LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE

Freistaat
SACHSEN

# Stickoxidemissionen von Kfz an Steigungsstrecken

Schriftenreihe, Heft 14/2017



# $NO_x$-Emissionen von PKW und schweren Nutzfahrzeugen an Steigungsstrecken

Gerrit Mutke, Tilo Roß, Hans Zellbeck, Annette Pausch, Andrea Hausmann, Uwe Wolf, Volker Dietz

Inhalt

**1 Ausgangssituation ..... 7**
1.1 Anlass ..... 7
1.2 Erkenntnisstand und Ziel der Untersuchung ..... 8
**2 Messprogramm ..... 17**
**3 Messergebnisse ..... 19**
3.1 PKW-Versuche ..... 19
3.2 Untersuchung der Nutzfahrzeuge ..... 23
**4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen ..... 26**
**Literaturverzeichnis ..... 27**

Abbildungsverzeichnis


Abbildung 1: Beiträge der Verursacher zur NOx-Konzentration in Dresden-Bergstraße ..... 7
Abbildung 2: Jahresmittelwerte der $NO_2$-Konzentration an stark belasteten Messstellen ..... 8
Abbildung 3: Straßenlängsneigung in den relevanten Abschnitten von Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße ..... 9
Abbildung 4: Situation an den Luftgütemessstationen Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße, Blickrichtung Stadtzentrum (bergab) ..... 9
Abbildung 5: Luftbild mit eingetragenen Messpunkten der Pegelzählstelle PZS0507 der Stadt Dresden in Höhe Mommsenstraße ..... 10
Abbildung 6: Kfz-Wochengänge Dresden-Bergstraße ..... 11
Abbildung 7: Vergleich der Wochengänge von Stickoxidkonzentrationen und Verkehrsbelegung ..... 12
Abbildung 8: Vergleich der Wochengänge von PM10-Konzentrationen und Verkehrsbelegung ..... 12
Abbildung 9: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten von PKW landwärts ..... 13
Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten von PKW landwärts ..... 13
Abbildung 11: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten von Lieferwagen landwärts ..... 14
Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten von Lieferwagen landwärts ..... 14
Abbildung 13: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten des Schwerverkehrs landwärts ..... 15
Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten des Schwerverkehrs landwärts ..... 15
Abbildung 15: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten des LKW-Verkehrs landwärts ..... 16
Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten des LKW-Verkehrs landwärts ..... 16
Abbildung 17: Höhenverlauf der für die Untersuchung relevanten Teilstrecke mit einem Abschnitt von 100 m, mit einer Steigung von 7 % ..... 17
Abbildung 18: Unterschiedliche Geschwindigkeiten an der Steigungsstrecke für das Fahrzeug mit dem 1.6 l Dieselmotor ..... 19
Abbildung 19: Abgegebene Motorleistung für die Fahrt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten ..... 20
Abbildung 20: Spezifische Stickoxidemissionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ..... 20
Abbildung 21: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die abgeforderte Motorleistung des PKW bei unterschiedlichen Steigungen, am Beispiel des Fahrzeuges mit dem 1.6 l Dieselmotor ..... 21
Abbildung 22: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 1.6l Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7 % ..... 21
Abbildung 23: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 3 l Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7% ..... 22
Abbildung 24: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 10.7 l Bus-Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7 % ..... 23
Abbildung 25: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 12.8 l LKW-Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7 % ..... 23
Abbildung 26: Gefahrene Geschwindigkeiten beim LKW-Versuch ..... 24
Abbildung 27: Gemessene Stickoxidkonzentrationen des entnommenen Abgasteilstromes beim LKW-Versuch ..... 24
Abbildung 28: Luftmassenstrom bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten für den LKW, mit 12.8 l Dieselmotor ..... 25
Abbildung 29: Stickoxidkonzentrationen bei dem Versuch mit dem 1.6 l Diesel-PKW ..... 25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Charakterisierung der Bedingungen an den beiden Luftgütemessstationen Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße ..... 9
Tabelle 2: Übersicht der untersuchten PKW ..... 18
Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Nutzfahrzeuge (Nfz) ..... 18

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| $C_{NOx}$ | Stickoxidkonzentration (im Abgas) |
| DPF | Dieselpartikelfilter |
| DTV | Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (Anzahl Kfz pro Tag) |
| g/km | Gramm pro Kilometer |
| IAD | Institut für Automobiltechnik |
| Kfz | Kraftfahrzeug |
| kg/h | Kilogramm pro Stunde |
| km/h | Kilometer pro Stunde |
| kW | Kilowatt |
| l | Liter |
| LfULG | Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie |
| LH | Landeshauptstadt |
| LNfz | Leichte Nutzfahrzeuge (< 3,5 t), Lieferwagen |
| m | Meter |
| mg/km | Milligramm pro Kilometer |
| $m_{Luft}$ | Luftmassenstrom |
| NEFZ | Neuer Europäischer Fahrzyklus |
| Nfz | Nutzfahrzeug |
| NN | Normal Null |
| NO | Stickstoffmonoxid |
| $NO_2$ | Stickstoffdioxid |
| $NO_x$ | Stickoxide |
| PEMS | Portable Emission Measurement System (mobiles Emissionsmessgerät) |
| PKW | Personenkraftwagen |
| PM10 | Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 10 Mikrometer |
| ppm | Teile pro Million (engl.: parts per million; Volumenanteil) |
| s | Sekunde |
| SCR | Selektive katalytische Reduktion (engl.: selective catalytic reduction) |
| SNfz | Schwere Nutzfahrzeuge (Lastwagen, Lastzüge, Sattelzüge) |
| TU | Technische Universität |
| VL | Volllast |
| WLTC | Weltweit harmonisierter Zyklus für leichte Fahrzeug<br>(engl.: Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycles;<br>verbindlich ab der Norm EURO 6c für PKW) |
| $\mu g/m^3$ | Mikrogramm pro Kubikmeter |

# 1 Ausgangssituation

## 1.1 Anlass

Die Städte Dresden, Leipzig und Chemnitz müssen die Luftreinhaltepläne u. a. wegen der fortgesetzten Grenzwertüberschreitung hinsichtlich der Einhaltung des in der 39. BImSchV festgelegten Jahresgrenzwertes für Stickstoffdioxid ($NO_2$; 40 µg/m$^3$) fortschreiben. Das LfULG ist im Rahmen der Aufstellung von Luftreinhalteplänen für die Abschätzung der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität zuständig (§ 10 Abs. 1 Nr. 1 SächsImSchZuVO).

Hauptverursacher für diese Grenzwertüberschreitungen ist der Straßenverkehr an der Bergstraße in Dresden z. B. zu mehr als 80 % (vgl. Abbildung 1). Bei der Beurteilung der Wirksamkeit von Maßnahmen gab es bisher keine Datengrundlagen für die Abschätzung des Effektes von Geschwindigkeitsbegrenzungen bzw. deren Kontrollen. Kritisch sind insbesondere Straßen mit starker Steigung und hohem Verkehrsaufkommen, wie z. B. die Bergstraße in Dresden und die Leipziger Straße in Chemnitz.

