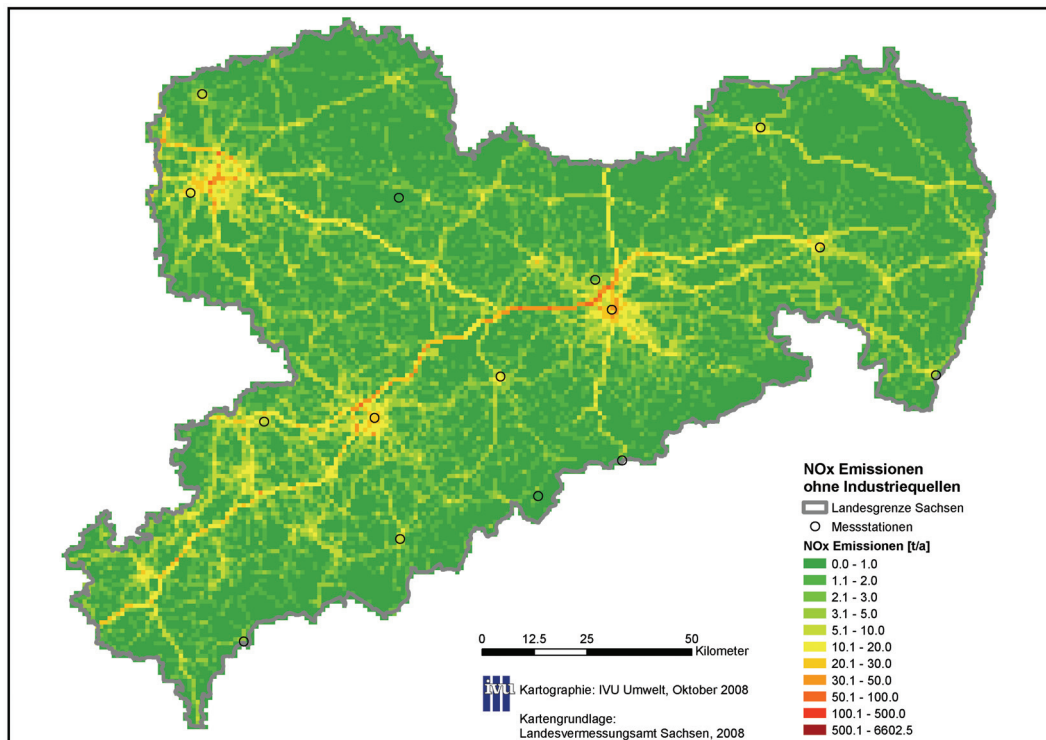
**Abbildung 3-43: Verteilung der Windgeschwindigkeitshäufigkeiten, differenziert nach Ausbreitungsklassen, für die AKTerm 2006 der Windmessstation Leipzig-Schkeuditz.**

### 3.4.2.2.3 Emissionen

Für die Ausbreitungsrechnungen standen NO<sub>x</sub>-Emissionen für die Quellgruppen Industrie, Verkehr, Hausbrand, Kleinverbraucher und Landwirtschaft für das Bezugsjahr 2004 bzw. 2005 in ihrer horizontalen räumlichen Verteilung zur Verfügung. Abbildung 3-44 und Abbildung 3-45 zeigen die Summe der Emissionen der berücksichtigten Quellgruppen im für die LASAT-Rechnungen verwendeten 1 km-Raster, einmal mit und einmal ohne Industriequellen. Deutlich sind das Straßennetz und bewohnte Flächen zu erkennen, Industriequellen erscheinen u. a. als einzelne Rasterzellen höherer Emissionen (Abbildung 3-44).



**Abbildung 3-44: NO<sub>x</sub>-Emissionen als Summe der Quellen Industrie, Verkehr, Hausbrand, Kleinverbraucher und Landwirtschaft im 1 km-Raster.**



**Abbildung 3-45: NO<sub>x</sub>-Emissionen als Summe der Quellen Verkehr, Hausbrand, Kleinverbraucher und Landwirtschaft im 1 km-Raster.**

In Tabelle 3-7 ist die Summe der NO<sub>x</sub>-Emissionen bezogen auf die Quellgruppe und insgesamt sowie der Anteil der einzelnen Quellgruppen an der Gesamtsumme der NO<sub>x</sub>-Emissionen aufgelistet. Für die zur Verfügung gestellten Emissionsdaten waren keine Emissionshöhen vorgegeben. Es wurden daher die in Tabelle 3-7 angegebenen Werte verwendet. Da die Industriequellen einerseits mit über 40 % einen großen Anteil an den NO<sub>x</sub>-Emissionen haben, andererseits aber ihr Einfluss auf die Immissionen von der Emissionshöhe abhängt, die gerade bei Industriequellen stark variieren kann, wurden in einem ersten Schritt zwei Ausbreitungsrechnungen mit unterschiedlicher Höhe der Industriequellen, d. h. 40 m und 80 m, durchgeführt sowie zum Vergleich eine Ausbreitungsrechnung ohne Industriequellen. Die Emissionshöhe wurde dabei konstant allen Industriequellen zugewiesen. Eine individuelle Modellierung der Industriequellen ist mit LASAT möglich unter der Voraussetzung, dass die Emissionshöhe sowie Temperatur und Volumenstrom des Abgases der einzelnen Quellen vorgegeben werden. Die Durchführung von Modellrechnungen unter Berücksichtigung der individuellen Daten der Großfeuerungsanlagen (GFA) in Sachsen ist für den nächsten Zwischenbericht geplant.

**Tabelle 3-7: Emissionshöhe, Emissionsmenge und Anteil der einzelnen Quellgruppen.**

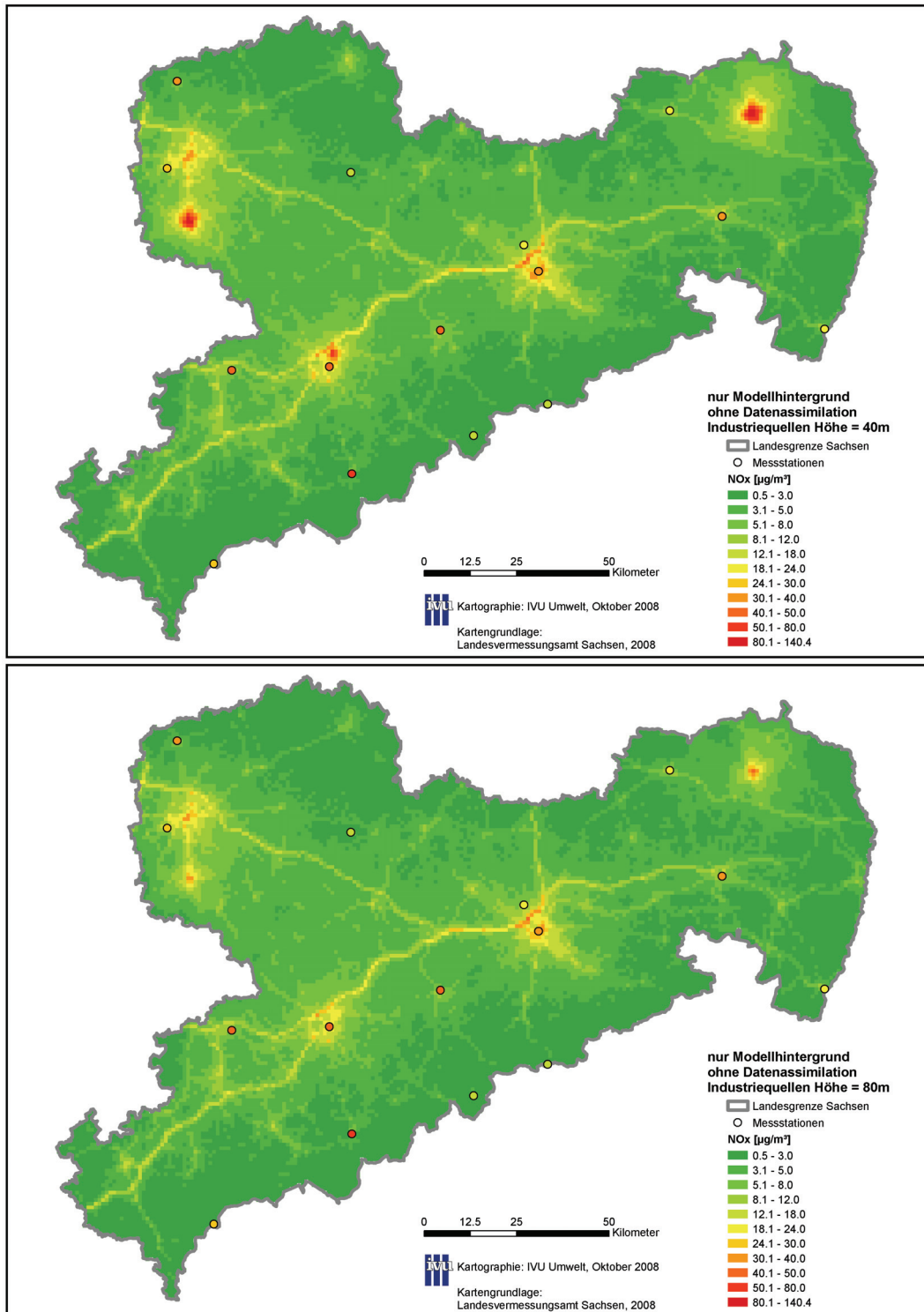
Quellart	Emissionshöhe [m]	NO <sub>x</sub> [t/a]	Anteil [%]
Industrie	40 (80)	28098.6	41.3
Verkehr	0.5	34664.6	50.9
Hausbrand	20	3320.7	4.9
Kleinverbraucher	5	1114.3	1.6
Landwirtschaft	1	857.5	1.3
<b>Summe</b>	-	<b>68055.8</b>	<b>100</b>
<b>Summe ohne Industrie</b>	-	<b>39957.2</b>	<b>58.7</b>

#### 3.4.2.2.4 Immissionsberechnung

Abbildung 3-46 und Abbildung 3-47 zeigen die Ergebnisse der LASAT-Ausbreitungsrechnungen auf Basis der beschriebenen Eingangsdaten für die Modellschicht 3-5 m, die die Höhe der Messstationen (Probenahme in 3.5 m Höhe) umfasst. Die Ergebnisse, für die eine Emissionshöhe der Industriequellen von 40 m angesetzt wurde, weisen die höchsten Konzentrationen auf (Abbildung 3-46, oben). Diese Maxima liegen insbesondere im Bereich der Großfeuerungsanlagen Boxberg in der Oberlausitz und Lippendorf südlich von Leipzig. Wird den Industriequellen eine Höhe von 80 m zugewiesen, so sinken die Maxima deutlich ab (Abbildung 3-46, unten). Die Kenntnis der Emissionshöhen ist demnach insbesondere für die Industriequellen, die neben dem Verkehr zu den größten Emittenten gehören, wichtig. Werden die Industriequellen nicht in der Modellrechnung berücksichtigt, so zeigen sich die Maxima im Bereich der Städte Dresden, Chemnitz und Leipzig, aber auch entlang der A4 (Abbildung 3-47).

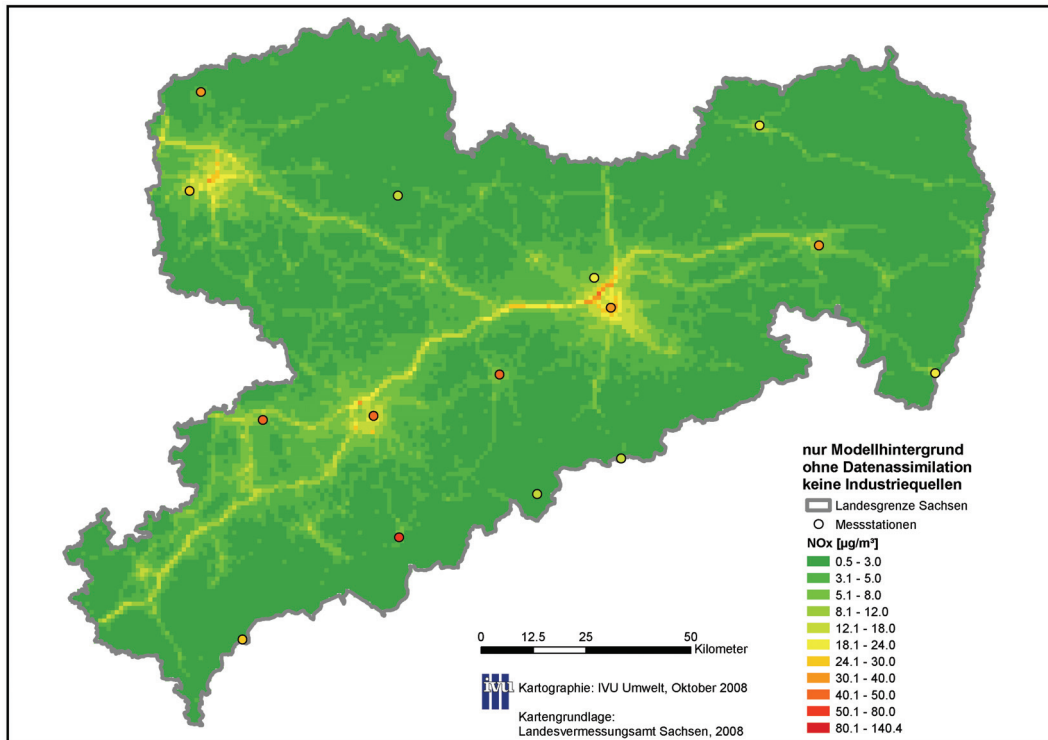
Abseits der Emissionsquellen wurden von LASAT Konzentrationswerte nahe Null ermittelt. Dies ist darin begründet, dass in der Ausbreitungsrechnung nur die Emissionen innerhalb Sachsens berücksichtigt wurden, nicht jedoch diejenigen, die außerhalb Sachsens liegen und als großräumiger Hintergrund in den Messwerten erscheinen.

Tabelle 3-8 enthält die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte der Messwerte und der berechneten Konzentrationsverteilungen für die drei beschriebenen Fälle. Auch hier wird noch einmal in den Minimalwerten das Fehlen des großräumigen Hintergrunds in den Modellergebnissen deutlich. Die Maximalwerte sinken bei Anheben der Emissionshöhe der Industriequellen von 40 m auf 80 m auf ein Drittel und sind damit in der Größenordnung der Modellergebnisse ohne Industriequellen, wobei die räumliche Verortung der Maxima eine andere ist. Der große Einfluss der Emissionshöhe auf die Immissionen wird so noch einmal sichtbar.



**Abbildung 3-46: Verteilung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen 2006 als Ergebnis der LASAT-Rechnung ohne Datenassimilation. Industriequellen mit einer Emissionshöhe von 40 m (oben) und 80 m (unten) berücksichtigt. Messwerte als farbige Kreise dargestellt.**





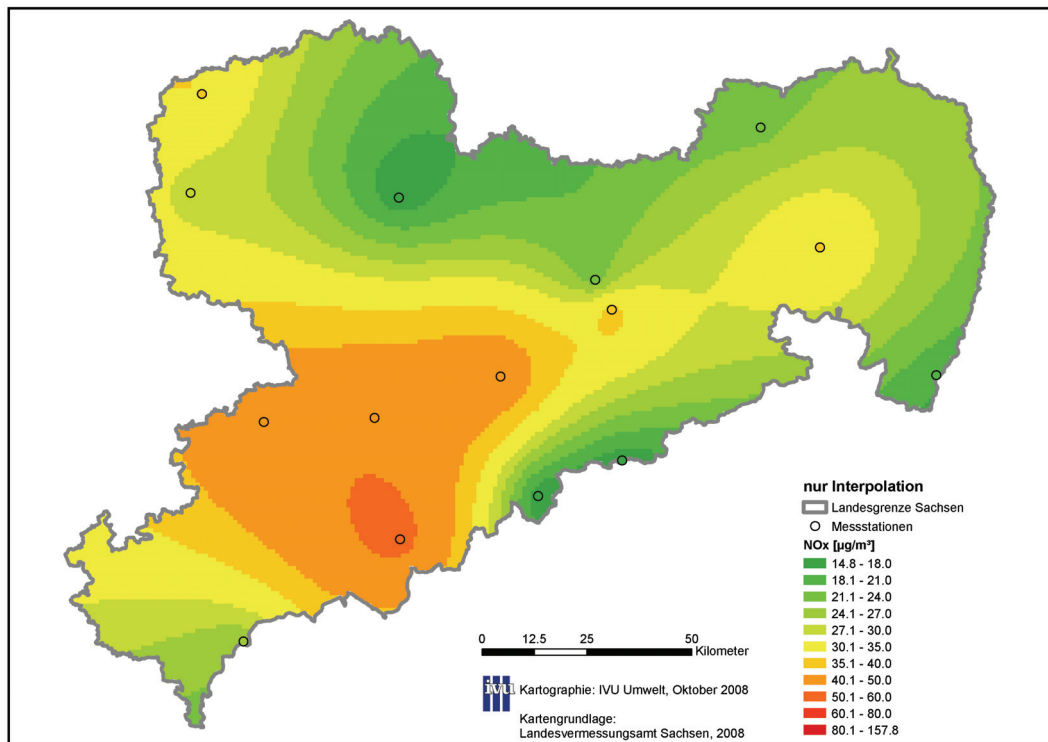
**Abbildung 3-47: Verteilung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen 2006 als Ergebnis der LASAT-Rechnung ohne Datenassimilation. Industriequellen nicht berücksichtigt. Messwerte als farbige Kreise dargestellt.**

**Tabelle 3-8: Minima, Maxima und Mittelwerte der gemessenen und der mit LASAT modellierten NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in Sachsen.**

	Minimum [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Maximum [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	Mittelwert [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Messwerte	14.8	55.3	31.0
Industriequellen Höhe = 40m	0.7	140.4	4.6
Industriequellen Höhe = 80m	0.7	46.7	4.1
keine Industriequellen	0.5	45.3	3.1

### 3.4.3 Ergebnisse

Abbildung 3-48 zeigt die berechnete Verteilung der NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwerte 2006 in Sachsen bei einer reinen Interpolation der Messwerte mit der Hardy'schen Multiquadriken-Methode. Demnach ergibt sich ein Maximum der Konzentrationen im Bereich der Stationen Chemnitz-Mitte, Glauchau, Annaberg-Buchholz und Freiberg. Höhere Werte zeigen sich auch entlang der Bundesautobahn A4 Richtung Dresden und Bautzen sowie im Bereich der Station Delitzsch.