Das Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HAUSBERGER ET AL.) ermöglicht keine Aussagen zur Problematik, da es für Steigungen größer als 6 % keine Angaben enthält. Die Emissionsfaktoren für geringere Steigungen können nicht einfach extrapoliert werden. Es ist auch nicht erkennbar, welche Emissionsfaktoren tatsächlich im realen Straßenverkehr gemessen wurden und welche auf Modellierung beruhen.

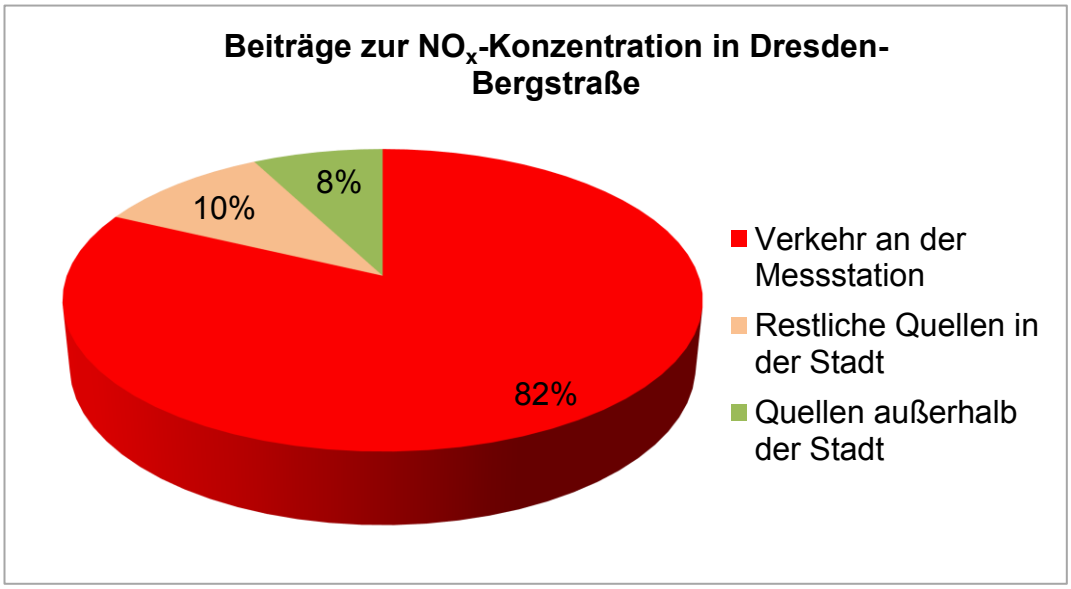



**Abbildung 1: Beiträge der Verursacher zur $NO_x$-Konzentration in Dresden-Bergstraße (LÖSCHAU ET AL., 2016)**

## 1.2 Erkenntnisstand und Ziel der Untersuchung

An der Luftgütemessstation Dresden-Bergstraße traten bisher die höchsten $NO_2$-Konzentrationen im sächsischen Luftgütemessnetz auf (vgl. Abbildung 2). Auch an Messstation Chemnitz-Leipziger Straße wurden bis zum Ausfall durch einen Verkehrsunfall am 20.09.2015 hohe $NO_2$-Konzentrationen gemessen. Wegen der erst am 01.04.2016 möglichen Wiederinbetriebnahme wurde die gemäß Abschnitt A Anlage 1 39. BImSchV erforderliche Mindestdatenerfassung von 90 % in den beiden Jahren 2015 und 2016 nicht erreicht. Es können deshalb keine gültigen Jahresmittelwerte berechnet werden.
Die Entwicklung der $NO_2$-Jahresmittelwerte seit 2005 zeigt den allmählichen Rückgang der Konzentrationen und die meteorologisch oder durch Änderung der lokalen Verhältnisse bedingten Schwankungen.

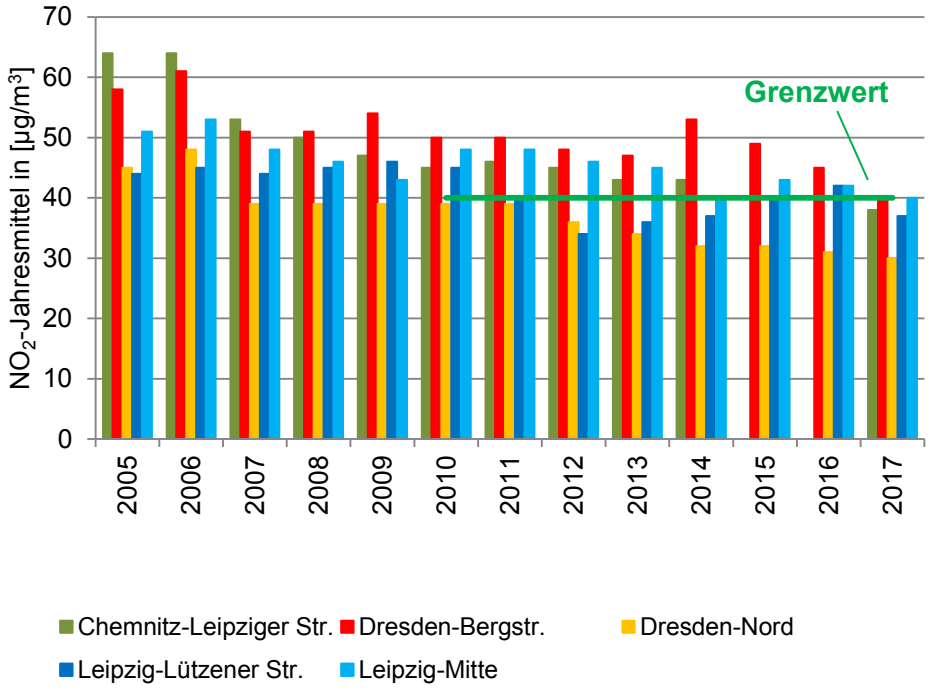
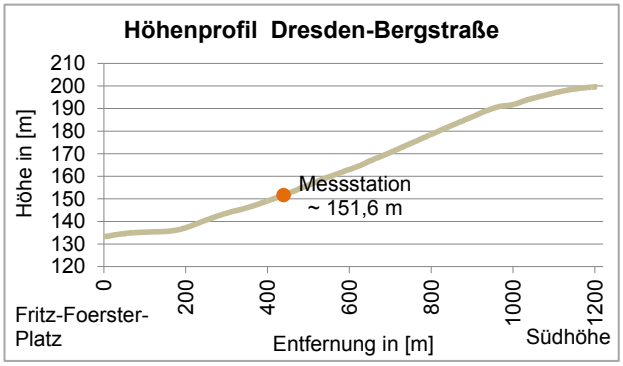



**Abbildung 2: Jahresmittelwerte der $NO_2$-Konzentration an stark belasteten Messstellen (PAUSCH ET AL., 2017, ergänzt)**

Die beiden Luftgütemessstationen Dresden-Bergstraße bzw. Chemnitz-Leipziger Straße unterscheiden sich durch ihre Lage an Ausfallstraßen mit starker bzw. moderater Steigung und hohem Verkehrsaufkommen von anderen Stationen im Messnetz. Tabelle 1 und Abbildung 3 enthalten einige Merkmale für die Bedingungen an beiden Standorten. Abbildung 4 vermittelt einen optischen Eindruck.
Die Stadt Dresden betreibt in Dresden-Bergstraße eine Pegelzählstelle (vgl. Abbildung 5), an der Anzahl und Fahrtgeschwindigkeiten nach Fahrzeugart und Fahrtrichtung differenziert erfasst werden. Diese Daten ermöglichen die im Folgenden dargestellten Auswertungen. Diese beziehen sich, wenn nicht anders angegeben, auf den Zeitraum vom 04.01. bis 26.12.2016. Dieser Zeitraum wurde gewählt, da für die Analyse von Feinstaub (PM10)-Wochengängen, die hier zum Vergleich mit dargestellt werden sollen, jeweils die Wochen mit Silvester und Neujahr wegen der durch Feuerwerk hervorgerufenen extrem hohen PM10-Konzentrationen nicht einbezogen werden dürfen.

**Tabelle 1: Charakterisierung der Bedingungen an den beiden Luftgütemessstationen Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße**

| Merkmal | Dresden-Bergstraße | Chemnitz-Leipziger Straße |
|---|---|---|
| Grundstück | Bergstraße 78-80 | Leipziger Straße 109 |
| Straßentyp | Bundesstraße, Autobahnzubringer | Bundesstraße, Autobahnzubringer |
| Längsneigung in Höhe der Messstation | Ca. 7 % | Ca. 1,7 % |
| Anzahl Fahrspuren | Je zwei pro Fahrtrichtung | Jeweils 2 pro Fahrtrichtung |
| DTV | 26:360 (Montag bis Sonntag, 2016 gemessen; LH DRESDEN) | 15:149 (Montag bis Freitag, 2011 modelliert; K. KLOPSCH) |
| Schwerverkehr | 1:006 (Montag bis Sonntag, 2016 gemessen; LH DRESDEN) | 1:002 (Montag bis Freitag, 2011 modelliert; K. KLOPSCH) |
| Höhe über NN in [m] | 150 | 327 |
| Lage der Luftgütemessstation | Neben Fahrspur bergauf | Neben Fahrspur bergab |
| Straßenbreite in [m] | 34 | 25 |
| Randbebauung in Höhe der Messstation | Beidseitig locker bebaut | Eine Seite durchgängig mehrstöckig bebaut, zweite Seite locker bebaut |



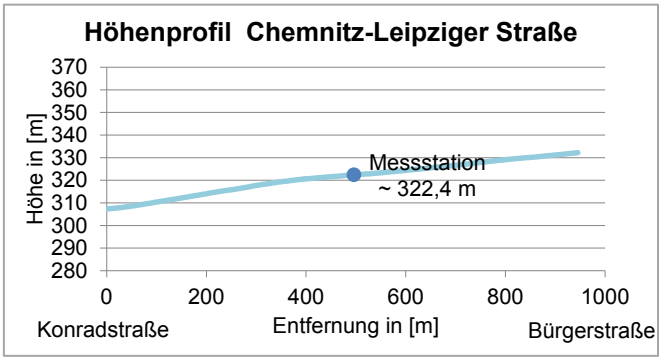




**Abbildung 3: Straßenlängsneigung in den relevanten Abschnitten von Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße** (Geobasisdaten: DGM2, © Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, http://www.geosn.de)





**Abbildung 4: Situation an den Luftgütemessstationen Dresden-Bergstraße und Chemnitz-Leipziger Straße, Blickrichtung Stadtzentrum (bergab)**




**Abbildung 5: Luftbild mit eingetragenen Messpunkten der Pegelzählstelle PZS0507 der Stadt Dresden in Höhe Mommsenstraße** (Luftbild: © Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, http://www.geosn.de)

Aus der Darstellung der Wochengänge für die Fahrzeugarten[1] (vgl. Abbildung 6) sind charakteristische Unterschiede erkennbar:

- Es fahren mehr PKW stadtwärts als landwärts.
- Deutlich ausgeprägte Verkehrsspitzen gibt es bei PKW früh stadtwärts und abends landwärts; außerdem noch eine niedrigere Verkehrsspitze stadtwärts am Abend.
- Bei LKW gibt es wochentags nur geringe Unterschiede in der Anzahl der Kfz pro Fahrtrichtung.
- Am Wochenende fahren etwas mehr LKW landwärts als stadtwärts.
- Sonnabends gibt es zwei LKW-Verkehrsspitzen.
- Wie zu erwarten fahren am Wochenende deutlich weniger Fahrzeuge als von Montag bis Freitag.

[1] Die Fallzahlen für sonstige Fahrzeuge sind gering und können Effekte durch Stau und Fahrspurwechsel enthalten. Eine Auswertung für diese Fahrzeugkategorie erfolgt deshalb nicht.

Die Wochengänge der Konzentrationen von NO, $NO_2$ und NOx stimmen mit dem der Anzahl von Kfz im Sinn des gleichzeitigen Anstiegs/Rückgangs der Werte gut überein (vgl. Abbildung 7). Bei den Wochengängen von PM10-Konzentrationen und Anzahl von Kfz ist der Zusammenhang weniger deutlich ausgeprägt (vgl. Abbildung 8). Dies liegt daran, dass die PM10-Konzentrationen im Mittel zu mindestens 50 % von regionalen/überregionalen Einträgen bestimmt werden. Auch die meteorologischen Bedingungen üben einen großen Einfluss aus. Trotzdem ist die bekannte zeitliche Verzögerung des Rückgangs der Konzentrationen bei Rückgang der Anzahl von Kfz und der Samstagabend-Effekt (Freizeitaktivitäten wie Heizung mit Festbrennstoffen im Winter und Grillen/Lagerfeuer im Sommer; PAUSCH ET AL.) deutlich erkennbar.