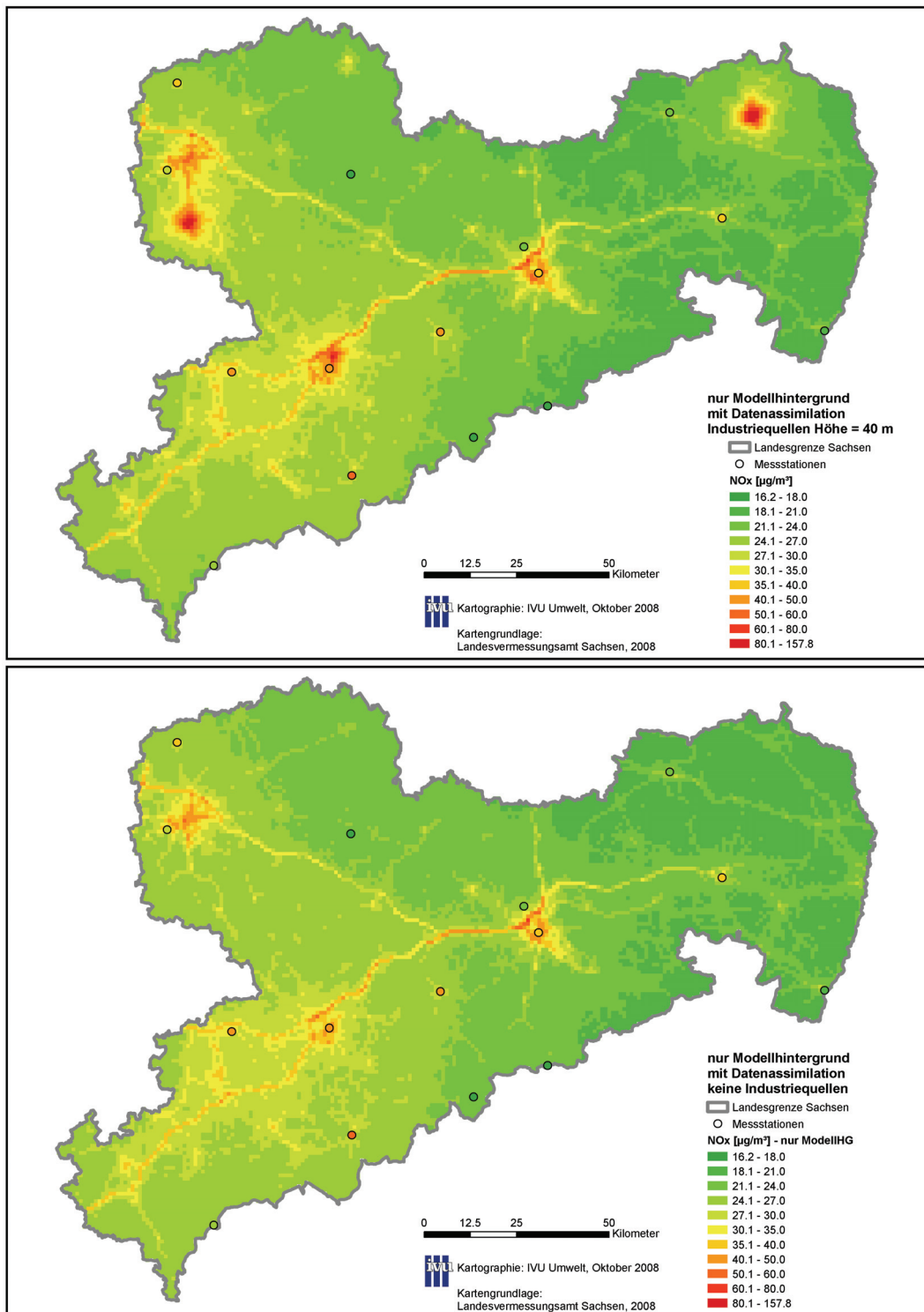


**Abbildung 3-48: Verteilung der NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwerte 2006 in Sachsen bei reiner Interpolation der Messwerte. Messwerte als farbige Kreise dargestellt.**

Für die Kopplung der interpolierten Messwerte mit den Ergebnissen der LASAT-Ausbreitungsrechnung wurden die LASAT-Ergebnisse in FLADIS einer Datenassimilation unterzogen. Wie in Kapitel 3.4.2.2 beschrieben (Abbildung 3-46 und Abbildung 3-47), weichen die LASAT-Ergebnisse insbesondere abseits der berücksichtigten Emissionsquellen deutlich von den Messwerten ab, weil in den Messwerten im Gegensatz zu den LASAT-Rechnungen der aus den Emissionsquellen außerhalb Sachsens resultierende großräumige Hintergrund enthalten ist. Durch die Datenassimilation werden die Modellergebnisse einer Biaskorrektur bezüglich des großräumigen Hintergrunds unterzogen und im Bereich der Messstationen gegen die Messwerte gezogen. Es findet somit eine Kalibrierung der Modellergebnisse mit den Messwerten statt. Für die Datenassimilation wurde die in FLADIS implementierte Optimale Interpolation (OI) in der Modifikation nach FLEMMING, J. (2003) verwendet.

Abbildung 3-49 zeigt die Ergebnisse der LASAT-Ausbreitungsrechnungen nach Datenassimilation in FLADIS mit und ohne Industriequellen. Die Minimal-, Maximal- und Mittelwerte sind in Tabelle 3-9 am Ende dieses Kapitels aufgeführt. Durch die Datenassimilation wurden die Modellergebnisse insgesamt angehoben. Die den LASAT-Rechnungen zu Grunde gelegte Emissionsstruktur bleibt in beiden Fällen gut zu erkennen. Auffällig ist der Unterschied zu den Ergebnissen der reinen Interpolation (Abbildung 3-48) insbesondere im Bereich der Stationen Chemnitz-Mitte, Glauchau, Annaberg-Buchholz und Freiberg sowie der Stationen Delitzsch und Bautzen. Hier weisen die assimilierten Modellergebnisse abseits der Stationen z. T. deutlich niedrigere Konzentrationswerte auf als das reine Interpolationsergebnis, wobei das Modell die höheren Werte der Interpolation in der Nähe von Emissionsquellen (z. B. A 4, A 72) durchaus erreicht. Ein möglicher Grund dafür ist, dass die verwendeten städtischen Hintergrundstationen eine lokale Situation messen, deren räumliche Repräsentativität durch das Interpolationsverfahren, dessen räumliche Skala durch den Abstand der Messstationen zueinander bestimmt wird, überschätzt wird.

Die in Abbildung 3-49 dargestellten Konzentrationsverteilungen bilden nun den Modellhintergrund für die Kopplung mit den interpolierten Messwerten in FLADIS.

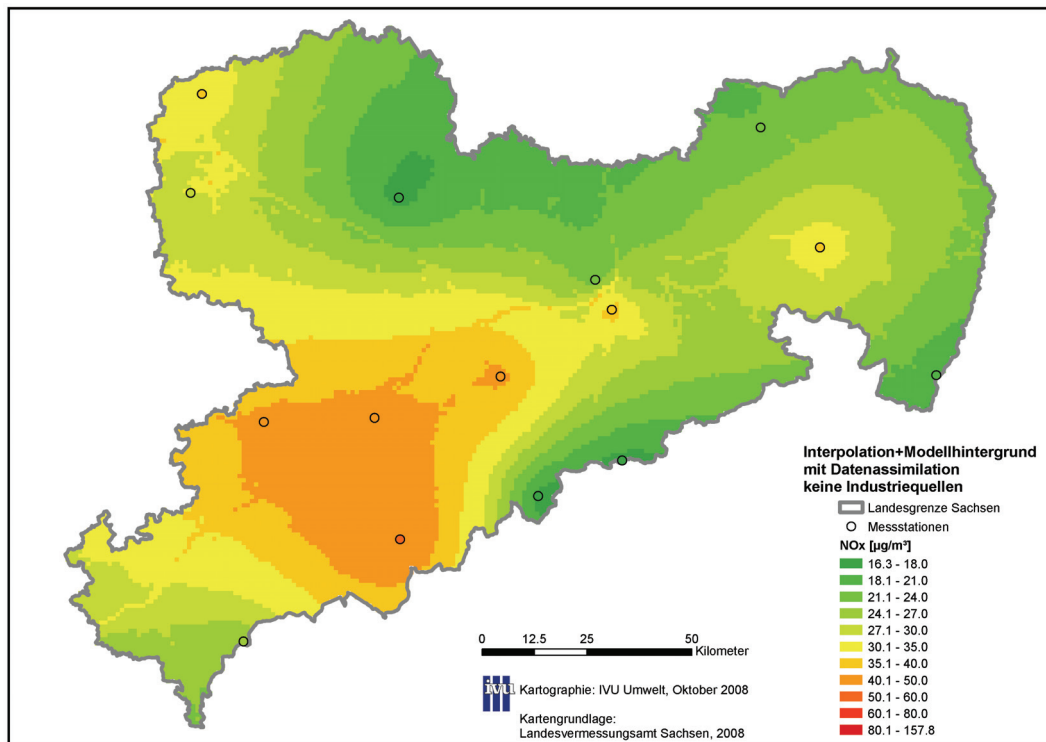


**Abbildung 3-49: Verteilung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen 2006 als Ergebnis der LASAT-Rechnung nach Datenassimilation in FLADIS. Industriequellen mit Emissionshöhe 40 m berücksichtigt (oben) bzw. nicht berücksichtigt (unten). Messwerte als farbige Kreise dargestellt.**

Abbildung 3-50 zeigt die Ergebnisse der Kopplung der Messwerte mit dem in Abbildung 3-49 dargestellten Modellhintergrund am Beispiel der Modellrechnung ohne Industriequellen. Die Modellergebnisse haben im Mittel einen Anteil von rund 27 % an der Darstellung. Die grundsätzliche Verteilung der NO<sub>x</sub>-Konzentration entspricht der in Abbildung 3-48, wobei die Konzentrationswerte durch die Kopplung mit den Modellergebnissen in einigen Bereichen reduziert, in anderen Bereichen angehoben wurden. Der Einfluss der Emissionsstruktur ist trotz des relativ geringen Modellanteils gut zu erkennen, vor allem entlang der Autobahnen A4 zwischen Bautzen und Glauchau und A72 von Chemnitz Richtung Hof sowie auch im Bereich der Stadt Leipzig. Die in Tabelle 3-9 aufgeführten statistischen Eckdaten der Messwerte werden von der Kopplung "Interpolation + Modellhintergrund" gut erreicht, wobei das modellierte Maximum bei Berücksichtigung der Industriequellen höher und ohne Industriequellen niedriger liegt als das der Messwerte.

Die Dominanz der städtischen Hintergrundstationen konnte durch die Kopplung mit dem Modellhintergrund im Bereich der Stationen Delitzsch, Bautzen, Freiberg und Annaberg-Buchholz gesenkt werden, wobei der Modellanteil von 27 % und dementsprechend der Einfluss auf das Kopplungsergebnis relativ gering ist. Es verbleiben daher im Dreieck der Stationen Chemnitz-Mitte, Glauchau und Annaberg-Buchholz verhältnismäßig hohe Konzentrationswerte, die emissionsseitig (Abbildung 3-44 und Abbildung 3-45) nicht erklärt werden.

Im nächsten Zwischenbericht soll daher für die flächenhafte Darstellung der Konzentrationsverteilung ein Ansatz untersucht werden, in dem versucht wird, die räumliche Repräsentativität der städtischen Hintergrundstationen zu erhöhen. Dazu sollen im ersten Schritt die Messwerte für jeden Zeitschritt der Modellrechnung um die durch LASAT an den Stationsorten ermittelte Zusatzbelastung bereinigt werden. Die anschließende Interpolation der bereinigten Messwerte ergibt ebenfalls für jeden Zeitschritt eine Abschätzung des großräumigen Hintergrunds in Sachsen, der im letzten Schritt mit den Ergebnissen der LASAT-Rechnung kombiniert wird, um die aus Hintergrund und berücksichtigten Emissionen resultierende Gesamtbelastung zu erhalten. Auf diese Weise wird zum einen die Interpolation durchgeführt mit Daten, deren Repräsentativität der räumlichen Skala des Interpolationsverfahrens angepasst ist, und zum anderen ergibt sich eine flächenhafte Darstellung mit verbesserter räumlicher Auflösung, die nicht mehr durch die Interpolationsstruktur der städtischen Hintergrundstationen dominiert wird.



**Abbildung 3-50: Verteilung der NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwerte 2006 in Sachsen bei Interpolation der Messwerte und Kopplung mit LASAT-Modellhintergrund ohne Industriequellen. Messwerte als farbige Kreise dargestellt.**

**Tabelle 3-9: Minima, Maxima und Mittelwerte der gemessenen und der mit FLADIS berechneten NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in Sachsen.**

	Minimum [µg/m <sup>3</sup> ]	Maximum [µg/m <sup>3</sup> ]	Mittelwert [µg/m <sup>3</sup> ]
Messwerte	14.8	55.3	31.0
nur Interpolation	14.8	54.0	30.8
nur Modellhintergrund, Industriequellen Höhe = 40 m	19.0	157.8	24.7
nur Modellhintergrund, keine Industriequellen	19.9	64.0	24.5
Interpolation + Modellhintergrund, Industriequellen Höhe = 40 m	16.2	63.8	28.9
Interpolation + Modellhintergrund, keine Industriequellen	16.3	48.6	28.7

### 3.4.4 Auswertung

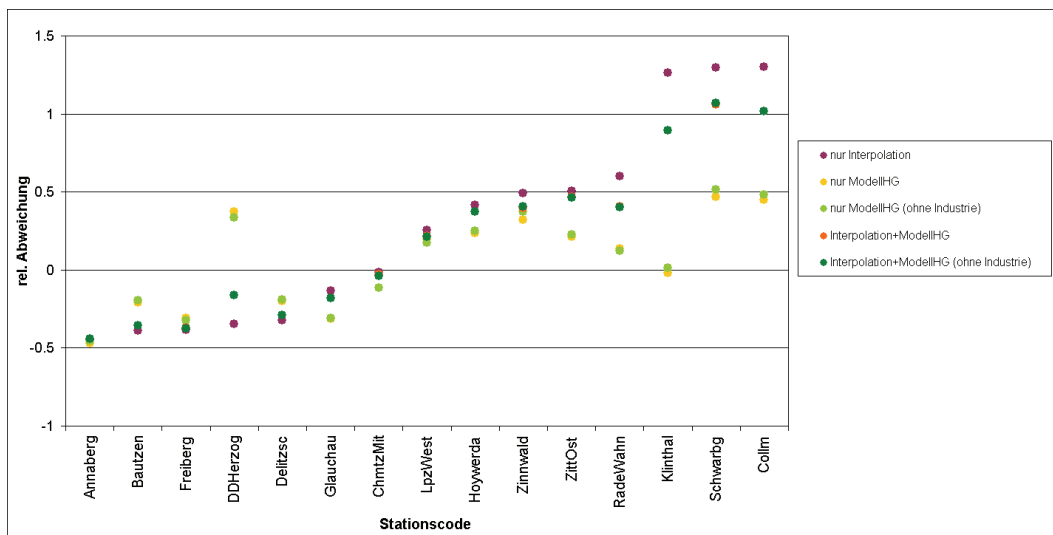
Um Aussagen über den Einfluss einzelner Stationen auf die flächenhafte Darstellung, aber auch über die Güte der berechneten räumlichen Konzentrationsverteilung machen zu können, wurde für jeden der berechneten Fälle eine Kreuzvalidierung durchgeführt. Das in FLADIS für die Kreuzvalidierung implementierte "leave-one-out"-Verfahren beruht darauf, dass die Modellrechnung (z. B. reine Interpolation oder Interpolation mit Modellhintergrund) für jeden Zeitschritt so oft durchgeführt wird, wie Messstationen vorhanden sind, und bei jedem Rechenlauf wird eine der Stationen ausgelassen. Aus der Differenz zwischen dem Wert, den das Modell an der Stelle der ausgelassenen Station errechnet, und dem Messwert der ausgelassenen Station wird über alle Zeitschritte die mittlere relative Abweichung und die Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (root mean square error) berechnet.

Abbildung 3-51 zeigt als Ergebnis der Kreuzvalidierung für die Modellrechnungen die mittlere relative Abweichung an jeder Station für das Jahr 2006, aufsteigend sortiert für die Werte der reinen Interpolation. Demnach zeigen bei reiner Interpolation der Messwerte insbesondere Stationsorte am Rand von Sachsen (z. B. Klingenthal, Schwarzenberg) oder aber Stationsorte, an denen sich die Messwerte deutlich von den umliegenden Stationen abheben (z. B. Collmberg, Radebeul-Wahnsdorf), größere relative Abweichungen, wenn der entsprechende Messwert nicht in der Rechnung berücksichtigt wird.

Die Sensitivität in den Randbereichen ist darin begründet, dass eine Interpolation von Messdaten streng genommen nur innerhalb der konvexen Hülle der zur Verfügung stehenden Messdaten möglich ist. Außerhalb dieser konvexen Hülle werden Daten extrapoliert. Das Extrapolationsverhalten ist stark davon abhängig, welche Daten dabei verwendet werden. Stationsorte in den Randbereichen fallen häufig in den extrapolierten Bereich, wenn der zugehörige Messwert in der Kreuzvalidierung ausgelassen wird, und weisen dann schnell größere Abweichungen auf. Dies zeigt zum einen die Relevanz dieser Stationen. Zum anderen empfiehlt es sich aber, Messwerte von Stationen in direkter Nachbarschaft außerhalb Sachsens in die Berechnungen einzubeziehen, um in den Randbereichen des Untersuchungsgebiets verlässliche Ergebnisse zu erzielen. Dieses Vorgehen wurde z. B. auch in IVU UMWELT (2006b) angewendet.

In Abbildung 3-51 ebenfalls dargestellt ist die mittlere relative Abweichung an den Stationsorten für den Modellhintergrund, d. h. das Ergebnis der LASAT-Ausbreitungsrechnung nach Datenassimilation. Diese Werte sind unabhängig von der Kreuzvalidierung, da die Messwerte durch die Assimilation bereits im Modellhintergrund integriert sind. Insbesondere größere relative Abweichungen der reinen Interpolation werden daher reduziert.

Die mittleren relativen Abweichungen der Kopplung aus Interpolationsergebnis und Modellhintergrund liegen erwartungsgemäß zwischen denen der reinen Interpolation und denen des Modellhintergrunds.



**Abbildung 3-51: Kreuzvalidierung, Jahresmittel 2006. Mittlere relative Abweichung an den einzelnen Stationsorten bei reiner Interpolation, bei reinem Modellhintergrund nach Datenassimilation sowie bei Interpolation mit LASAT-Modellhintergrund, aufsteigend für reine Interpolation sortiert.**

In Tabelle 3-10 sind der zugehörige root mean square error sowie der Mittelwert der mittleren relativen Abweichung über alle Stationen aufgelistet. Die Werte sind am höchsten für die reine Interpolation und erfahren durch die Kopplung mit dem Modellhintergrund eine Minderung, sind aber insgesamt als relativ hoch einzustufen, was darauf hindeutet, dass die betrachteten Stationen des Messnetzes eine verhältnismäßig hohe Relevanz bezüglich der flächenhaften Darstellung haben. Mögliche Ursachen für die Höhe der Kenngrößen können neben dem oben beschriebenen Problem der Extrapolation die Unkenntnis der Höhe der Emissionsquellen, insbesondere der Industrie, sowie fehlende Daten zum großräumigen Hintergrund sein.

**Tabelle 3-10: Root mean square error und mittlere relative Abweichung der Kreuzvalidierung für die FLADIS-Ergebnisse.**

Verfahren	root mean square error [µg/m <sup>3</sup> ]	mittlere relative Abweichung [%]
nur Interpolation	15.6	54.4
nur Modellhintergrund, Industriequellen Höhe = 40 m	10.3	26.3
nur Modellhintergrund, keine Industriequellen	10.2	27.2
Interpolation + Modellhintergrund, Industriequellen Höhe = 40 m	13.0	44.4
Interpolation + Modellhintergrund, keine Industriequellen	13.0	44.5

Um das Luftmessnetz des Freistaats Sachsen auf redundante bzw. für eine flächenhafte Aussage wichtige Messstandorte zu untersuchen, werden zunächst die Redundanzen untersucht. Welche Stationen redundant sind, hängt dabei von der Zielsetzung der Station und dem formulierten Qualitätsziel ab. Beispielsweise sind verkehrsnahen Messstationen für flächenhafte Aussagen im Maßstab des Bundeslandes Sachsen redundant, da sie nur für ein sehr begrenztes Gebiet repräsentativ sind. Im lokalen Maßstab sind sie jedoch wichtig, um kleinräumige Belastungsspitzen zu erfassen.