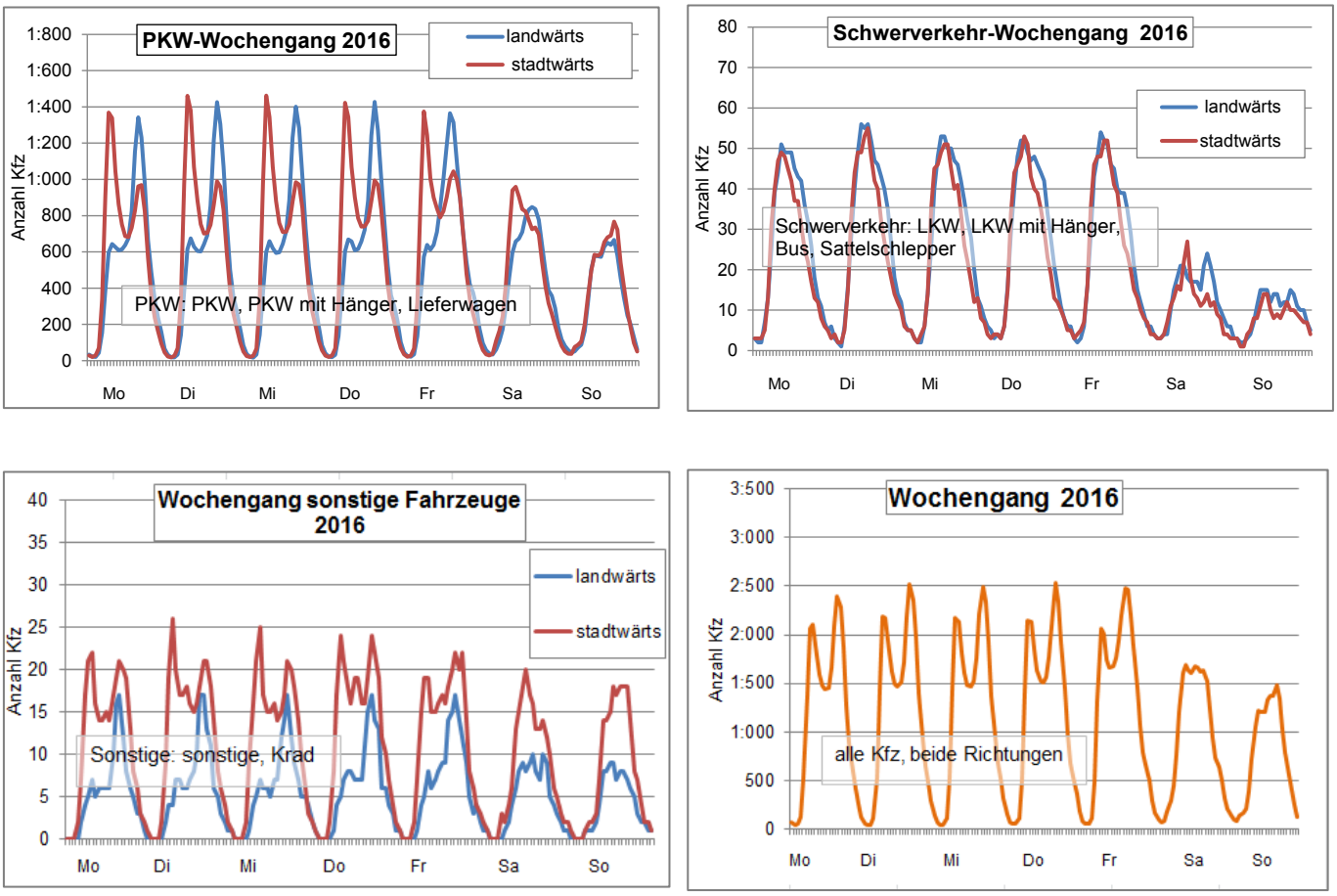



**Abbildung 6: Kfz-Wochengänge Dresden-Bergstraße**

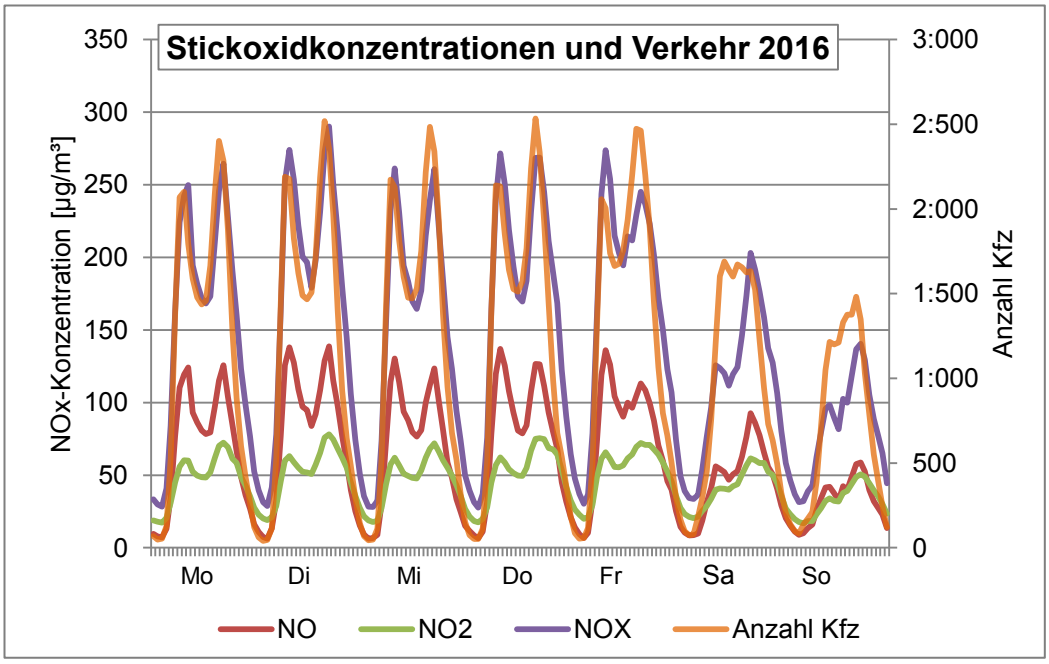



**Abbildung 7: Vergleich der Wochengänge von Stickoxidkonzentrationen und Verkehrsbelegung**

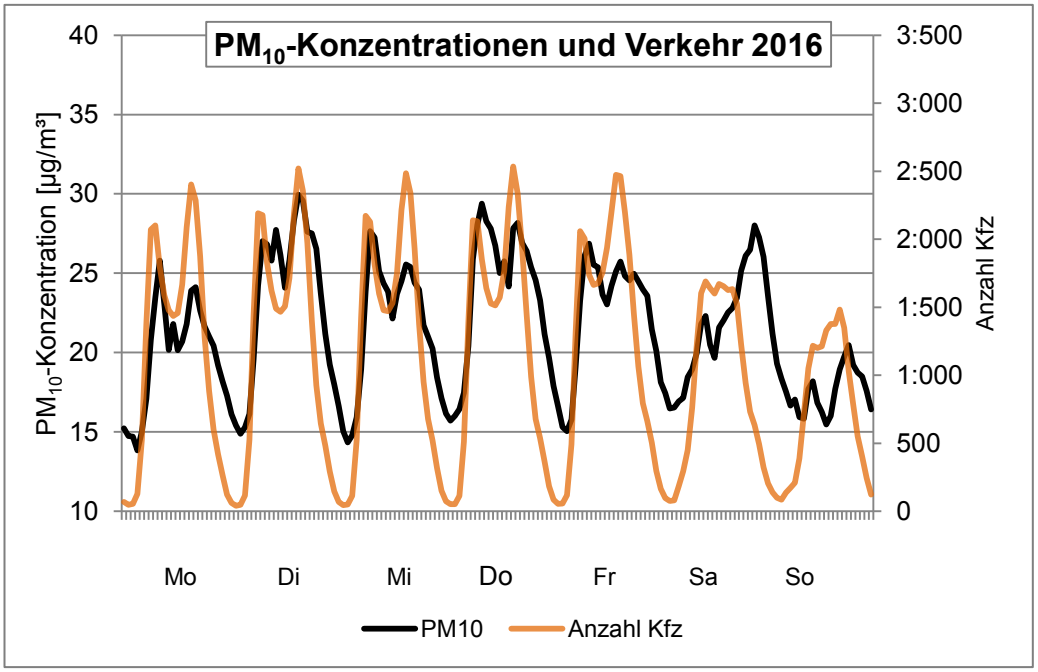



**Abbildung 8: Vergleich der Wochengänge von PM10-Konzentrationen und Verkehrsbelegung**

Die kursorische Durchsicht der von der Stadt Dresden gehaltenen Daten zu in Dresden-Bergstraße gefahrenen Geschwindigkeiten ergab, dass Geschwindigkeiten oberhalb der zulässigen 50 km/h relativ häufig registriert werden. Da für die Analyse dieser Daten kein automatisches Programm zur Verfügung steht, wurde ein geeigneter einzelner Wochentag (Mittwoch, der 29.03.2017) ausgewählt. An diesem Tag führen 12:655 PKW[2] landwärts, davon ca. 54 % mit einer Geschwindigkeit >50 km/h (vgl. Abbildung 9, Abbildung 10). Bei Lieferwagen waren es

[2] nur PKW, ohne PKW mit Hänger und Lieferwagen

1:084 Kfz, davon ca. 52 % schneller als 50 km/h (vgl. Abbildung 11, Abbildung 12). Es fuhren 706 Kfz Schwerverkehr, davon ca. 20 % zu schnell (vgl. Abbildung 13, Abbildung 14). Dies betraf insbesondere die LKW (insgesamt 293 Kfz, ca. 30 % zu schnell (vgl. Abbildung 15, Abbildung 16).

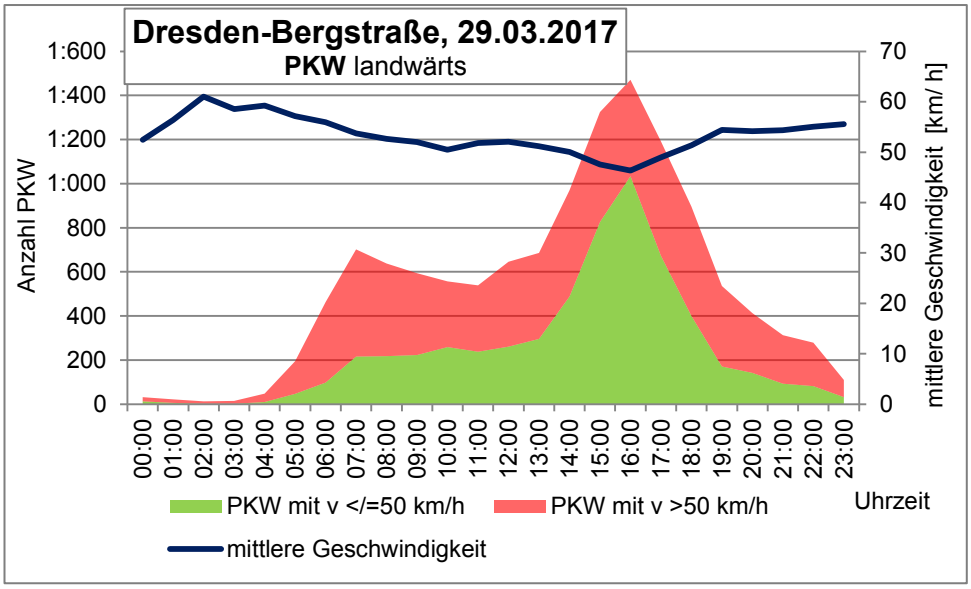



**Abbildung 9: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten von PKW landwärts**

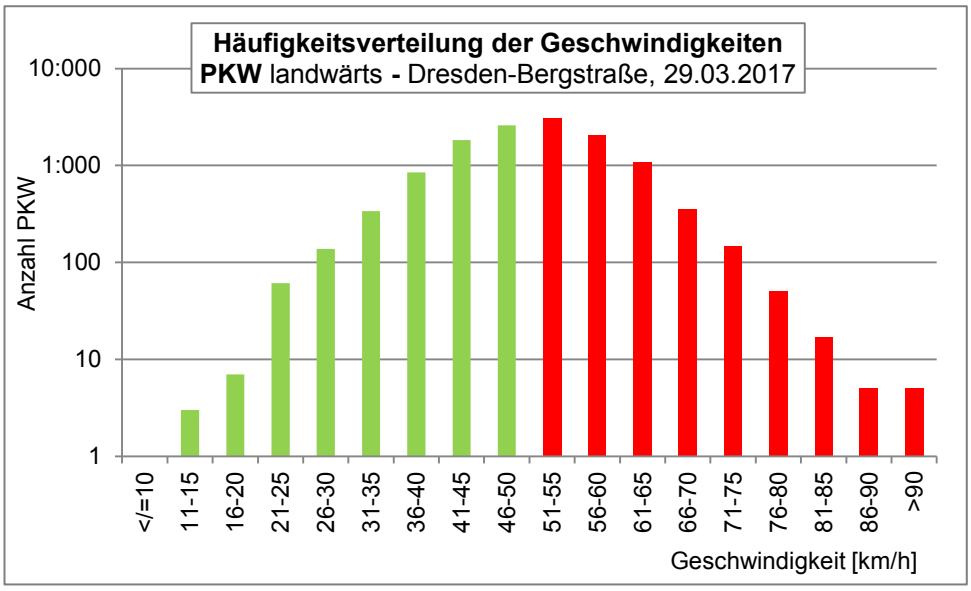



**Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten von PKW landwärts**

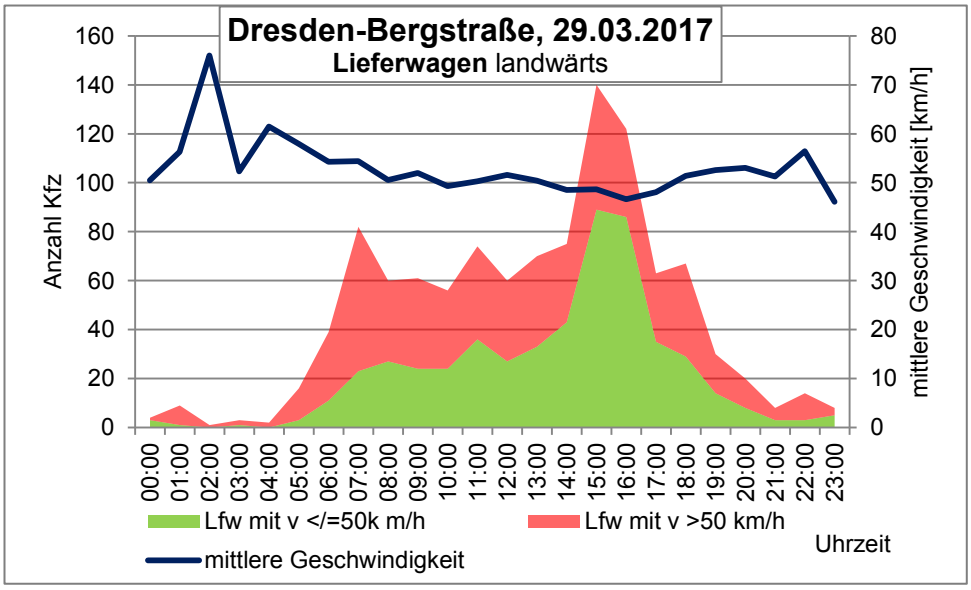



**Abbildung 11: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten von Lieferwagen landwärts**

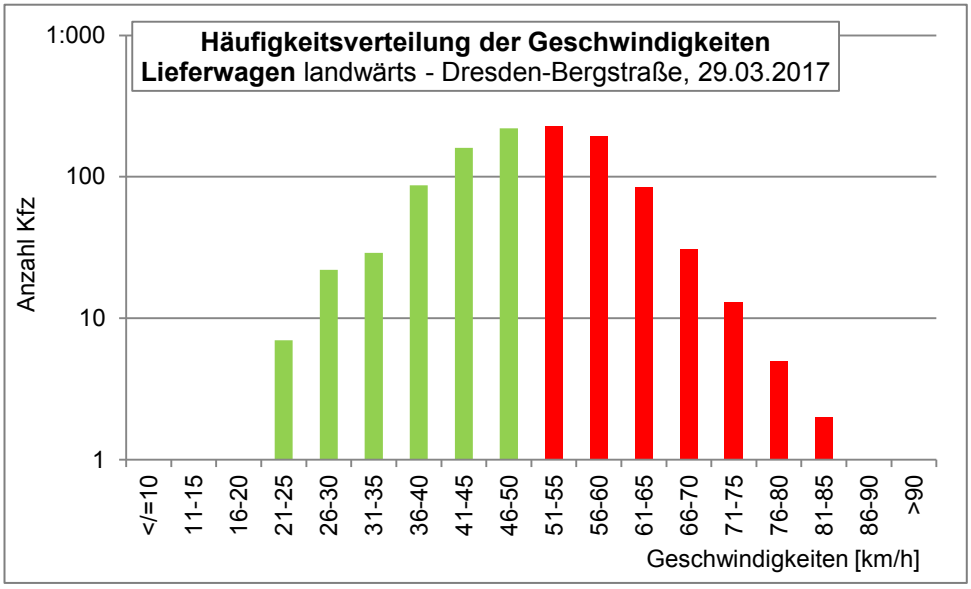



**Abbildung 12: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten von Lieferwagen landwärts**

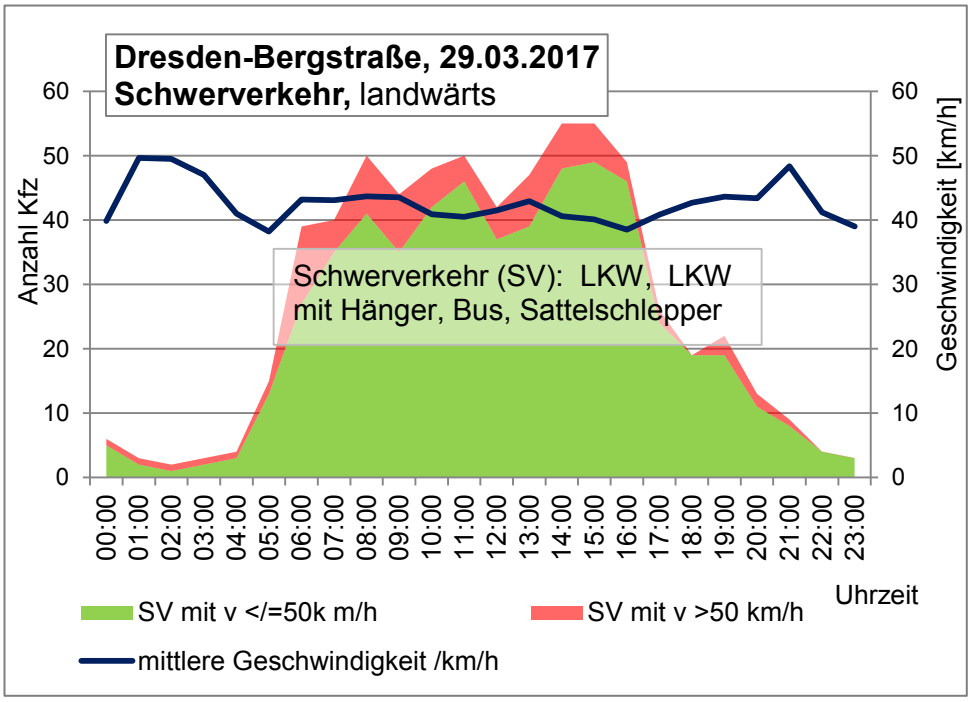



**Abbildung 13: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten des Schwerverkehrs landwärts**

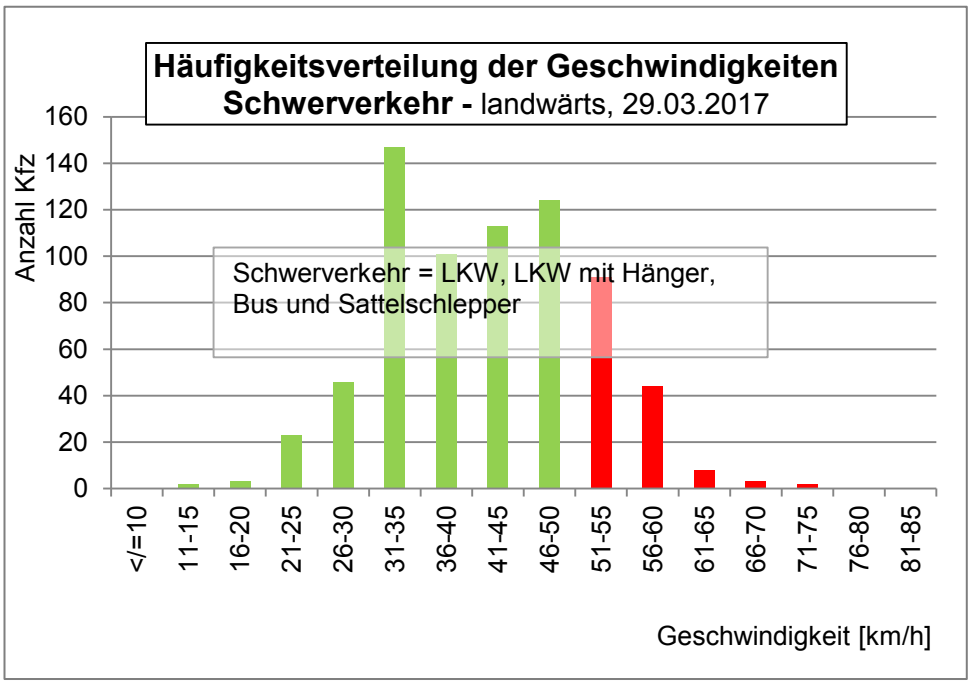



**Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten des Schwerverkehrs landwärts**

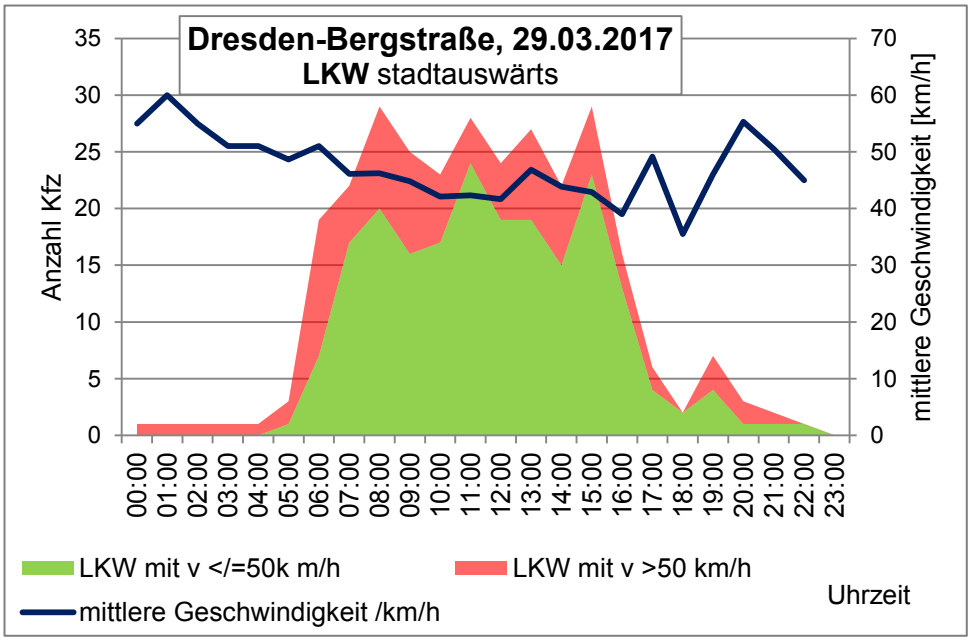



**Abbildung 15: Anzahl und Fahrgeschwindigkeiten des LKW-Verkehrs landwärts**

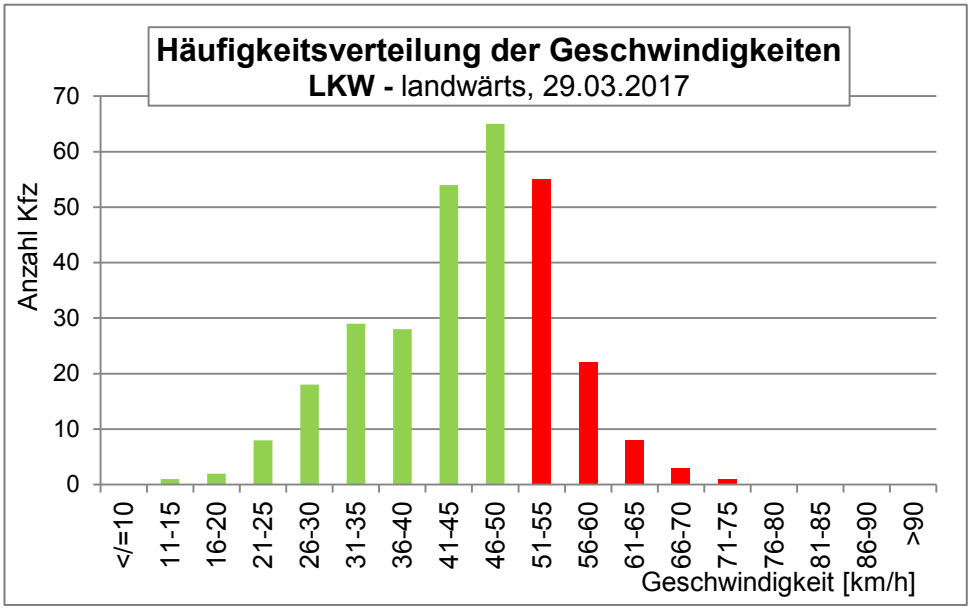



**Abbildung 16: Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten des LKW-Verkehrs landwärts**

# 2 Messprogramm

Zur Bewertung diverser Einflussfaktoren mit Fokus auf emittierte Stickoxidemissionen im Straßenverkehr, erfolgte ein umfangreiches Messprogramm am Lehrstuhl Verbrennungsmotoren der Technischen Universität Dresden. Neben einer Variation der Fahrzeugklassen, als auch deren