Im Folgenden wird untersucht, welche der betrachteten Stationen des Messnetzes Sachsen in der Kreuzvalidierung mittlere relative Abweichungen < 20 % bzw. < 30 % aufweisen. Dies wird als Qualitätsziel definiert und bedeutet, dass das Ergebnis einer Modellrechnung am Stationsort auch ohne zugehörigen Messwert nicht mehr als 20 % bzw. 30 % von diesem Messwert abweichen würde, wenn er denn gemessen worden wäre. Tabelle 3-11 zeigt für die reine Interpolation und für die Interpolation mit Modellhintergrund, welche Stationen dieses Kriterium erfüllen.

Wird die Lage der in Tabelle 3-11 aufgeführten Stationen zueinander und in Bezug zu den mit FLADIS berechneten Konzentrationsverteilungen (Abbildung 3-48, Abbildung 3-50) betrachtet, so lässt sich schließen, dass jeweils eine Station der Paare Chemnitz-Mitte – Glauchau und (bei Verwendung des Qualitätsziels "< 30 %") Leipzig-West – Delitzsch sowie die Station Dresden-HerzoginGarten in der Nähe der Station Radebeul-Wahnsdorf redundant für die Bildung flächenhafter Aussagen sind. Die Relevanz dieser Stationen bezüglich ihrer Aufgabe als städtische Hintergrundstationen bleibt von dieser Aussage unberührt und wird an dieser Stelle nicht bewertet.

**Tabelle 3-11: Stationen, die bei Kreuzvalidierung für 2006 eine mittlere relative Abweichung < 20 % bzw. < 30 % bezogen auf die Messwerte aufweisen.**

Verfahren	Stationen mit  relative Abweichung <20 %	Stationen mit  relative Abweichung <30 %
nur Interpolation	Chemnitz-Mitte Glauchau	Chemnitz-Mitte Glauchau Leipzig-West
Interpolation + Modellhintergrund, Industriequellen Höhe = 40 m	Chemnitz-Mitte Glauchau Dresden-HerzoginGarten	Chemnitz-Mitte Glauchau Dresden-HerzoginGarten Leipzig-West Delitzsch
Interpolation + Modellhintergrund, keine Industriequellen	Chemnitz-Mitte Glauchau Dresden-HerzoginGarten	Chemnitz-Mitte Glauchau Dresden-HerzoginGarten Leipzig-West Delitzsch

Die Kreuzvalidierung bewertet nur Standorte, die bereits vorhanden sind. Für die Definition neuer, für flächenhafte Aussagen wichtiger Standorte müssen zusätzliche Informationen, wie sie in die Ergebnisse einer Ausbreitungsrechnung integriert sind, herangezogen werden. Im vorliegenden Fall werden dazu am Beispiel der Modellrechnungen ohne Industriequellen die Ergebnisse der Kopplung von Interpolationsergebnis und Modellhintergrund aus Kapitel 3.4.3 im Vergleich mit den Ergebnissen der reinen Interpolation und dem Modellhintergrund betrachtet (Abbildung 3-52).

Mögliche Positionen für neue Messstandorte ergeben sich überall dort, wo die Ergebnisse der reinen Interpolation durch Kopplung mit dem Modellhintergrund eine wesentliche Änderung erfahren, sich also in letzter Instanz wesentlich vom Modellhintergrund unterscheiden, z. B. im Bereich der A 4 zwischen Dresden und Bautzen. Der dominierende Unterschied liegt allerdings, wie bereits in Kapitel 3.4.3 diskutiert, im Dreieck der Stationen Chemnitz-Mitte, Glauchau und Annaberg-Buchholz, in dem das Ergebnis der reinen Interpolation deutlich höher liegt als die Werte des Modellhintergrunds. Da die hohen Werte der reinen Interpolation nicht durch die vorhandenen Emissionsdaten erklärt werden, ist davon auszugehen, dass die räumliche Repräsentativität der drei Stationen durch das Interpolationsverfahren überschätzt wird. Für die Abklärung dieser Frage empfiehlt sich ein geeigneter Messstandort im Gebiet zwischen den drei Stationen.

Abbildung 3-52 zeigt die Ergebnisse von Modellrechnungen ohne Industriequellen. Eine Aussage zu Messstandorten im Bereich von Industriequellen lässt sich erst dann sinnvoll treffen, wenn, wie im nächsten Zwischenbericht geplant, die Emissionshöhen der Großfeuerungsanlagen berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer möglichst vollständigen Darstellung der Konzentrationsverteilung im gesamten Freistaat Sachsen und in Abhängigkeit von bereits vorhandenen Stationen in direkter Nachbarschaft außerhalb Sachsens wären auch weitere Stationen im nördlichen und östlichen Randbereich des Bundeslandes interessant.



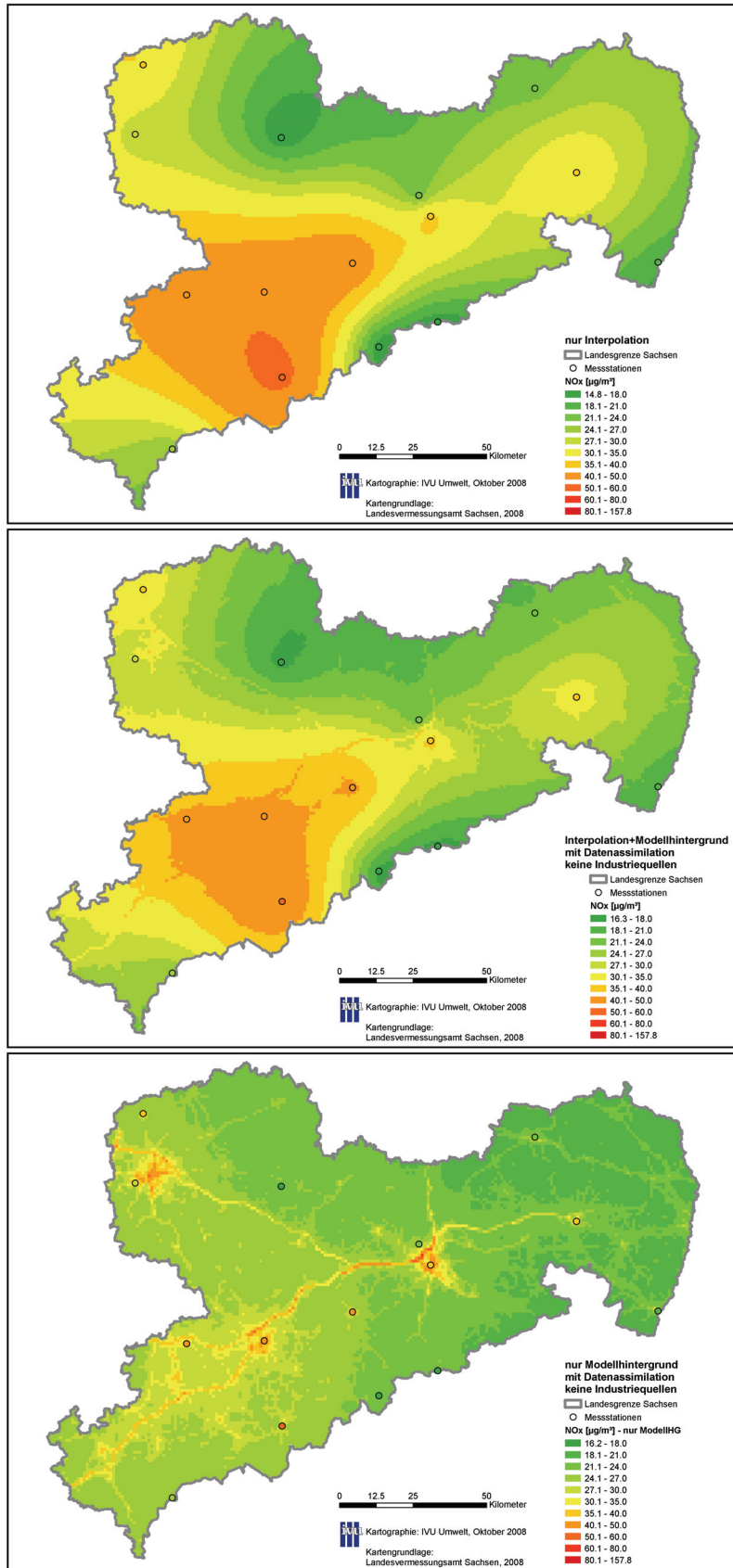


Abbildung 3-52: Verteilung der NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwerte 2006 in Sachsen. Oben: Reine Interpolation. Mitte: Kopplung von reiner Interpolation und Modellhintergrund. Unten: Modellhintergrund (LASAT-Rechnung nach Datenassimilation). Messwerte als farbige Kreise dargestellt.

#### 4 Ermittlung der wesentlichen Verursacher für die NO<sub>2</sub>-Belastung in Sachsen

##### 4.1 Überprüfung der in den Luftreinhalteplänen getroffenen Aussagen

Es liegen folgende Luftreinhaltepläne für das Land Sachsen vor (Stand 31.07.2008):

- LfUG Sachsen 2005: Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. 2005.
- RP Chemnitz 2008: Luftreinhalteplan für die Stadt Chemnitz. Regierungspräsidium Chemnitz. 2008.
- RP Dresden 2008: Luftreinhalte- und Aktionsplan für die Stadt Dresden. Regierungspräsidium Dresden. 2008.
- RP Dresden 2008: Luftreinhalteplan für die Stadt Görlitz. Regierungspräsidium Dresden. 2008.

Tabelle 4-1 zeigt die bis zum 31.07.2008 vorgelegten sächsischen Luftreinhaltepläne im Überblick.

**Tabelle 4-1: Luftreinhaltepläne in Sachsen**

Gebiet	Überschreitung NO <sub>2</sub>	Typ	Stand	
Chemnitz	ja	LRP	Endfassung	Juni 2008
Dresden	ja	LRP/AP	Endfassung	Mai 2008
Görlitz	nein	LRP	Endfassung	April 2008
Leipzig	ja	LRP	Endfassung	15.09.2005

In drei der vier vorliegenden Luftreinhaltepläne wurden Daten zur verursacherbezogenen Quellanalyse bezogen auf den Schadstoff NO<sub>2</sub> vorgelegt. Obwohl Görlitz keine NO<sub>2</sub>-Überschreitung zu verzeichnen hat, wurden Daten zur verursacherbezogene Quellanalyse für NO<sub>x</sub> genannt. Tabelle 4-2 führt die in den Luftreinhalteplänen getroffenen Aussagen zur Verursacheranalyse auf. Zu beachten ist, dass sich die Daten auf verschiedene Bezugsjahre beziehen.

Bei der verursacherbezogenen Quellanalyse wurden folgende Abkürzungen verwendet: Ferntransport (FT), Kfz-Verkehr (Kfz), Industrie - Gewerbe - Großfeuerungsanlagen (Ind), Verkehr Sonstige (VS - Flugverkehr, Schifffahrt, Schienenverkehr), Hausbrand (Haus), Kleinverbraucher (Klein), Landwirtschaft (Land) und Summe (Sum).

**Tabelle 4-2: Verursacherbezogene Quellanalyse für NO<sub>x</sub> bzw. NO<sub>2</sub>**

Messstation	BJ	FT in %	Kfz in %	Ind in %	VS in %	Haus in %	Klein in %	Land in %	Sum in %	Seite
Chemnitz - Leipziger Str.	2004 / 2005	11	81	4	1	2	0.8	0.1	99.9	47
Dresden - Bergstr.	2004	12	74	7	3	4			100	46
Görlitz - Zeppelinstr.	2004 / 2005	21	31	23	19	5		1	100	40
Leipzig - Mitte	1999 bis 2004	21*	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	-	35

BJ: Bezugsjahr  
 FT: Ferntransport; Kfz: Kfz-Verkehr; Ind: Industrie, Gewerbe und Großfeuerungsanlagen; VS: Verkehr Sonstige (Flugverkehr, Schifffahrt, Schienenverkehr); Haus: Hausbrand; Klein: Kleinverbraucher; Land: Landwirtschaft; Sum: Summe  
 \*Mittel 1999 – 2004

In allen Plänen, zu denen eine Quellanalyse vorliegt, wird der Kfz-Verkehr als Hauptverursacher benannt. Die höchsten Werte bei der Belastung durch den Kfz-Verkehr finden sich in Chemnitz mit einem Anteil von 81 %. Die zwei Pläne mit NO<sub>2</sub>-Überschreitungen, zu denen eine Quellanalyse vorliegt, nennen Anteile des Kfz-Verkehrs von mindestens 70 %. In Görlitz, wo keine NO<sub>2</sub>-Überschreitung verzeichnet wurde, addieren sich die Immissionen des Gesamtverkehrs (Kfz + Sonstiger Verkehr) zu einem Anteil von 50 %.

Auffällig ist in Görlitz der hohe Anteil von Industrie, Gewerbe und Großfeuerungsanlagen, der 23 % ausmacht. Die Industriequellen zeigen in den zwei Plänen mit NO<sub>2</sub>-Überschreitungen, zu denen eine Quellanalyse vorliegt, einen Anteil von unter 10 %.

Der Anteil des Ferntransports wird in den zwei Plänen mit NO<sub>2</sub>-Überschreitungen, zu denen eine Quellanalyse vorliegt, mit ca. 10 % aufgeführt. Das Maximum des Ferntransports findet sich mit einem Anteil von 21 % in Görlitz, wo keine NO<sub>2</sub>-Überschreitung verzeichnet wurde. Für Leipzig wird 21 % als Mittelwert des Ferntransports über die Jahre 1999 bis 2004 genannt.

Soweit in der Verursacheranalyse der vorliegenden Luftreinhaltepläne der Romberg-Ansatz zur Ableitung des NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwertes aus modellierten NO<sub>x</sub>-Konzentrationen angewendet wurde, kann nach den Auswertungen in Kapitel 3.2.4 abgeleitet werden, dass dieses Verfahren für die in den Luftreinhalteplänen verwendeten Bezugsjahre bis 2005 nicht zu einer Fehlinterpretation führt, da es bezogen auf Verkehrsmessstellen in Sachsen einen eher konservativen Ansatz darstellt.

## 4.2 Vertiefende Analyse der Kraftfahrzeugtechnik und Abgasminderungstechnologien

### 4.2.1 Modellierung der Emissionsfaktoren für NO<sub>x</sub>

#### 4.2.1.1 Vorbemerkungen

Grundlage der Emissionsberechnungen für das Vorhaben ist das „Handbuch für Emissionsfaktoren“ des Umweltbundesamtes in seiner neuesten Fassung (INFRAS (2004)), im Folgenden verkürzt als „Handbuch“ bezeichnet. Das Handbuch enthält Emissionsstufen bis EURO 4 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNfz) und bis EURO V für schwere Nutzfahrzeuge (SNfz). Schwere Nutzfahrzeuge sind Lastkraftwagen und Busse. EURO 4 für Pkw und LNfz wurde ab 2005/2006 verbindlich, EURO IV für SNfz ab 2005, EURO V für SNfz ab 2008. Das bedeutet, dass die im Handbuch enthaltenen Emissionsfaktoren für diese Emissionsstufen nicht auf Messungen

beruhen, wie dies für frühere Emissionsstufen der Fall ist, sondern auf Abschätzungen auf Grundlage der Grenzwertabsenkungen.

Es muss noch erwähnt werden, dass zur Zeit intensiv an einer Neuauflage des Handbuchs gearbeitet wird (Version 3), mit deren Erscheinen im Frühjahr 2009 zu rechnen ist. Der TÜV Nord ist in diese Arbeiten eingebunden. Es wird empfohlen, für die künftigen Arbeitsschritte des Vorhabens (1. Hälfte 2009 und 2010) das neue Handbuch als Basis zu verwenden.

#### **4.2.1.2 Modifizierungen für Pkw**

Die Grenzwertabsenkungen für NO<sub>x</sub> von EURO 3 zu EURO 4 betragen bei Pkw 46,7% bei Benzinmotoren und 50% bei Dieselmotoren. Bei Benzin-Fahrzeugen wurde im Handbuch angenommen, dass diese Minderung auch in der Praxis erreicht wird. Die Emissionsfaktoren für EURO 4 sind also um 46,7% geringer als die für EURO 3. Bei Diesel-Fahrzeugen wurde die Minderung für die Emissionsfaktoren auf 33% statt 50% abgeschätzt, das entspricht einem Verschlechterungsfaktor von 0,66.

In der Zwischenzeit liegen eine Reihe von Messungen an EURO 4 Pkw vor. Das umfangreichste Material stammt von der EMPA in der Schweiz und wurde deshalb auch als Grundlage für die Validierung derzeit verwendeter Modelle zur Berechnung von Emissionsfaktoren herangezogen. Es umfasst 20 Pkw mit Benzin-Motor und 10 Pkw mit Dieselmotor. Neben dem wenig praxisgerechten Typprüfzyklus wurden weitere 16 Zyklen gemessen, allesamt abgeleitet aus Messungen im realen Verkehr, darunter einige Handbuch Zyklen der Schweizer Version. Die Ergebnisse liegen sämtlich als modale Daten mit sekundlicher Auflösung vor. Bei der Validierung zeigte das TÜV-Rheinland-Modell die beste Korrelation.

Bei diesem Modell werden Geschwindigkeiten ( $v$ ) und das Produkt aus Geschwindigkeit und Beschleunigung ( $v \cdot a$ ), das ein Maß für die spezifische Beschleunigungsleistung darstellt, klassiert. Jeder sekundliche Datensatz wird dann einer entsprechenden Zelle der so definierten Matrix aus  $v$  und  $v \cdot a$  zugeordnet. Aus den zugehörigen Emissionswerten wird dann der Mittelwert als repräsentativ angesehen. Die Emissionen für eine beliebigen neuen Zyklus können dann durch entsprechende Klassierung der  $v$  und  $v \cdot a$  Werte und Zuordnung der mittleren Emission durch Summation über alle sekundlichen Werte und Division durch die Wegstrecke des Zyklus berechnet werden.

In dieser Weise wurde für die Zyklen der Deutschen Version des Handbuchs verfahren, wobei die Fahrzeuge in die Handbuch-Segmente:

- Benzin <1,4 l Hubraum,
- Benzin 1,4 bis 2 l Hubraum,
- Benzin >2 l Hubraum,
- Diesel 1,4 bis 2 l Hubraum und
- Diesel >2 l Hubraum

aufgeteilt wurden und die Ergebnisse der Fahrzeuge innerhalb eines Segmentes gemittelt wurden.

Bei den Benzin-Pkw sind die Unterschiede zu den Handbuch-Emissionsfaktoren ohne einheitlichen Trend. Bei Fahrzeugen <1,4 l Hubraum sind die aus den Messungen an 5 Fahrzeugen abgeleiteten Emissionsfaktoren bei Zyklen mit Durchschnittsgeschwindigkeiten bis 70 km/h höher als die Handbuch-Faktoren, bei höheren Geschwindigkeiten ist dies umgekehrt. Bei Benzin-Pkw mit 1,4 bis 2 l Hubraum sind die aus Messungen an 8 Fahrzeugen abgeleiteten Emissionsfaktoren für alle Handbuch-Zyklen höher als die Handbuch-Faktoren, im Schnitt um 145%. Bei den Benzin-Pkw mit Hubräumen >2 l sind die aus Messungen an 6 Fahrzeugen abgeleiteten Emissionsfaktoren für alle

Handbuch-Zyklen bis auf die Stop+Go-Zyklen niedriger als die Handbuch-Faktoren, im Schnitt um 66%. Die Stop+Go-Emissionen sind dagegen erheblich höher als im Handbuch, wobei die Handbuch-Faktoren auch gegen den zu erwartenden Trend unglaublich gering ausfallen (<0,015 g/km).

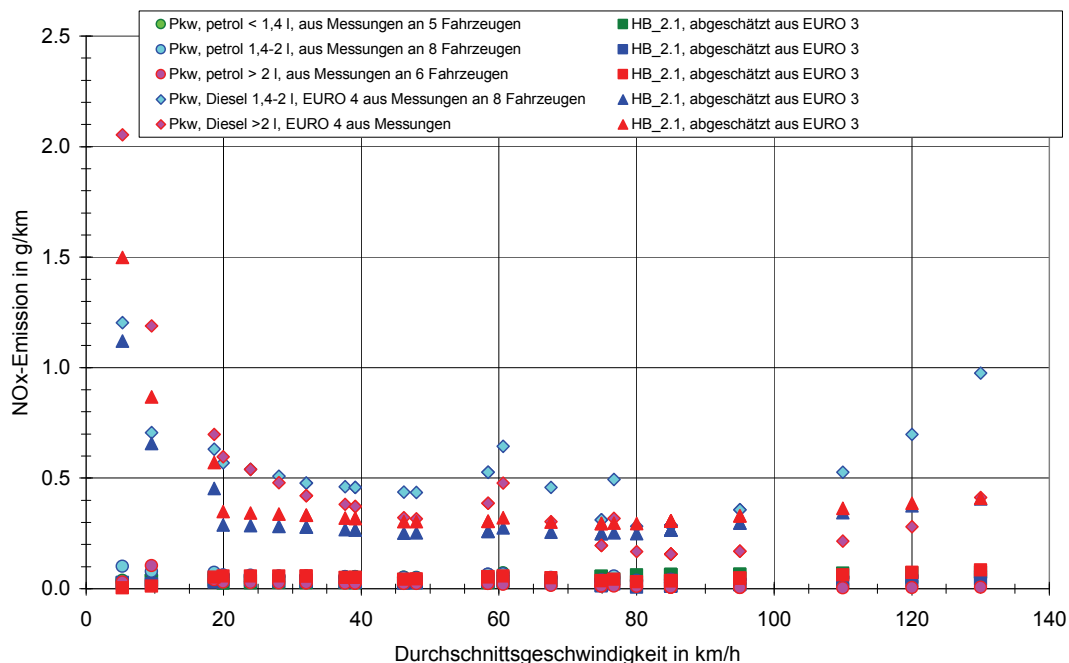
Allerdings bleibt anzumerken, dass die NO<sub>x</sub>-Emissionen der Benzin-Pkw insgesamt auf sehr niedrigem Niveau liegen (siehe Abbildung 4-1). Die Emissionen der Diesel-Pkw sind über alle Zyklen und Fahrzeuge gemittelt über 11mal höher als die der Benzin-Pkw. Bei Fahrzeugen mit 1,4 bis 2 l Hubraum sind die aus Messungen abgeleiteten Emissionsfaktoren sämtlich höher als die Handbuch-Faktoren, im Mittel um knapp 60%. Bei den Diesel-Pkw mit Hubräumen > 2 l sind die aus Messungen abgeleiteten Emissionsfaktoren für die Autobahnzyklen geringer (im Schnitt fast 40%) und für die übrigen Zyklen höher (im Schnitt 27%) als die Handbuch-Faktoren.

Die aus den Messungen abgeleiteten Emissionsfaktoren wurden in eine modifizierte Tabelle für die Basis-Emissionsfaktoren eingegeben und auch als Grundlage für die Abschätzung von EURO 5 und EURO 6 Emissionsfaktoren verwendet. Für diese wurde wie folgt vorgegangen:

Die Grenzwertabsenkungen EURO 5 zu EURO 4 betragen 25% bei Benzin- und 28% bei Diesel-Pkw. Bei einem Verschlechterungsfaktor oder Wirkungsgrad für den praktischen Betrieb von 2/3 gegenüber der Minderung im Typprüfzyklus ergeben sich Minderungen von 17% für Petrol und 19% für Diesel.

Die Grenzwertabsenkungen EURO 6 zu EURO 5 betragen 0% bei Benzin- und 55,6% bei Diesel-Pkw. Bei einem Verschlechterungsfaktor oder Wirkungsgrad für den praktischen Betrieb von 2/3 ergeben sich Minderungen von 0% für Petrol und 37% für Diesel.

Diese Minderungen wurden bei den Handbuch-Zyklen jeweils berücksichtigt.



**Abbildung 4-1: Vergleich Handbuch-Emissionsfaktoren / aus Messungen abgeleitete Faktoren für EURO 4 Pkw**

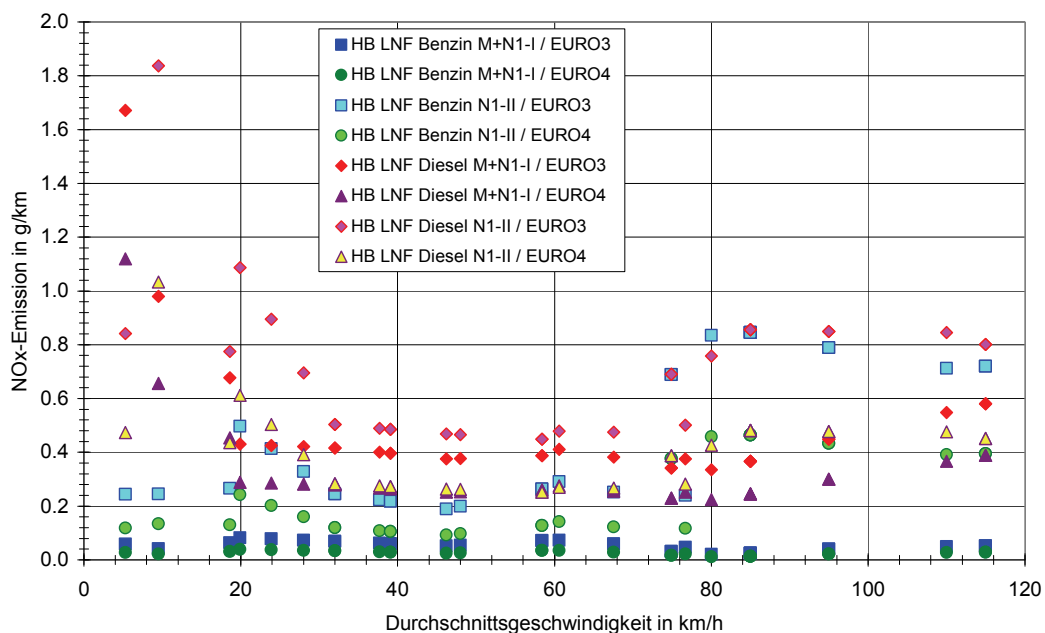
#### 4.2.1.3 Modifizierungen für leichte Nutzfahrzeuge

Für leichte Nutzfahrzeuge liegen leider noch keine aktuellen Messungen von EURO 4 Fahrzeugen vor. Für das neue Handbuch werden allerdings zur Zeit entsprechende Messprogramme durchgeführt, deren Ergebnisse allerdings noch nicht verfügbar sind.

Das Handbuch unterscheidet bei den LNfz 4 Segmente:

- Benzin M+N1-I,
- Benzin N1-II,
- Diesel M+N1-I,
- Diesel N1-II.

Die derzeitigen Handbuch-Emissionsfaktoren sind für EURO 3 und EURO 4 in Abbildung 4-2 dargestellt.



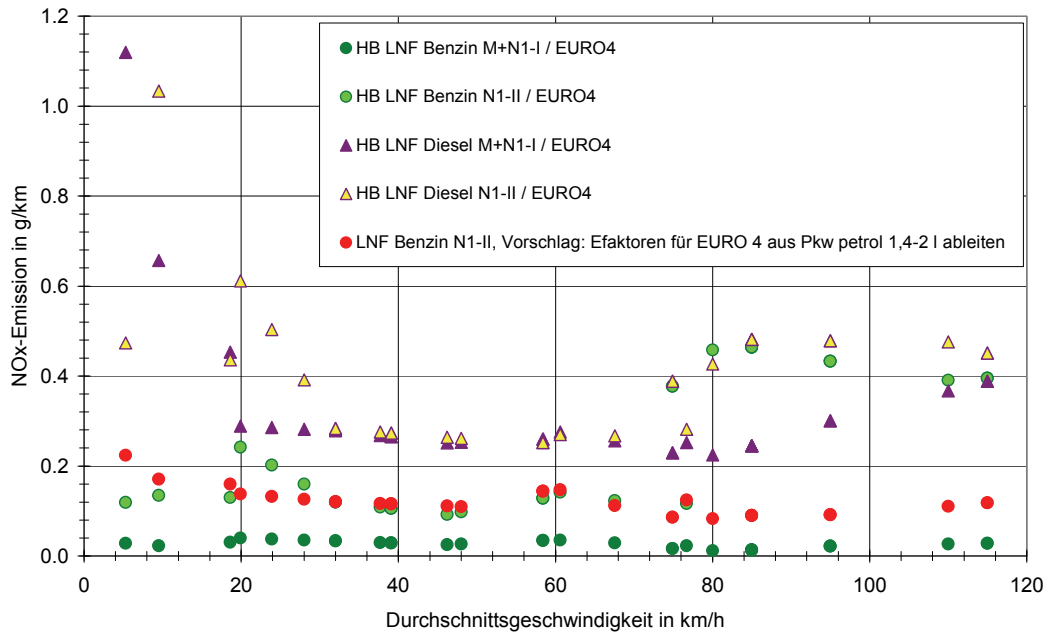
**Abbildung 4-2: Handbuch-Emissionsfaktoren für LNfz EURO 3 und 4**

Die Emissionen des Segments Benzin M+N1-I liegen auf Pkw-Niveau. Dies ist trotz 25% höherem EURO 4 Grenzwert zu erwarten, da in diesen Fahrzeugen dieselben Motoren eingesetzt werden. Deshalb wird vorgeschlagen, für dieses Segment die aus Messungen abgeleiteten EURO 4 Werte für Benzin-Pkw 1,4 bis 2 l Hubraum zu verwenden.

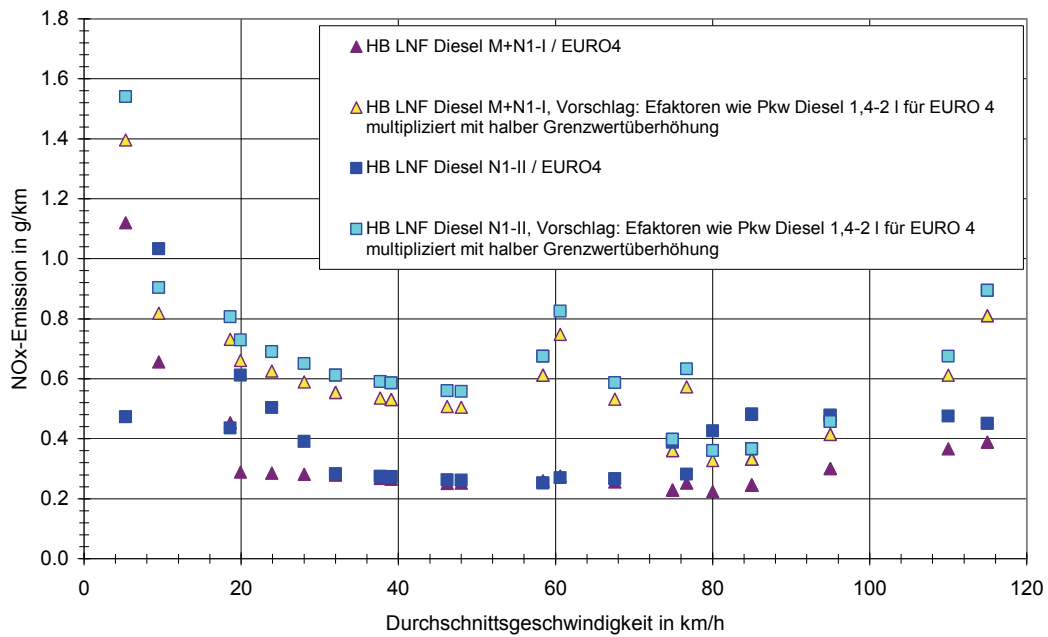
Die Emissionen des Segments Benzin N1-II liegen deutlich über Pkw-Niveau und stimmen erstaunlicherweise für Zyklen mit Durchschnittsgeschwindigkeiten über 80 km/h ganz gut mit den Werten des Segments Diesel N1-II überein. Der EURO 4 Grenzwert des Segments Benzin N1-II liegt mit 0,11 g/km 38% höher als der für Benzin-Pkw. Der Grenzwert für entsprechende Fahrzeuge mit Dieselmotor ist 3,6mal höher.

Es wird vorgeschlagen für das Segment LNfz Benzin N1-II die um den Faktor 2,2 erhöhten Werte für die aus Messungen abgeleiteten Pkw-Werte für 1,4 bis 2 l Hubraum zu verwenden. Diese stimmen bis zu einer Zyklus-Durchschnittsgeschwindigkeit von 80 km/h ganz gut mit den bisherigen Handbuch-Faktoren überein und zeigen oberhalb dieser Geschwindigkeit den zu erwartenden Trend (siehe Abbildung 4-3).

Die Handbuch-Werte für LNfz mit Dieselmotoren sind im Vergleich zu den modifizierten Pkw-Werten zu niedrig. Die LNfz Diesel M+N1-I haben einen um 32% höheren Grenzwert als die entsprechenden Diesel-Pkw. Für LNfz Diesel N1-II liegt der Grenzwert um 56% über dem der Diesel-Pkw. Für beide Segmente wird vorgeschlagen, die aus Messungen abgeleiteten Werte für Diesel Pkw 1,4 bis 2 l Hubraum mit der halben Grenzwertüberhöhung gegenüber den Pkw zu multiplizieren und die Ergebnisse als Emissionsfaktoren zu verwenden. Der Vergleich Handbuch-modifiziert ist in Abbildung 4-4 dargestellt.



**Abbildung 4-3: Emissionsfaktoren für das Segment LNfz N1-II**



**Abbildung 4-4: Emissionsfaktoren für LNfz mit Dieselmotor**

#### 4.2.1.4 Modifizierungen für schwere Nutzfahrzeuge

Die im Handbuch enthaltenen Emissionsfaktoren für schwere Nutzfahrzeuge wurden für EURO 3 Fahrzeuge bereits in einem Forschungsvorhaben der BAST mit Messergebnissen verglichen, die mit mobiler Messtechnik an Lkw im praktischen Betrieb durchgeführt wurden (siehe KLEINEBRAHM, M. & H. STEVEN (2005)). Hierbei wurden 3 Lastzüge der 40 t-Klasse und 1 Verteiler-Lkw (12 t zul. Gesamtmasse) gemessen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Handbuch-Emissionsfaktoren den realen Betrieb hinreichend gut repräsentieren.

Dies gilt auch für EURO 4 Fahrzeuge mit Abgasrückführung und Partikelabscheider, von denen 2 Fahrzeuge im Rahmen eines UBA-Projektes ebenfalls im praktischen Einsatz gemessen wurden (siehe KLEINEBRAHM, M., L-E. SCHULTE, H. STEVEN (2008)), nicht jedoch für Fahrzeuge mit selektiv wirkendem NO<sub>x</sub>-Katalysator (SCR) mit Harnstoffzusatz. Diese zeigten bei hohen Geschwindigkeiten das erwartete und mit den Handbuch-Faktoren übereinstimmende Verhalten, die Emissionsfaktoren lagen jedoch mit abnehmender Geschwindigkeit zunehmend über den EURO V Handbuch-Faktoren, und zwar um bis zum 2,2fachen (siehe Abbildung 4-5).

Nach eigenen Recherchen bei Herstellern und Betreibern kann man davon ausgehen, dass etwa 75% der EURO V SNfz mit SCR-Systemen ausgerüstet sein werden. Daher wurde für die Modellierung der Emissionsfaktoren ein gewichtetes Mittel aus Handbuch-EURO V Werten (Wichtung 25%) und mit den Verschlechterungsfaktoren multiplizierten Werten (Wichtung 75%) herangezogen.

Die so erhaltenen Werte wurden ebenfalls in die modifizierte Basisdatentabelle eingegeben.