Antriebskonzepte im PKW-Segment, wurde der Versuchsumfang durch Messungen im Nutzfahrzeugbereich vervollständigt. Um einen direkten Bezug zu der bereits genannten Emissionsmessstation in Dresden herzustellen, verfügt die ausgewählte Teststrecke über einen Abschnitt mit einem vergleichbaren Höhenprofil. In Abbildung 17 ist der zugehörige Höhenverlauf über der Wegstrecke dargestellt. Dieser wurde mittels eines GPS-Datenloggers während der Messkampagne aufgezeichnet und liegt für sämtliche Versuchsreihen zu Grunde.

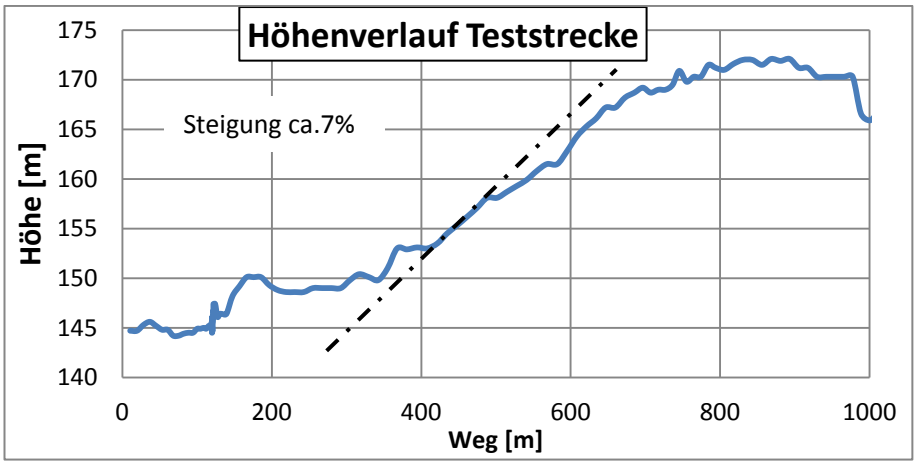



**Abbildung 17: Höhenverlauf der für die Untersuchung relevanten Teilstrecke mit einem Abschnitt von 100 m, mit einer Steigung von 7 %**