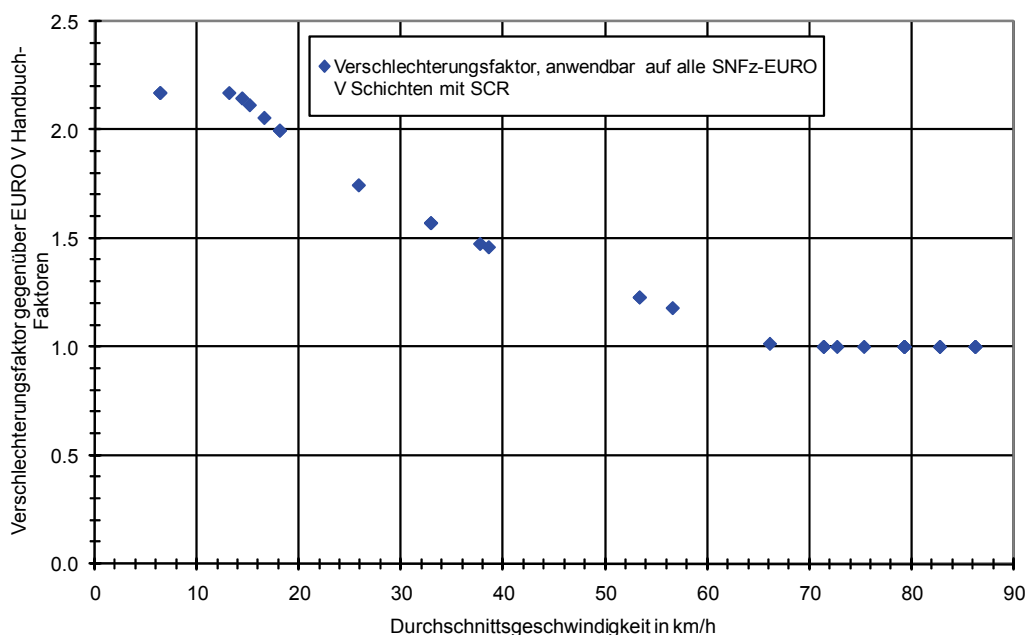


Abbildung 4-5: Verschlechterungsfaktoren für SNfz mit SCR-Systemen

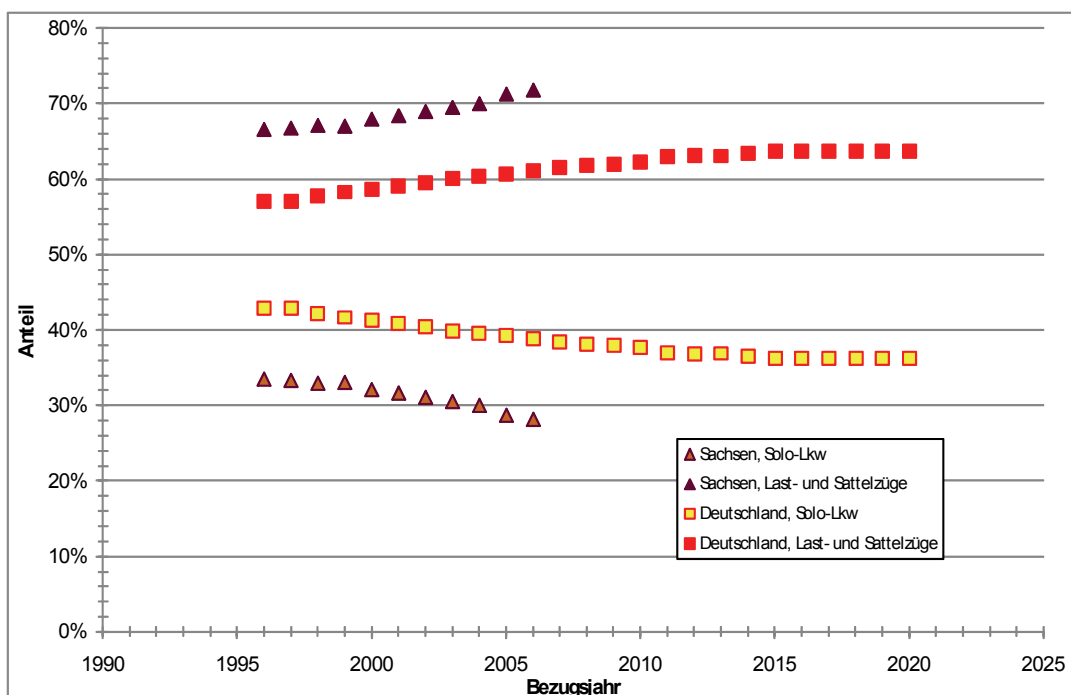
#### 4.2.2 Erstellung einer modifizierten Emissionsdatenbasis für Bezugsjahre zwischen 2008 und 2020

Die in den vorherigen Abschnitten dargestellten Modifikationen betrafen warme Emissionen für Längsneigung 0% und für segmentfeine Emissionsstufen EURO 4 und 5. Für die Emissionsbilanz müssen aber aggregierte Werte für Pkw, LNfz und SNfz unter Berücksichtigung des Flottenmix und



von Kaltstartzuschlägen für unterschiedliche Längsneigungen bestimmt werden. Dazu wurde wie folgt vorgegangen:

Für den Flottenmix wurden die vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Daten gesichtet und analysiert. Für LNfz und SNfz liegen keine verwertbaren statistischen Daten zu Gesamtgewichtsklassen oder Emissionsstufen vor. Lediglich in einer Excel-Datei (Verkehrszahlen\_Sachsen.xls) werden Angaben zu Fahrleistungen von Lkw und Last- und Sattelzügen für Bezugsjahre zwischen 1996 und 2006 gemacht. Diese Werte sind entsprechenden Werten aus Tremod in Abbildung 4-6 gegenübergestellt. Das Land Sachsen hat demnach bei ähnlichem zeitlichen Trend einen um ca. 10% höheren Anteil an Last- und Sattelzügen und einen entsprechend geringeren Anteil an Solo-Lkw als der Bundesdurchschnitt. Dies wurde bei den Fahrleistungsgewichtungen entsprechend berücksichtigt.



**Abbildung 4-6: Vergleich der Fahrleistungsanteile von Solo-Lkw und Last- und Sattelzügen für Sachsen und Deutschland gesamt**

Für Pkw liegen aus KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006A) und KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006B) statistische Angaben des KBA zu den Anteilen von Benzin/Diesel, Emissionsstufen und von Hubraumklassen für Sachsen und das Bundesgebiet insgesamt für das Bezugsjahr 2005 vor. Die Anteile Benzin/Diesel sind in Tabelle 4-3 zusammengestellt. Der Anteil an Diesel-Pkw ist in Sachsen um 7,6% geringer als im Bundesdurchschnitt. Eine entsprechende Statistik für Hubraumklassen ist in Tabelle 4-4 zusammengestellt. Der Anteil kleinerer Fahrzeuge ist in Sachsen deutlich größer als im Bundesdurchschnitt.

**Tabelle 4-3: Anteile Benzin/Diesel bei Pkw für das Bezugsjahr 2005**

Region	Anteil Benzin	Anteil Diesel
RB Chemnitz	85.9%	14.1%
RB Dresden	85.8%	14.2%
RB Leipzig	85.1%	14.9%

Sachsen gesamt	85.7%	14.3%
Deutschland gesamt	78.1%	21.9%

**Tabelle 4-4: Anteile an unterschiedlichen Hubraumklassen bei Pkw für das Bezugsjahr 2005**

Land bzw. Regierungsbezirk	Hubvolumen		
	< 1,4 l	1,4 bis 2 l	> 2 l
RB Chemnitz	37.2%	54.8%	8.0%
RB Dresden	35.2%	56.2%	8.6%
RB Leipzig	35.6%	55.3%	9.0%
Sachsen	36.1%	55.4%	8.5%
Deutschland	29.2%	54.8%	16.0%
	6.9%	0.7%	-7.6%

Die Statistiken für die Emissionsstufen von Benzinern und Diesel sind in Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 zusammengestellt. In Sachsen sind die Anteile an Pkw mit Emissionsstufen vor EURO 1 deutlich geringer und die von Pkw der Emissionsstufe EURO 3 höher als im Bundesdurchschnitt. Die entsprechenden Änderungen wurden bei den Gewichtungsfaktoren berücksichtigt, und zwar auch bei den LNFz, wobei der Handbuch-Trend für die zeitliche Entwicklung nach 2005 beibehalten wurde.

**Tabelle 4-5: Statistische Angaben nach Emissionsstufen für Benzin-Pkw, Bezugsjahr 2005**

Region	nach Emissionsgruppen, Benzin					Summe
	vor EURO 1	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	
RB Chemnitz	2.3%	24.7%	17.2%	36.6%	19.2%	100.0%
RB Dresden	3.0%	28.3%	16.7%	35.0%	17.0%	100.0%
RB Leipzig	2.9%	27.9%	16.1%	34.3%	18.7%	100.0%
Sachsen gesamt	2.7%	26.8%	16.8%	35.4%	18.2%	100.0%
Deutschland gesamt	4.2%	27.2%	16.4%	33.1%	19.2%	100.0%

**Tabelle 4-6: Statistische Angaben nach Emissionsstufen für Diesel-Pkw, Bezugsjahr 2005**

Region	nach Emissionsgruppen, Diesel					Summe
	vor EURO 1	EURO 1	EURO 2	EURO 3	EURO 4	
RB Chemnitz	3.0%	6.1%	24.0%	50.4%	16.6%	100.0%
RB Dresden	3.9%	7.6%	23.6%	49.0%	15.9%	100.0%
RB Leipzig	3.8%	7.8%	23.3%	48.6%	16.5%	100.0%
Sachsen gesamt	3.5%	7.1%	23.7%	49.4%	16.3%	100.0%
Deutschland gesamt	5.2%	8.8%	23.7%	45.5%	16.8%	100.0%

Für die Ausweitung der Modifikationen auf unterschiedliche Längsneigungsklassen wurden für die bestehenden EURO 4 Schichten die Verhältnisse zwischen dem Emissionsfaktor der betreffenden

Längsneigungsklasse je Fahrzeugschicht und Handbuch-Zyklus (IDVS von 501 bis 530) und dem entsprechenden Handbuch-Emissionsfaktor für die Längsneigungsklasse 0% bestimmt. Diese Verhältnisse wurden dann auf die modifizierten EURO 4/5/6 Emissionsfaktoren angewendet, um entsprechend modifizierte Werte für die übrigen Längsneigungsklassen zu erhalten.

In analoger Weise wurde verfahren, um den Alterseinfluss für die verschiedenen Fahrzeugschichten für die Folgejahre bis 2020 zu berücksichtigen.

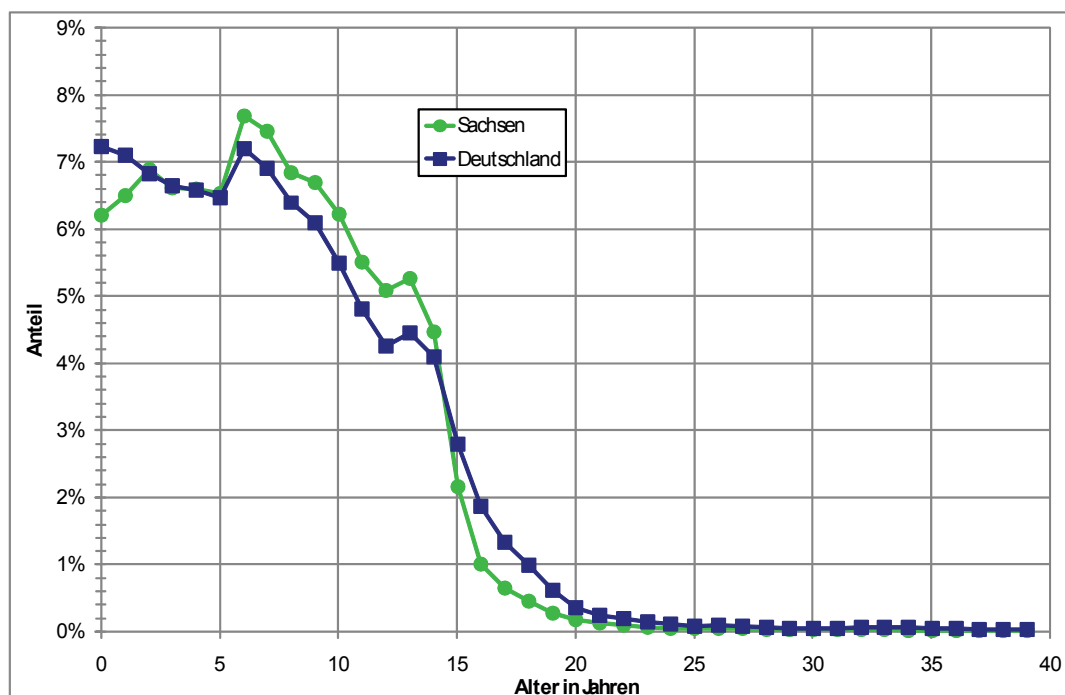
Die Emissionsfaktoren wurden dann für Bezugsjahre von 2008 bis 2020 innerhalb der Fahrzeugkategorien Pkw, LNfz und SNfz mit den modifizierten Fahrleistungsgewichten für 2005 und dem Trend des Handbuchs zu mittleren Emissionsfaktoren aggregiert.

Für die Innerorts-Zyklen mit Ausnahme des Stop+Go-Zyklus wurden zusätzlich Kaltstartzuschläge für Pkw und LNfz auf der Basis der Mobilev-Modellierung bestimmt. Diese arbeitet mit straßentypabhängigen, stundenbezogenen Häufigkeitsverteilungen für den 1. bis 5. Kilometer, die aus Untersuchungen in Berlin stammen. Die Kaltstartzuschläge sind in der Ergebnistabelle separat ausgewiesen.

Diese Berechnungen wurden für folgende Szenarien durchgeführt:

1. Analog Handbuch, also Pkw und LNfz nur bis EURO 4,
2. Zusätzlich ab 2009 Berücksichtigung von EURO 5 für Pkw und LNfz,
3. Wie 2., zusätzlich ab 2015 Berücksichtigung von EURO 6 für Pkw und LNfz.

Die Fahrleistungsgewichtungen für die neuen Emissionsstufen wurden für Pkw und LNfz auf der Basis der in Abbildung 4-7 dargestellten Altersverteilung für Sachsen bestimmt. Diese stammt aus KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006B). Die Kurven entsprechen einem Durchschnittsalter von 7,2 Jahren für Sachsen. Zusätzlich wurde angenommen, dass im Einführungsjahr der neuen Emissionsstufen 30% der Neuzulassungen noch der vorherigen Emissionsstufe entsprechen, 1 Jahr später noch 20%, 2 Jahre später noch 10% und erst im 3. Jahr nach Einführung alle Neuzulassungen der neuen Emissionsstufe entsprechen. Die sich daraus ergebenden prozentualen Anteile sind in Tabelle 4-7 und Tabelle 4-8 zusammengestellt.



**Abbildung 4-7: Altersverteilungen von Pkw und LNfz zur Bestimmung der Fahrleistungsanteile für EURO 5 und 6 (abgeleitet aus KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006B))**

**Tabelle 4-7: Anteile von EURO 5 Fahrzeugen und restlichen Fahrzeugen in Abhängigkeit vom Bezugsjahr für Szenario 2**

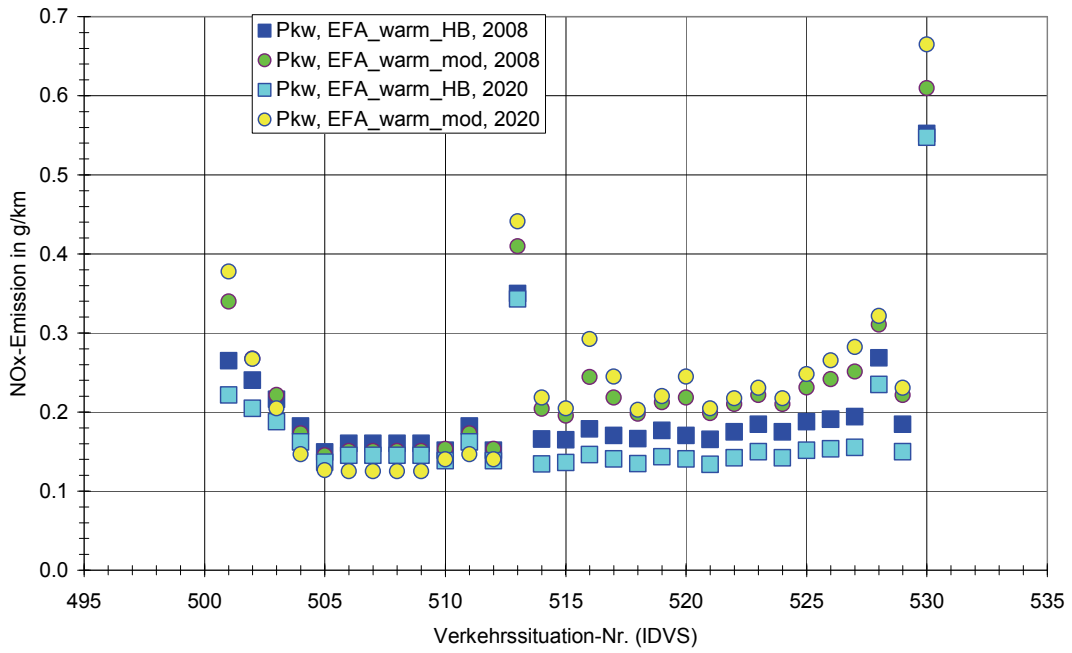
Bezugsjahr	EURO 5	Rest
2009	4.34%	95.66%
2010	9.55%	90.45%
2011	15.76%	84.24%
2012	22.38%	77.62%
2013	28.97%	71.03%
2014	35.51%	64.49%
2015	43.20%	56.80%
2016	50.67%	49.33%
2017	57.51%	42.49%
2018	64.21%	35.79%
2019	70.44%	29.56%
2020	75.96%	24.04%

**Tabelle 4-8: Anteile von EURO 6 Fahrzeugen und restlichen Fahrzeugen in Abhängigkeit vom Bezugsjahr für Szenario 3**

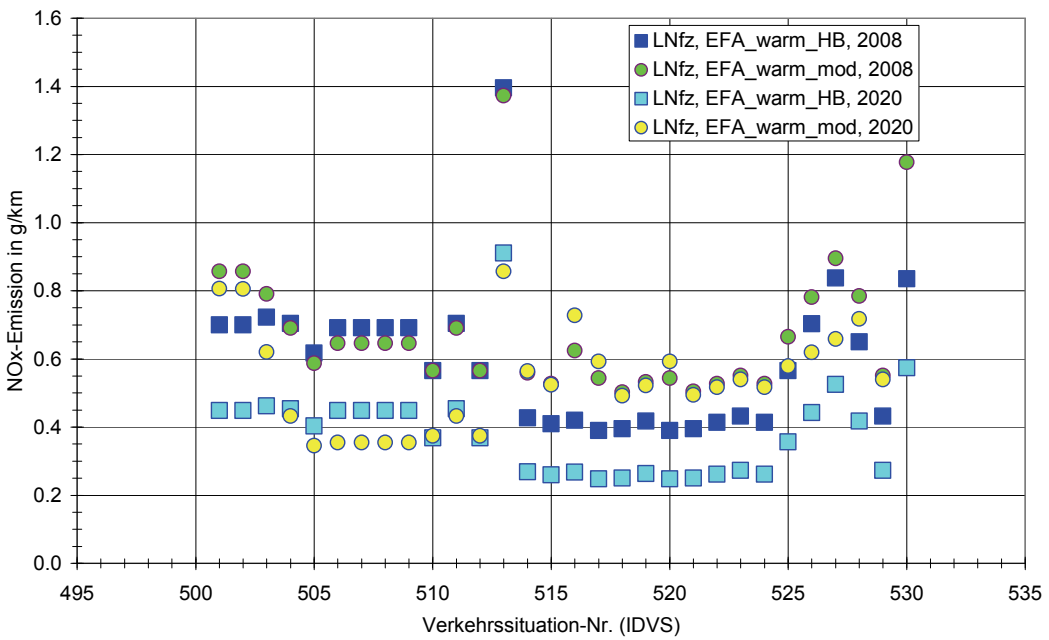
Bezugsjahr	EURO 6	Rest
2015	4.34%	95.66%
2016	9.55%	90.45%
2017	15.76%	84.24%
2018	22.38%	77.62%
2019	28.97%	71.03%
2020	35.51%	64.49%

Hinsichtlich der Kaltstartzuschläge wurde für alle EURO 5 Fahrzeuge eine Reduktion gegenüber EURO 4 um 20% angenommen. Diese Reduktion wurde auch für EURO 6 Benzin-Fahrzeuge beibehalten, da keine weitere Grenzwertabsenkung gegenüber EURO 5 erfolgt. Für EURO 6 Diesel-Fahrzeuge wurden die Kaltstartzuschläge gegenüber EURO 4 um 40% reduziert.

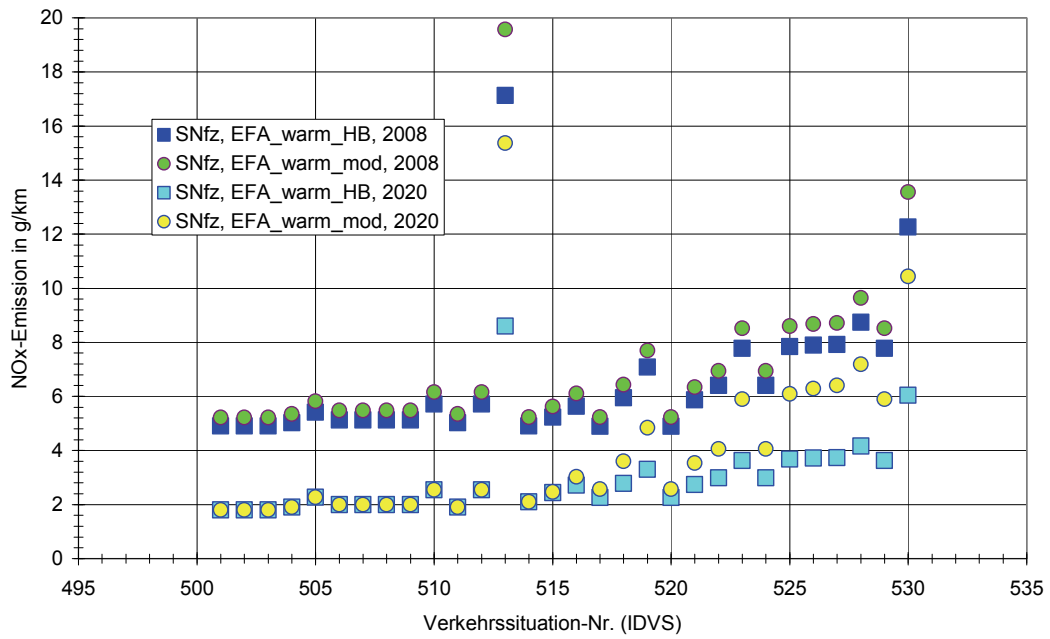
Der Vergleich zwischen Handbuch- und modifizierten Emissionsfaktoren ist für die Bezugsjahre 2008 und 2020 in Abbildung 4-8 bis Abbildung 4-10 für Pkw, LNfz und SNfz dargestellt. Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 zeigen die Emissionsfaktoren für die Szenarien 1 und 2 für Pkw und LNfz, Abbildung 4-13 und Abbildung 4-14 analoges für die Szenarien 2 und 3. Entsprechende Bilder für SNfz sind obsolet, weil die Emissionsfaktoren für diese Fahrzeugkategorie für alle Szenarien unverändert sind.



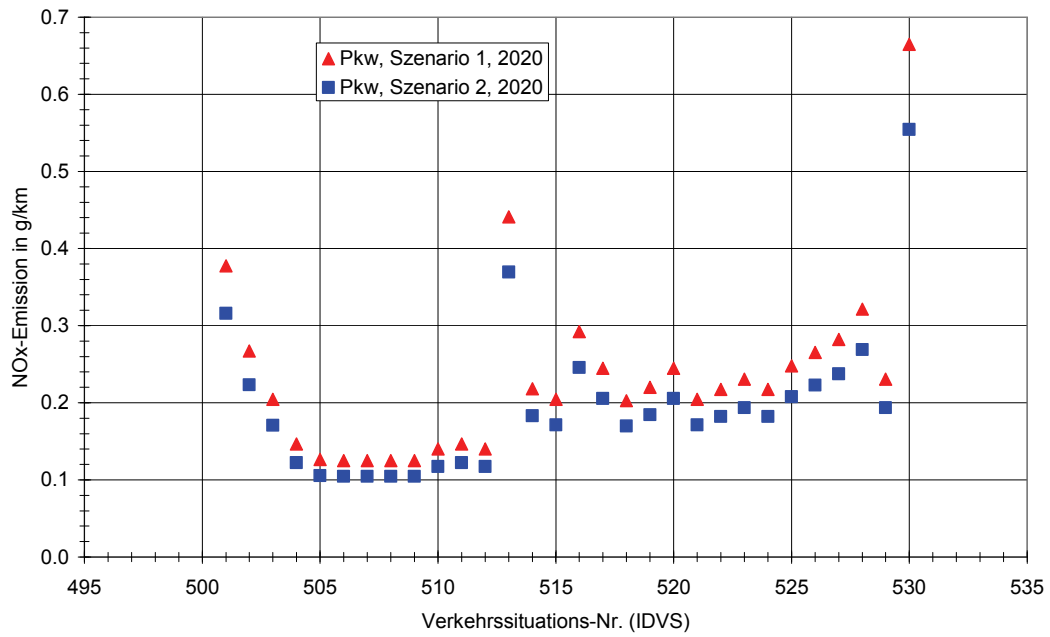
**Abbildung 4-8: Vergleich Emissionsfaktoren Handbuch/modifizierte Werte für Pkw und Szenario 1**



**Abbildung 4-9: Vergleich Emissionsfaktoren Handbuch/modifizierte Werte für LNfz und Szenario 1**



**Abbildung 4-10: Vergleich Emissionsfaktoren Handbuch/modifizierte Werte für SNfz und Szenario 1**



**Abbildung 4-11: Vergleich modifizierte Emissionsfaktoren für Pkw Szenarien 1 und 2**

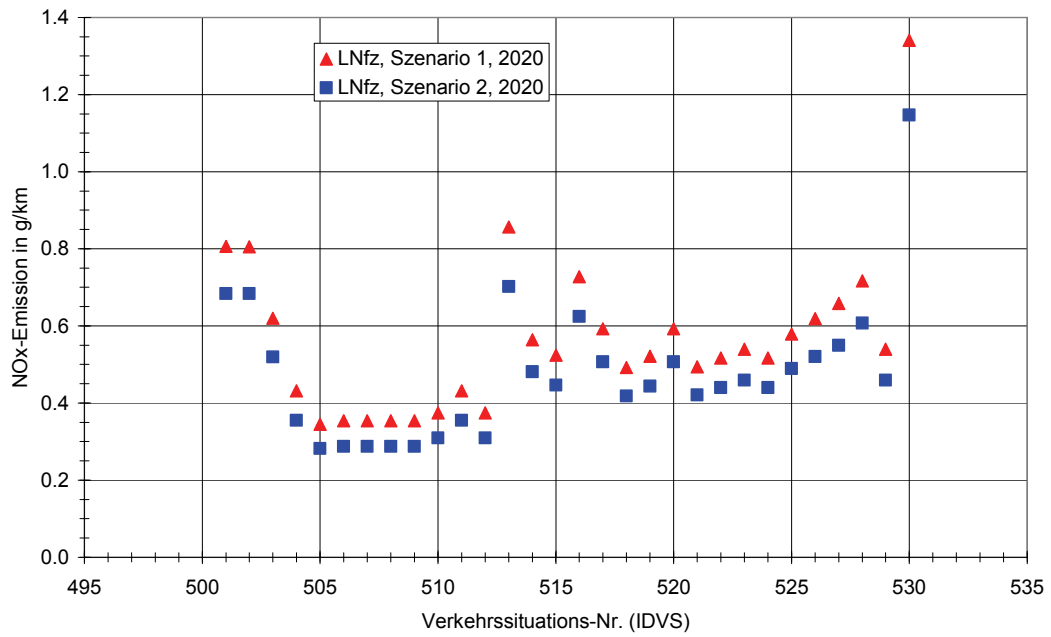


Abbildung 4-12: Vergleich modifizierte Emissionsfaktoren für LNfz Szenarien 1 und 2

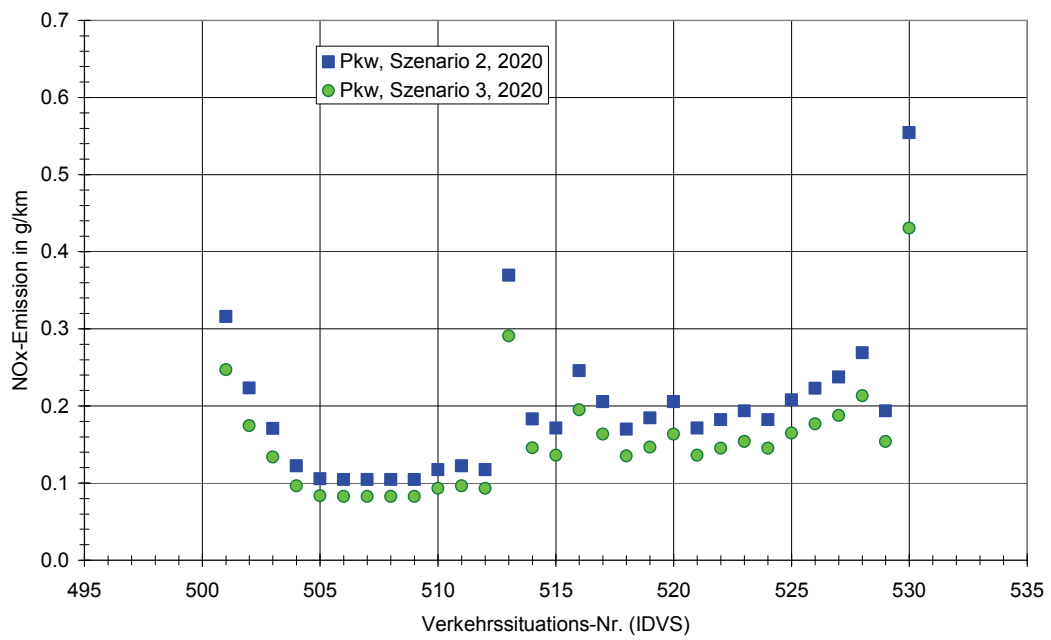
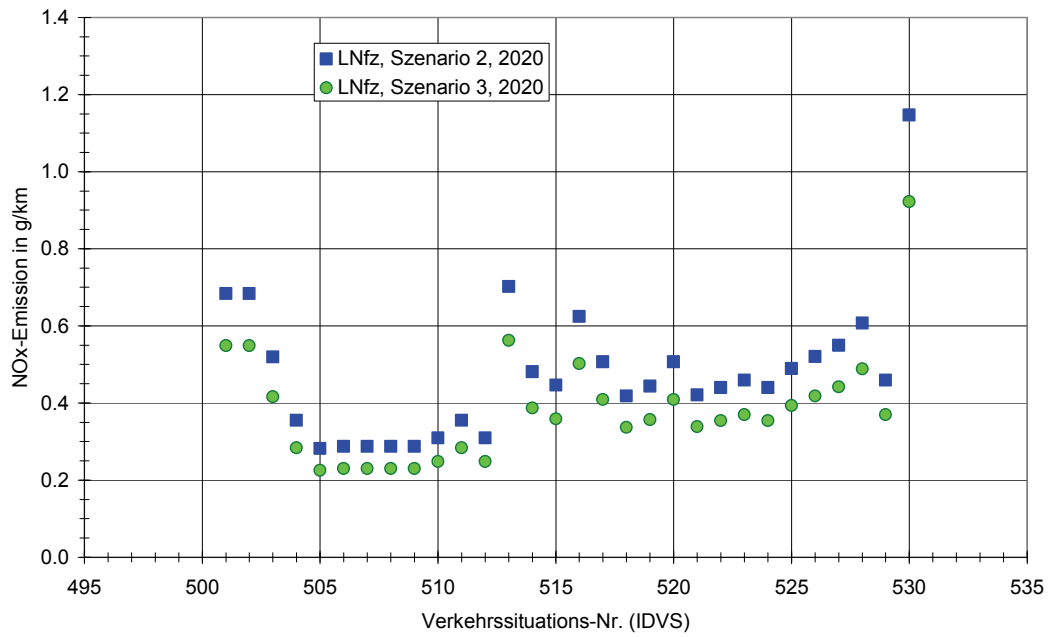


Abbildung 4-13: Vergleich modifizierte Emissionsfaktoren für Pkw Szenarien 2 und 3



**Abbildung 4-14: Vergleich modifizierte Emissionsfaktoren für LNfz Szenarien 2 und 3**



#### 4.2.3 Vorschlag zum NO<sub>2</sub>-Anteil am NO<sub>x</sub>-Abgas

Tabelle 4-9: Vorschlag zum NO<sub>2</sub>-Anteil am NO<sub>x</sub>-Abgas auf Basis IFEU Literatur-recherche, Info von Herstellern und TÜV-Messungen

Fahrzeug			NO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub>		
			best case	average	worst case
PKW					
	Benzin	EURO 1 und früher	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO 2	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO 3	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO 4	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO 5	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO 6	5.0%	5.0%	5.0%
	Diesel	EURO 1 und früher	10.0%	15.0%	20.0%
		EURO 2	10.0%	15.0%	20.0%
		EURO 3	25.0%	32.5%	40.0%
		EURO 4	35.0%	42.5%	50.0%
		EURO 5	35.0%	37.0%	39.0%
		EURO 6	5.0%	12.5%	20.0%
leichte Nutzfahrzeuge (bis 3,5 t zul. Gesamtmasse)					
	Benzin	EURO 1 und früher	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO 2	5.0%	10.0%	15.0%
		EURO 3	5.0%	10.0%	15.0%
		EURO 4	5.0%	10.0%	15.0%
		EURO 5			
		EURO 6			
	Diesel	EURO 1 und früher	10.0%	15.0%	20.0%
		EURO 2	10.0%	15.0%	20.0%
		EURO 3	25.0%	35.0%	45.0%
		EURO 4	35.0%	45.0%	55.0%
		EURO 5	35.0%	37.0%	39.0%
		EURO 6	5.0%	12.5%	20.0%
schwere Nutzfahrzeuge (ohne Linienbusse)					
		EURO I und früher	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO II	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO III	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO IV	15.0%	16.0%	17.0%
		EURO V	8.0%	11.5%	15.0%
		EURO VI	5.0%	7.5%	10.0%
Linienbusse					
		EURO I und früher	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO II	5.0%	5.0%	5.0%
		EURO III	10.0%	10.0%	10.0%
		EURO IV	25.0%	27.5%	30.0%
		EURO V	15.0%	22.5%	30.0%
		EURO VI	10.0%	10.0%	10.0%

#### 4.3 Ableitung von Fortschreibungsbedarf für das sächsische Emissionskataster

Das sächsische Emissionskataster für den Straßenverkehr basiert zur Zeit auf dem aktuell gültigen Handbuch Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr Version 2.1 (INFRAS (2004)). Die Defizite des HBEfa für die Emissionsbestimmung für NO<sub>x</sub> sind in Kapitel 4.2 benannt worden:

- EURO 4 - Faktoren basieren auf Hochrechnungen
- EURO 5 und EURO 6 Normen sind noch nicht berücksichtigt
- es existieren keine Faktoren bzw. Anteilswerte für NO<sub>2</sub>-Direktemissionen
- die Standardflotte weicht vor allem beim Dieselanteil erheblich von der sächsischen Flotte ab

Als Ergebnis der Arbeiten in Kapitel 4.2 liegen modifizierte Emissionsfaktoren und Flottengewichte für Sachsen vor, die für die Prognoseberechnungen in Kapitel 5.2 in das Eingangsformat von IMMIS<sup>em</sup> (IVU UMWELT (2008)) umgesetzt wurden. Die Ergebnisse der oben genannten Kapitel 4.2 und Kapitel 5.2 zeigen deutlich, dass in diesen Bereichen eine Aktualisierung des Emissionskatasters notwendig ist.

Es wird erwartet, dass im Frühjahr 2009 eine neue Version des HBEfa veröffentlicht wird. Nach derzeitigem Kenntnisstand werden dort die in den hier vorliegenden Arbeiten vorgestellten Modifikationen in analoger Form aktualisiert.

## **5 Prognose der Entwicklung bis 2020**

### **5.1 Aussagen der Luftreinhaltepläne**

#### **5.1.1 Prognose 2010**

Der Grenzwert für NO<sub>2</sub> wird 2010 gültig. Luftreinhaltepläne zu NO<sub>2</sub> sollen auch Auskunft darüber geben, ob die Vorgaben in diesem Stichjahr eingehalten werden oder nicht.

In Tabelle 5-1 werden als Zitate die Aussagen der Pläne zur Einhaltung der Grenzwerte im Stichjahr 2010 aufgeführt.

**Tabelle 5-1: Prognose 2010 als Zitat der Luftreinhaltepläne**

Gebiet	Verdacht auf ÜS 2010	Prognose für 2010 als Zitat aus dem Plan	Seite
Chemnitz	Ja	Lagen die höchsten Konzentrationen für bewohnte Straßenabschnitte im Zeitraum 2001-05 noch bei 58 µg/m³ für NO <sub>2</sub> , so können diese durch Umsetzung aller Maßnahmen auf 45 µg/m³ bis 2010 gesenkt werden. Hauptursache für diese Immissionsreduzierung sind neben dem technischen Fortschritt der Kfz-Technik vor allem die geplanten verkehrsregulierenden Maßnahmen.	65
Dresden	Ja	Das Regierungspräsidium Dresden hat sich daher entschieden, den Luftreinhalte- und Aktionsplan in der vorliegenden Fassung als 1. Schritt für eine Verbesserung der Luftqualität <i>ohne</i> eine Umweltzone, aber mit einer erheblichen Anzahl anderer Maßnahmen zu verabschieden. Somit können die ersten Maßnahmen zeitnah umgesetzt werden.  In einem 2. Schritt sollen weitere Maßnahmen in den Luftreinhalte- und Aktionsplan aufgenommen werden. Nach jetziger Erkenntnislage ist die Einrichtung einer Umweltzone bis spätestens 2010 unausweichlich. Dies sollte Thema der Fortschreibung des Luftreinhalte- und Aktionsplans sein.  ... Abschließend wird darauf hingewiesen, dass in allen modellierten Fällen Straßenabschnitte bleiben, für die die Grenzwerte mit diesem Maßnahmenpaket noch nicht eingehalten werden können. Für diese Abschnitte müssen im Einzelfall weitere Maßnahmen geprüft werden.	73
Görlitz*	k. A.	k. A.	-
Leipzig	Ja	Die für PM <sub>10</sub> getroffenen Aussagen treffen im Wesentlichen auch für NO <sub>2</sub> zu. Hier ist der Einfluss des Verkehrs auf die Gesamtbelastung ... noch stärker.  ... Im Rahmen der oben genannten Unsicherheiten könnten im Jahr 2010 im Stadtzentrum (Umgebung des Hauptbahnhofes, Jahnallee, Friedrich-Ebert-Straße, Käthe-Kollwitz-Straße) noch Überschreitungen auftreten. Die Jahnallee würde der Immissionsschwerpunkt bleiben. Außer dieser Straße sind noch Willi-Brandt-Platz, Dittrichring, Friedrich-Ebert-Straße, Käthe-Kollwitz-Straße, Wurzener Straße und Am Gothischem Bad zu beobachten. Für diese Straßen wäre ggf. eine langfristige Lösung (z. B. dauerhafte verkehrslenkende Maßnahmen für LKW) erforderlich.	61
Görlitz hat keine NO <sub>2</sub> -Überschreitung zu verzeichnen			

In allen drei Plänen mit NO<sub>2</sub>-Überschreitungen wurden Prognosedaten für das Jahr 2010 vorgelegt. In all diesen Plänen wurde der Verdacht auf eine Grenzwertüberschreitung im Jahr 2010 ausgesprochen.

Görlitz hat keine NO<sub>2</sub>-Überschreitung zu verzeichnen, es wurde keine Prognose der NO<sub>2</sub>-Immissionen für 2010 vorgelegt.

### 5.1.2 Prognose 2015

In Tabelle 5-2 werden als Zitate die Aussagen der Pläne mit dem Prognosehorizont 2015 aufgeführt.

**Tabelle 5-2: Prognose 2015 als Zitat der Luftreinhaltepläne**

Gebiet	Verdacht auf ÜS 2015	Prognose für 2015 als Zitat aus dem Plan	Seite
Chemnitz	Ja	Der NO <sub>2</sub> -Grenzwert kann auch 2015 noch nicht an allen prognostizierten Straßenabschnitten eingehalten werden, jedoch sind die berechneten Überschreitungen nur noch so gering, dass sie deutlich unter den Fehlergrenzen des Modells liegen. Die verkehrswirksame Umsetzung der geplanten (Kap. 8) und zusätzlichen (Kap. 9) Maßnahmen führt 2015 zu einem starkem Rückgang der höchsten absoluten Konzentrationen bei NO <sub>2</sub> von 58 µg/m <sup>3</sup> auf 44 µg/m <sup>3</sup> .	66
Dresden	k. A.	k. A.	-
Görlitz*	k. A.	k. A.	-
Leipzig	k. A.	k. A.	-

\*Görlitz hat keine NO<sub>2</sub>-Überschreitung zu verzeichnen

Nur in einem der drei Pläne mit NO<sub>2</sub>-Überschreitungen, im Luftreinhalteplan für die Stadt Chemnitz, wurden Prognosedaten für das Jahr 2015 vorgelegt. Es wurde der Verdacht auf eine Grenzwertüberschreitung im Jahr 2015 ausgesprochen.

Görlitz hat keine NO<sub>2</sub>-Überschreitung zu verzeichnen, es wurde keine Prognose der NO<sub>2</sub>-Immissionen für 2015 vorgelegt.

## 5.2 Prognose der Entwicklung für die Bergstraße und die Lützner -Straße

Die modifizierte Emissionsdatenbasis aus Kapitel 4.2 wurde in das Emissionsmodell IMMIS<sup>em</sup> (IVU UMWELT (2008)) integriert. Zur Beurteilung der Änderungen in den NO<sub>x</sub>-Emissionen, die aus der Modifikation der NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren und der Anpassungen der Flottenzusammensetzung auf die Verhältnisse in Sachsen resultieren, wurden mit dem Emissionsmodell Rechnungen für die Bergstraße in Dresden und die Lützner Straße in Leipzig durchgeführt. Grundlage der Berechnungen der NO<sub>2</sub>-Emissionen war der in Kapitel 4.2.3 beschriebene Vorschlag.

**Tabelle 5-3: Übersicht über die berechneten Straßenabschnitte**

Name	Dresden Bergstraße	Leipzig Lützener Straße
Typ nach HBEfa	LSA 1	LSA 2
Steigung	6 %	0 %
DTV	26332	20972
Schwere LKW	1.1 %	1.4 %
Leichte LKW	3.4 %	4 %
Bus	0 %	0 %
Krad	0 %	0 %
Kapazität	600	750
Spuren	4	2
Berechneter Stauanteil	1.3 %	11.9 %

Für die Jahre 1995, 2000, 2004, 2005, 2007, 2010, 2015 und 2020 wurden die NO<sub>x</sub>- und die NO<sub>2</sub>-Emissionen für die in Tabelle 5-4 aufgeführten Szenarien berechnet.

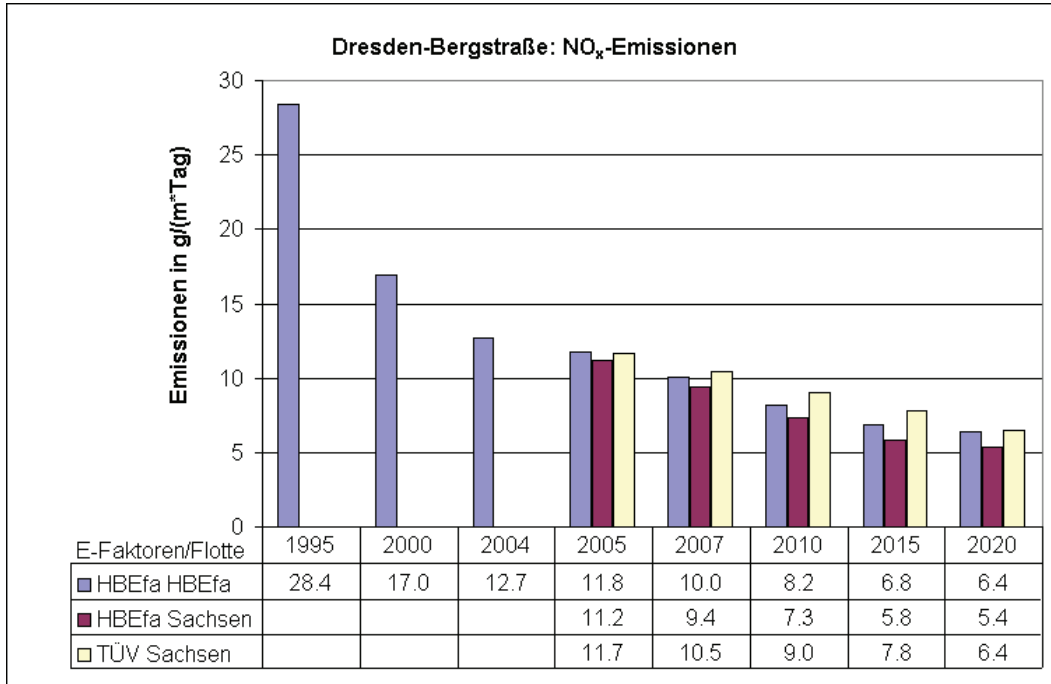
**Tabelle 5-4: Übersicht über die gerechneten Szenarien**

Szenario	Kürzel E-Faktoren/Flotte	Berechnete Jahre
Emissionsfaktoren nach HBEfa Flottenzusammensetzung nach HBEfa	HBEfa HBEfa	alle
Emissionsfaktoren nach HBEfa Flottenzusammensetzung für Sachsen	HBEfa Sachsen	ab 2005
Emissionsfaktoren nach TÜV Nord Flottenzusammensetzung für Sachsen	TÜV Sachsen	ab 2005

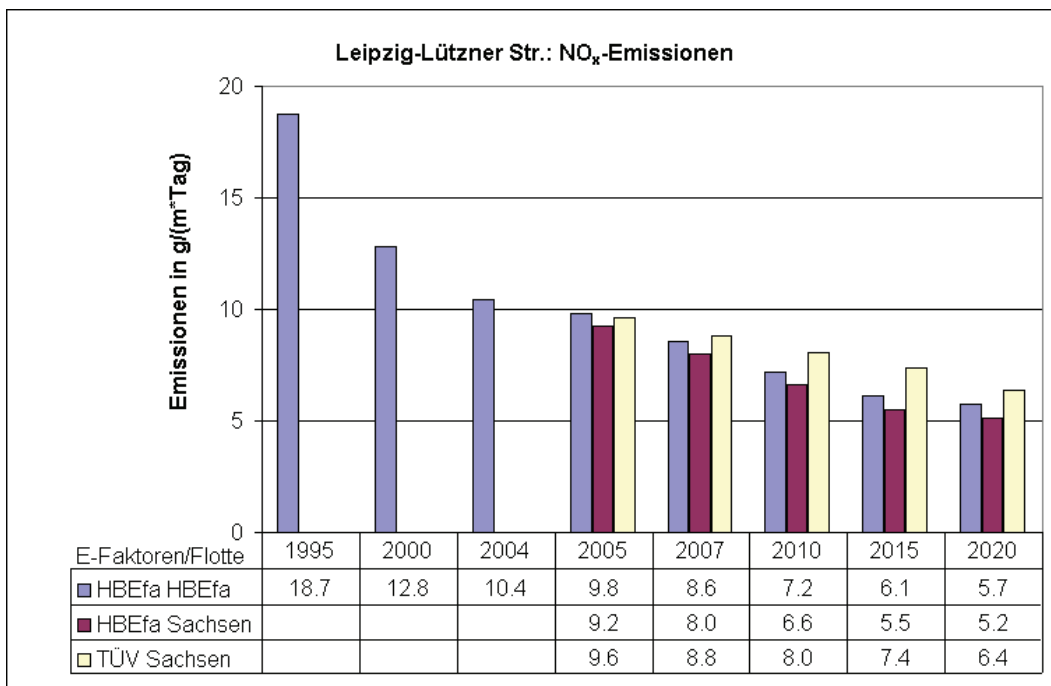
Die Ergebnisse sind getrennt für die Bergstraße in Dresden und die Lützener Straße in Leipzig für NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen in Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-4 dargestellt.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen sinken in der Bergstraße in Dresden bei den Berechnungen mit Flotte und Emissionsfaktoren nach dem HBEfa kontinuierlich von 1995 bis 2020. Dem gleichen Trend folgen auch die Ergebnisse der anderen Szenarien. Bei Berücksichtigung der modifizierten Flotte für Sachsen sind die Emissionen geringer im Vergleich zur HBEfa-Flotte, da in dieser Flotte Fahrzeuge der Euronorm größer EURO 3 einen größeren Fahrleistungsanteil haben. Des Weiteren führt der im Vergleich zum Bundesdurchschnitt geringere Anteil Dieselfahrzeuge (siehe Kapitel 4.2) zu niedrigeren NO<sub>x</sub>-Emissionen. Die im Vergleich höheren Emissionen im Szenario TÜV/Sachsen spiegeln, trotz der Verwendung der modifizierten Flotte für Sachsen, den Einfluss der vom TÜV Nord modifizierten NO<sub>x</sub>-Emissionsfaktoren wieder. Dieser Einfluss ist so stark, dass die Emissionen des Szenarios TÜV/Sachsen trotz mildernder Flottenmodifikationen ab 2007 größer sind als beim Szenario HBEfa/HBEfa.

Die NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Lützener Straße in Leipzig entwickeln sich analog zu denen in der Bergstraße in Dresden, da es sich in beiden Fällen um eine Innerort-Verkehrssituation handelt.



**Abbildung 5-1: Vergleich der NO<sub>x</sub>-Emissionen in g/(m<sup>3</sup>\*d) für die Bergstraße in Dresden**

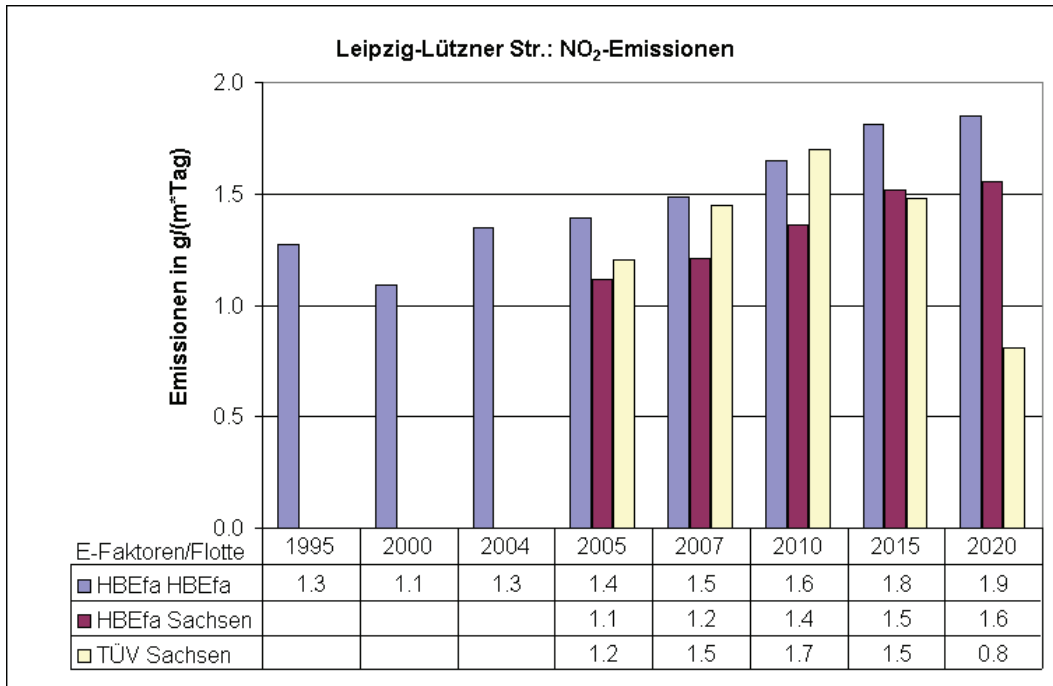


**Abbildung 5-2: Vergleich der NO<sub>x</sub>-Emissionen in g/(m<sup>3</sup>\*d) für die Lützner Straße in Leipzig**

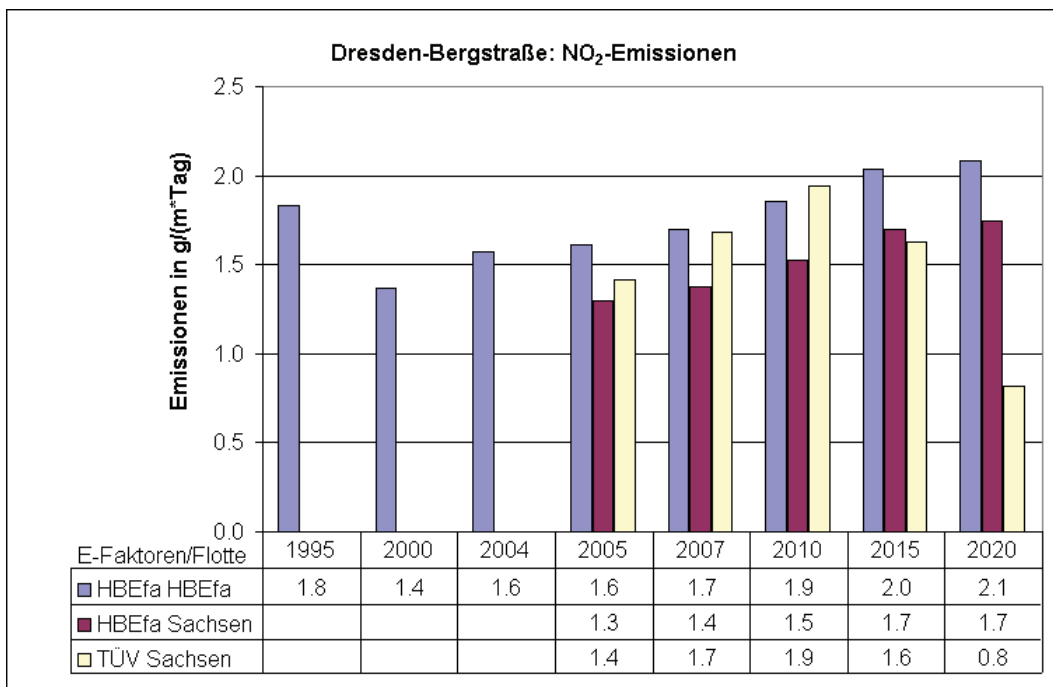
Die NO<sub>2</sub>-Emissionen steigen im Gegensatz zu den NO<sub>x</sub> Emissionen für die Bergstraße in Dresden beim Szenario HBEfa/HBEfa ab dem Jahr 2000 an. Dies liegt am steigenden Anteil von Fahrzeugen mit einem höheren Anteil von NO<sub>2</sub> am NO<sub>x</sub>-Abgas (Diesel EURO 4). Das Szenario HBEfa/Sachsen zeigt bis 2010 wie bei den NO<sub>x</sub>-Emissionen die niedrigsten Werte. Für 2015 und 2020 hingegen nehmen die Werte des Szenarios TÜV/Sachsen deutlich ab und liegen unter denen des Szenarios HBEfa/Sachsen. Diese Absenkung ist in der Verschiebung von Flottenanteilen von

EURO 4 zu EURO 5 und EURO 6 begründet, da die NO<sub>2</sub>-Anteile am NO<sub>x</sub>-Abgas bei Diesel-EURO 4-Fahrzeugen am höchsten sind.

Die NO<sub>2</sub>-Emissionen in der Lützner Straße in Leipzig entwickeln sich analog zu denen in der Bergstraße in Dresden, da der Vorschlag zum NO<sub>2</sub>-Anteil am NO<sub>x</sub>-Abgas (siehe Kapitel 4.2.3) nicht verkehrssituationsspezifisch ist.



**Abbildung 5-3: Vergleich der NO<sub>2</sub>-Emissionen in g/(m<sup>3</sup>d) für die Lützner Straße in Leipzig**



**Abbildung 5-4: Vergleich der NO<sub>2</sub>-Emissionen in g/(m<sup>3</sup>d) für die Bergstraße in Dresden**

Aus diesen Emissionsberechnungen kann abgeleitet werden, dass als Folge der realen  $\text{NO}_x$ -Emissionen von modernen Fahrzeugen und der Problematik der direkten  $\text{NO}_2$ -Emissionen der Anteil des Kfz-Verkehrs an der  $\text{NO}_2$ -Belastung aktuell und zukünftig bis 2015 eher höher als bisher angenommen ist. Der in den drei Luftreinhalteplänen Chemnitz, Dresden und Leipzig ausgesprochene Verdacht auf  $\text{NO}_2$ -Überschreitungen im Jahr 2010 (Kapitel 5.1.1) wird demnach verstärkt. In den Jahren ab 2015 ist aufgrund der Verschiebung von Flottenanteilen mit niedrigeren als auf der Basis des aktuellen HBEfa Version 2.1 (INFRAS (2004)) prognostizierten Werten zu rechnen.

### **5.3 Einfluss der Klimaänderung auf die $\text{NO}_2$ -Belastungssituation**

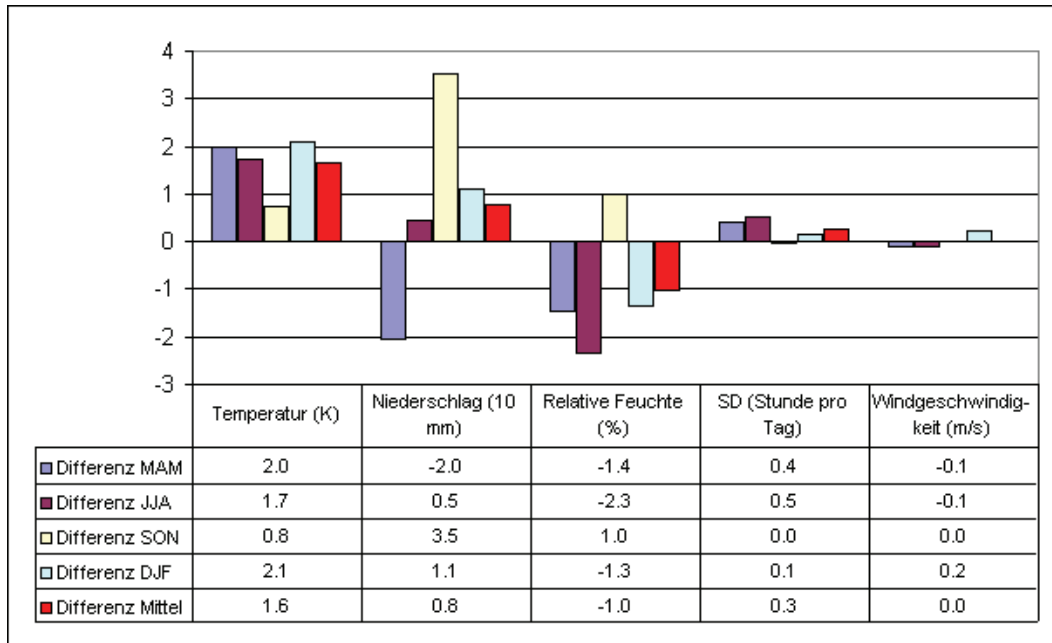
Vom LfULG wurden Projektionsdaten der sächsischen Klimastationen für die Dekaden 1991-2000 und 2021-2030 für die Projektion Werex III Szenario A2 zur Verfügung gestellt. Dabei wurden die Aussagen in Hinblick auf die aus klimatologischer Sicht relativ kurze Projektion folgendermaßen charakterisiert:

- Dekadenmittelwerte müssen nicht repräsentativ im Sinne klimatischer Kenngrößen sein (Klimanormalperiode 30 a)
- Die ausgewählten Dekaden sind geeignet, mögliche generelle Trends zu repräsentieren – insbesondere hohe Fluktuationen im Niederschlag können falsche Entwicklungen vortäuschen.
- Vergleich der Dekade 1991-2000 Sachsenmitteltemperatur:
  - Kontrollklima in Werex III 8,5 °C,
  - DWD Beobachtungsdaten 8,6 °C

Der Temperaturanstieg bis 2021-2030 in WEREX III verläuft mit einer etwas höheren Dynamik (ca. 0,5 K/Dek.) als in den letzten Dekaden (ca. 0,4 K/Dek.) in Sachsen bereits zu beobachten war. Die Entwicklung ist zwar plausibel, ordnet sich aber immer in einen Korridor möglicher Temperaturveränderungen (interne Klimavariabilität, Klimasensitivität, Rückkopplungseffekte, THG-Entwicklung, atmosphärische Zirkulationsverschiebungen, Änderung in Häufigkeit und Charakteristik der GWL) ein.

Prinzipiell sollte das Klimasignal (Wert 2021-2030 minus Wert 1991-2000) zur Interpretation genutzt werden, so ist der Absolutwert der SD im Modell auf einem zu geringen Niveau, das Klimasignal ist jedoch plausibel (siehe Abbildung 5-5).





**Abbildung 5-5: Klimasignal als Mittelwert über die Klimastationen in Sachsen für die vier Jahreszeiten und im Mittel**

Die stärkste Veränderung bezogen auf die Mittelwerte ergibt sich bei der Temperatur mit einer Erhöhung um 27 % und bei der Sonnenscheindauer mit einem Plus von 7 %. Die Variation der Windgeschwindigkeit ist sowohl absolut als auch relativ betrachtet gering. Der Niederschlag nimmt im Frühjahr ab und im Herbst zu. Im Mittel wird eine Zunahme prognostiziert, wobei sich im Mittel eine sowohl absolut (0.8 mm) als auch relativ (0.4 %) leichte Zunahme ergibt.

Die Variation des über alle Messstationen gemittelten Temperaturjahresmittelwerts beträgt für den Zeitraum 1995 bis 2007 7.0°C (1996) bis 10.2°C (2007, siehe dazu Abbildung 3-27) also mehr als 3°C. Die Strahlung schwankt im gleichen Zeitraum um den Mittelwert von 71 % (1996) bis 111 % (2000; siehe dazu Anlagenband Kapitel B.1).

Generell können folgende Effekte der klimatologischen Situation auf ein NO<sub>2</sub>-Belastungsniveau angegeben werden:

- höhere Temperaturen im Winter – niedrigere Emissionen beim Hausbrand, weniger Kaltstart- bzw. Kühlstartemissionen
- höhere Temperaturen im Sommer – höherer Energieverbrauch durch verstärkten Einsatz von Klima- und Belüftungsanlagen
- höhere Windgeschwindigkeiten - niedrigere lokale Immissionsbelastung auf Grund höherer Durchmischung in Quellnähe und schnellerem Abtransport
- höherer Niederschlag - mehr nasse Deposition (bei NO<sub>2</sub> eher vernachlässigbar)
- mehr Inversionswetterlagen vor allem im Winter führen zu ungünstigeren Ausbreitungsbedingungen

Je nach Ausprägung der einzelnen Klimaeffekte wird der Nettoeffekt auf die NO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung unterschiedlich sein. Tendenziell kann auf Grund der höheren Temperaturen im Winter von einer niedrigeren Emissionssituation ausgegangen werden. Die Effekte von veränderten Ausbreitungsbedingungen lassen sich vorerst nicht eindeutig abschätzen.

Aus Sicht der Autoren ist die modellhaft bestimmte Änderung der für die Emission und Ausbreitung von Luftschadstoffen relevanten Parameter für einen Zeitraum von 30 Jahren im Vergleich zur

jährlichen Variation für einen Zeitraum von 10 bis 15 Jahren gering. Damit ist die Berücksichtigung der möglichen Klimaentwicklung auf die Immissionssituation von NO<sub>2</sub> nicht zielführend.

## **6 Erste Schlussfolgerungen für Maßnahmen zur Minderung der NO<sub>2</sub>-Belastung**

In den Luftreinhalteplänen in Sachsen wird in den Verursacheranalysen zu NO<sub>2</sub> der Straßenverkehr als Hauptverursacher identifiziert. Dementsprechend wird eine Vielzahl von Maßnahmen für den Straßenverkehr angegeben.

Aus den bisherigen Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass als Folge der realen NO<sub>x</sub>-Emissionen von modernen Fahrzeugen und der Problematik der direkten NO<sub>2</sub>-Emissionen der Anteil des Kfz-Verkehrs an der NO<sub>2</sub>-Belastung aktuell und zukünftig bis 2015 eher höher als bisher angenommen ist.

Diese beiden genannten Faktoren müssen auch bei der Wirkungsabschätzung von verkehrsbeschränkenden bzw. verkehrsleitenden Maßnahmen sowie Änderungen der Fahrzeugflotte (Stichwort Umweltzone) berücksichtigt werden. Im Einzelnen sind folgende Effekte von Bedeutung:

- Erneuerung der Kfz-Flotte durch EURO 4-Fahrzeuge mit ungünstiger Abgasnachbehandlung wirkt kontraproduktiv, da der direkt emittierte NO<sub>2</sub>-Anteil deutlich ansteigt.
- Erst die Einführung von Kraftfahrzeugen mit EURO 5 und EURO 6 führt zur entscheidenden Reduktion von NO<sub>x</sub>- und NO<sub>2</sub>-Emissionen

## 7 Zusammenfassung

Der 1. Zwischenbericht stellt die Arbeiten im Projekt des Jahres 2008 vor. Dazu wurden alle Arbeitspakete der Projektbeschreibung gemäß der Leistungsbeschreibung durch das Land Sachsen und des Angebots durch den Auftragnehmer in ihrem derzeitigem Bearbeitungsstand beschrieben. Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse zusammengefasst dargestellt.

Die Clusteranalyse aus Kapitel 3.1 zeigt, dass sich NO-Messungen und das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis gut als Indikator für die Einordnung als Verkehrsstation eignen. Daraus ergibt sich, dass die Station Zwickau eher als Station im urbanen Hintergrund denn als Verkehrsstation einzuordnen ist. Das Dendrogramm für Ozon lässt sich gut durch die geographische Lage der Stationen erklären. Eine Erklärung für die Ergebnisse der Clusteranalyse von NO<sub>2</sub> gestaltet sich deutlich schwieriger, wobei sowohl die Quellzuordnung (z. B. Verkehr) als auch die geographische Lage eine Rolle spielt. Insgesamt wurde gezeigt, dass die Clusteranalyse recht stabil gegenüber dem Auswertzeitraum und der Verfügbarkeit einzelner Stationen ist.

Die Trendanalysen auf stündlicher Datenbasis für den Zeitraum 1995 bis 2007 in Kapitel 3.1 führen zu folgenden Aussagen. Die Zeitreihen der Belastung von NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> und Ozon weisen zum Großteil deutliche Jahrgänge auf. Bei den Stickoxiden wird im Allgemeinen eine signifikante Trendabnahme festgestellt, wobei die Station Leipzig-Mitte mit einem klaren NO<sub>2</sub>-Zunahmetrend einen Sonderfall darstellt. Die Ozonbelastung nimmt im Allgemeinen zu, wobei an fünf Stationen in den letzten Jahren ein Abwärtstrend festzustellen ist. Sowohl bei den Stickoxiden als auch beim Ozon ist ein mehr oder minder ausgeprägter Bruch in den Verläufen zwischen 2000 bis 2002 festzustellen.

Das NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis nimmt an 60% der Verkehrsstationen signifikant zu. Dabei überschätzt der Romberg-Ansatz dieses Verhältnis bei Stationen mit niedrigem NO<sub>2</sub>-Konzentrationsniveau stärker, während bei hohem Niveau Messung und Romberg-Ansatz gut übereinstimmen.

Für die Stationen mit im Vergleich zum Gesamtzeitraum kurzer Betriebsdauer können nur eingeschränkt Trendaussagen gemacht werden.

Der Vergleich der sächsischen NO<sub>2</sub>-Messungen mit bundesdeutschen Messdaten auf der Basis von Jahresdaten in Kapitel 3.2 zeigt im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung. Die über die EoI-Klassifizierung gemittelten Jahresmittelwerte von NO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub> für die sächsischen und die bundesdeutschen Stationen laufen gerade in den letzten Jahren bei den Verkehrsstationen nahezu deckungsgleich. In beiden Datensätzen sind abnehmende Trends festzustellen, die bei NO<sub>2</sub> in den Jahren seit 2003 nicht mehr eindeutig sind.

Größere Unterschiede im Niveau treten bei NO<sub>2</sub> an den ländlichen und NO<sub>x</sub> bei den städtischen Hintergrundstationen auf. Dabei fällt z. B. auf, dass bei den bundesdeutschen NO<sub>x</sub>-Jahresmittelwerten im ländlichen Hintergrund noch ein großer Anteil als NO vorliegt, was auf eine teilweise Nähe zu Emissionsquellen schließen lässt.

Der Vergleich zwischen sächsischen und bundesdeutschen Daten beim NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub>-Verhältnis zeigt, dass in beiden Fällen der Romberg-Ansatz bei neueren Messungen und höherem Konzentrationsniveau unterschätzt, wobei dieses Verhalten im sächsischen Datensatz deutlicher ausgeprägt ist.

Die Prüfung der unterschiedlichen Einflussgrößen Meteorologie, Ozonchemie und Verkehr erfolgt in Kapitel 3.3. Bezogen auf Jahresmittelwerte ist festzustellen, dass die tendenzielle Abnahme der NO<sub>2</sub>-Belastung mit einer tendenziellen Zunahme der Ozonbelastung einhergeht.

Als Ergebnis der Korrelations- und Regressionsanalyse für die vier Verkehrsstationen mit vorliegenden Zeitreihen der Verkehrsbelastung ergibt sich, unter Berücksichtigung von Verkehr und Photochemie, dass die direkte  $\text{NO}_x$ -Zusatzbelastung aus dem Straßenraum die höchste Korrelation und damit auch den höchsten Erklärungsanteil im Regressionsmodell hat. Der mittlere Erklärungswert des Regressionsmodells erreicht unter Berücksichtigung aller signifikanten Variablen einen Wert von 74 %. Die analoge Analyse bezüglich der meteorologischen Variablen führt zu einem mittleren Erklärungswert von 31 %. Dabei hat die Windrichtung und –geschwindigkeit bei den eher in einer Straßenschlucht gelegenen Verkehrsstationen einen höheren Einfluss auf die  $\text{NO}_2$ -Zusatzbelastung als bei den in offenen Straßenräumen gelegenen Verkehrsstationen.

Im Kapitel 3.4 wurde der mögliche Bedarf einer Weiterentwicklung des sächsischen Luftmessnetzes geprüft. Dazu wurde die Methode der Kreuzvalidierung nach der VDI-Richtlinie „Ermittlung der Unsicherheit räumlicher Beurteilungen der Luftqualität“ angewendet. Zum Einsatz kam dazu das FLADIS-Verfahren unter Verwendung von LASAT-Modellrechnungen. Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination von Modell und Interpolation zu einem deutlich besseren Ergebnis führt als eine reine Interpolation der Messdaten. Es verbleiben jedoch im Dreieck der Stationen Chemnitz-Mitte, Glauchau und Annaberg-Buchholz verhältnismäßig hohe Konzentrationswerte, die emissionsseitig nicht erklärt werden. Ein möglicher Grund dafür ist, dass die räumliche Repräsentativität der städtischen Hintergrundstationen durch das Interpolationsverfahren überschätzt wird. Die ermittelten Kenngrößen der Kreuzvalidierung liegen insgesamt relativ hoch, was auf eine verhältnismäßig hohe Relevanz der betrachteten Stationen bezüglich der flächenhaften Darstellung weist. Als mögliche Ursachen für die Höhe der Kenngrößen werden fehlende Messdaten im Randbereich oder direkt außerhalb Sachsens (Extrapolation), fehlende Daten zum großräumigen Hintergrund sowie ungenaue Eingangsdaten in der LASAT-Modellierung (Höhe der Emissionsquellen) vermutet. Im nächsten Zwischenbericht sollen daher zum einen bei der Berechnung des Modellhintergrunds die Emissionsdaten der Großfeuerungsanlagen berücksichtigt werden. Zum anderen soll für die flächenhafte Darstellung der Konzentrationen ein Ansatz untersucht werden, in dem versucht wird, die räumliche Repräsentativität der städtischen Hintergrundstationen zu erhöhen. Für eine abschließende Klärung der Konzentrationsverhältnisse im Dreieck der Stationen Chemnitz-Mitte, Glauchau und Annaberg-Buchholz empfiehlt sich die Einrichtung eines geeigneten Messstandortes.

In Kapitel 4.2 wurde eine aktualisierte Datenbasis zur  $\text{NO}_x$ -Emissionsberechnung des Kfz-Verkehrs aufgebaut. Im Vergleich zu den bis dato angewendeten Daten aus dem HBEfa Version 2.1 wurden deutliche Unterschiede aufgezeigt, was zum einen die Emissionsfaktoren von EURO 4-Fahrzeugen und neueren Minderungsstufen und zum anderen die Flottenzusammensetzung in Sachsen anbetrifft. Es wird daher als notwendig erachtet, diese Daten bzw. die im Frühjahr zu erwartende Aktualisierung des HBEfa, ergänzt um die Beiträge der direkten  $\text{NO}_2$ -Emissionen, in die Fortschreibung des sächsischen Emissionskataster mit aufzunehmen.

Für die Prognose der  $\text{NO}_2$ -Situation bis 2020 wurden in Kapitel 5.2 die geänderte  $\text{NO}_x$ -Emissionsdatenbasis und die vorgeschlagenen Anteile an  $\text{NO}_2$ -Direktemissionen in ein Emissionsmodell integriert und auf zwei exemplarische Hotspots angewendet. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Rückgang der  $\text{NO}_x$ -Emissionen geringer ausfällt, als bisher angenommen wurde, und dass erst mit der Einführung der neuen Minderungsstufen EURO 5 und EURO 6 nach 2010 ein Rückgang der direkten  $\text{NO}_2$ -Emissionen zu erwarten ist.

Kapitel 6 gibt erste Schlussfolgerungen für die Bewertung von Maßnahmen zur Minderung der NO<sub>2</sub>-Belastung im Verkehrssektor an.

Der 1. Zwischenbericht bildet damit eine gute Basis für die sich im Frühjahr 2009 anschließende Aktualisierung, bei der ausgewählte Fragestellungen vertiefend analysiert und die Datenbasis, wo notwendig, aktualisiert werden können.

## 8 Literaturverzeichnis

- FLEMMING, J. (2003): Immissionsfelder aus Beobachtung, Modellierung und deren Kombination. Dissertation, Freie Universität Berlin. URL <http://www.diss.fu-berlin.de/2003/71/>.
- HIPPEL, K.W. & A.I. MCLEOD (2005): Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Electronic reprint of our book originally published in 1994.
- INFRAS (2004): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. HBEFA Version 2.1. Bern, 2004.
- IVU UMWELT (2002): Automatische Klassifizierung der Luftschadstoff-Immissionsmessungen aus dem LIMBA-Meßnetz. FE-Vorhaben FKZ 200 42 265. Im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- IVU UMWELT (2005): Ursachenanalyse für den Anstieg der NO<sub>2</sub>-Immissionen an verkehrsnahen Messstellen. Endbericht. Auftraggeber: Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- IVU UMWELT (2006A): FLADIS Handbuch zu Version 3.0. IVU Umwelt GmbH, Freiburg.
- IVU UMWELT (2006B): Darstellung der landesweiten Immissionssituation in NRW auf der Basis von LUQS- und EURAD-Daten mit FLADIS. Im Auftrag des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen.
- IVU UMWELT (2008): IMMIS<sup>em/luft/lärm</sup> – Handbuch zur Version 4.0. IVU Umwelt GmbH, Freiburg.
- JANICKE (2007): LASAT 3.0 Dispersion Modell. Reference Book. Janicke Consulting.
- KLEINEBRAHM, M. & H. STEVEN (2005): Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren, Vorhaben FE 89.0133/2003/AP, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mai 2005.
- KLEINEBRAHM, M., L-E. SCHULTE, H. STEVEN (2008): ON-BOARD MESSUNGEN BEI EURO IV/V LKW, Vorhaben 204 45 144, im Auftrag des Umweltbundesamtes, 2008, noch nicht veröffentlicht.
- KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006A): Statistische Mitteilungen, Reihe 2, Fahrzeugbestand, Sonderheft 1, Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2006 nach Zulassungsbezirken.
- KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2006B): Statistische Mitteilungen, Reihe 2, Fahrzeugbestand, Sonderheft 4, Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2006 nach Herstellern und Handelsnamen sowie ausgewählten Merkmalen, Ländern, Fahrzeug- und Größenklassen.
- KRdL (2000): Umweltmeteorologie. Atmosphärische Ausbreitungsmodelle. VDI-Richtlinie 3945 Blatt 3. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL.
- KRdL (2007): Planung von Immissionsmessungen - Ermittlung der Unsicherheit räumlicher Beurteilungen der Luftqualität. VDI-Richtlinie 4280 Blatt 5 (Entwurf). Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL.
- LAMBRECHT, U. (2006): Ursachen der hohen NO<sub>2</sub>-Belastung in Innenstädten. Beitrag von primärem NO<sub>2</sub> aus dem Abgas und der Ozonchemie. S. 25-35. In: Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN - Normenausschuss KRdL (Hrsg.): KRdL-Expertenforum "Feinstaub und Stickstoffdioxid". KRdL-Schriftenreihe Band 36. Düsseldorf, 2006. ISBN 978-3-931384-55-5.
- LRP CHEMNITZ (2008): Luftreinhalteplan für die Stadt Chemnitz. Regierungspräsidium Chemnitz.
- LRP DRESDEN (2008): Luftreinhalte- und Aktionsplan für die Stadt Dresden. Regierungspräsidium Dresden.
- LRP GÖRLITZ (2008): Luftreinhalteplan für die Stadt Görlitz. Regierungspräsidium Dresden.
- LRP LEIPZIG (2005): Luftreinhalteplan für die Stadt Leipzig. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.

- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2007): R: A Language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-projekt.org>.
- ROMBERG, E., R. BÖSINGER, A. LOHMEYER, R. RUHNKE, E. RÖTH. (1996): NO-NO<sub>2</sub>-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 56 Nr. 6, S. 215-218.
- WIEGAND, G.; YAMARTINO, R. J. (1986): Development and Evaluation of Simple Models for the Flow, Turbulence and Pollutant Concentration Fields within an Urban Street Canyon. Atmospheric Environment 20 Nr. 11, 2137-2156.
- YUE, S. & C.Y. WANG (2004): The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. Water Resources Management, Vol. 18 No. 3 201-218.

## Impressum

**Herausgeber:** Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Internet: <http://www.smul.sachsen.de/lfulg>

### Autoren:

IVU Umwelt GmbH  
Volker Diegmann, Dr. Götz Wiegand,  
Dr. Lina Neunhäuserer, Anna Mahlau  
Mail: [volker.diegmann@ivu-umwelt.de](mailto:volker.diegmann@ivu-umwelt.de)



und

TÜV NORD Mobilität GmbH & CO. KG  
IFM - Antrieb / Emissionen  
Heinz Steven



**Redaktion:** siehe Autoren

**Endredaktion:** Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen  
Referat Luftqualität

**Redaktionsschluss:** März 09

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente

### Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.