Der markierte Streckenbereich verfügt über eine mittlere Steigung von 7 % über ca. 100 m. Dieser Teilabschnitt dient als Bewertungsgrundlage für die gemessenen Stickoxidemissionen „End-of-Pipe“, am Endrohr des jeweiligen Versuchsfahrzeuges. Der dargestellte Streckenabschnitt gliedert sich in eine Rundstrecke ein, die für alle Versuche die gleiche Ausgangssituation bietet. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden unterschiedliche Fahrzeuge stichprobenartig und unabhängig vom Hersteller ausgewählt. Es wurden Vertreter verschiedener Fahrzeugklassen im PKW-Bereich und außerdem eine Auswahl an schweren Nutzfahrzeugen vermessen. Tabelle 2 beinhaltet eine Übersicht der untersuchten Kraftfahrzeuge. Diese repräsentieren stellvertretend typische Vertreter verschiedener Antriebs-, als auch Abgasnachbehandlungskonzepte. Neben einem typischen kleineren Vertreter des Dieselantriebs, mit 1.6 l Hubraum und 88 kW Leistung, ausgeführt mit $NO_x$-Speicherkatalysator, fiel die Wahl auf einen deutlich leistungsstärkeren 3.0 l Dieselmotor mit 180 kW und SCR-Katalysator. Ergänzend hierzu wurde ein 1.8 l Benzinmotor mit 132 kW Leistung und 3-Wege-Abgaskatalysator vermessen. Alle untersuchten Personenkraftfahrzeuge sind nach Euro VI zertifiziert und somit aktueller Stand der Technik.
Die Vermessung der Personenkraftwagen erfolgt mit 2 Insassen mit je 75 kg Gewicht und einer Zusatzbeladung von 130 kg in Form der eingesetzten Messtechnik.
Weiterer Schwerpunkt der Untersuchung ist die Vermessung einer Auswahl schwerer Nutzfahrzeuge an der Steigungsstrecke. Tabelle 3 zeigt die untersuchten Nutzfahrzeuge im Überblick.

**Tabelle 2: Übersicht der untersuchten PKW**

| | Untersuchte PKW | | |
|---|---|---|---|
| | Dieselfahrzeuge | | Benzinfahrzeug |
| **Merkmal** | **1.6 l Diesel** | **3.0 l Diesel** | **1.8 l Benziner** |
| Hubraum | 1.6 l | 3.0 l | 1.8 l |
| Leistung | 88 kW | 180 kW | 132 kW |
| Zylinderanzahl | 4 | 6 | 4 |
| Antriebsart | Front (7-Gang Automatik) | Allrad (7-Gang Automatik) | Front (7-Gang Automatik) |
| Kraftstoff | Diesel | Diesel | Benzin |
| Abgasnachbehandlung | OxiKat, DPF, $NO_x$-Speicher-Kat | OxiKat, DPF, SCR-Kat | 3-Wege Katalysator |
| Abgasnorm | EURO VI | EURO VI | EURO VI |
| Leergewicht | ca. 1 500 kg | ca. 1 900 kg | ca. 1 500 kg |
| Fahrzeugmasse bei der Untersuchung | 1 800 kg | 2 200 kg | 1 800 kg |
| Leistungsgewicht | 21 kg/kW | 12 kg/kW | 14 kg/kW |

**Tabelle 3: Übersicht der untersuchten Nutzfahrzeuge (Nfz)**

| | Untersuchte Nutzfahrzeuge | |
|---|---|---|
| | LKW | Linienbus |
| **Merkmal** | **LKW mit Auflieger** | **Stadt- Linienbus** |
| Hubraum | 12.8 l | 10.7 l |
| Leistung | 330 kW (450 PS) | 265 kW (360 PS) |
| Zylinderanzahl | 6 | 6 |
| Antriebsart | Heck (12/4-Gang Automatik) | 1 angetriebene Achse (6-Gang Automatik) |
| Kraftstoff | Diesel | Diesel |
| Abgasnachbehandlung | SCR-System | SCR-System |
| Abgasnorm | EURO VI | EURO VI |
| Leergewicht | ca. 8 000 kg (Zugfahrzeug) | ca. 16 500 kg |
| Fahrzeugmasse bei der Untersuchung | 39 000 kg | 18 700 kg |
| Leistungsgewicht | 118 kg/kW | 71 kg/kW |

Teil der Studie sind a) ein Linienbus, der einen 10.7l 6-Zylinder Dieselmotor mit 265 kW besitzt und b) ein LKW-Gespann mit Zugmaschine und Auflieger. Letzterer wird angetrieben von einem 12.8 l 6-Zylinder Dieselmotor mit 330 kW Leistung. Beide Nutzfahrzeuge sind ebenfalls nach EURO VI zertifiziert und besitzen jeweils ein Abgasnachbehandlungskonzept auf Basis eines SCR-Katalysators.
Die Beladung des Linienbusses beträgt 2.200 kg, was einer üblichen mittleren Fahrgastzahl von ca. 28 entspricht.
Das LKW-Gespann hat im Versuch ein Gesamtgewicht von ca. 39 Tonnen.
Als Messsystem zur Erfassung der Emissionskonzentration wir das vom Lehrstuhl Verbrennungsmotoren entwickelte LVM-PEMS Gen2 eingesetzt. Diese mobile Abgasmesseinheit ermöglicht die Aufzeichnung der vom Motor ausgestoßenen Emissionen. Neben den im Fokus stehenden Stickoxidemissionen werden auch weitere Kompo-

nenten des Abgases (Sauerstoff, Kohlenstoffmonoxid und -dioxid) erfasst. Die Probenahme erfolgt über eine Abgassonde, die am Endrohr befestigt wird. Es wird ein Teilmassestrom entnommen, dessen Bestandteile analysiert werden.
Ein GPS-Datenlogger liefert zuverlässige Angaben über die Position, Höhe und Fahrgeschwindigkeit des Testfahrzeugs. Der Vorteil des GPS-Datenloggers gegenüber der Nutzung der OBD-Schnittstelle zur Erfassung der Geschwindigkeit liegt in der vom Hersteller vollständig unabhängigen Messdatenerfassung. Sämtliche Versuchsreihen erfolgen im vorkonditionierten betriebswarmen Zustand des Fahrzeugs/Motors. Alle Fahrzeugklassenvertreter besitzen Automatikgetriebe und unterliegen im Versuch der Schaltstrategie des Herstellers. Sie war kein Bestandteil der Untersuchung und blieb im gesamten Versuchsumfang unbeeinflusst.

# 3 Messergebnisse

## 3.1 PKW-Versuche

Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung des Fahrzeugs mit dem 1.6 l-Dieselmotor jeweils für den Zeitbereich der Fahrt entlang der Steigung. Grau hinterlegt ist die resultierende Zeitspanne, welche das Versuchsfahrzeug zur Absolvierung des definierten Streckenabschnitts von 100 m mit einer Steigung von 7% benötigt. Diese Zeitspanne ist abhängig von der Geschwindigkeit. Für die Untersuchung wurden folgende Geschwindigkeitsstufen gewählt: 60, 50, 40 und 30 km/h. Aufgrund des Verkehrsaufkommens und verbleibender Fahrer-/Fahrzeugeinflüsse sind im Testabschnitt kleinere Abweichungen von der Sollgeschwindigkeit nahezu unvermeidbar.

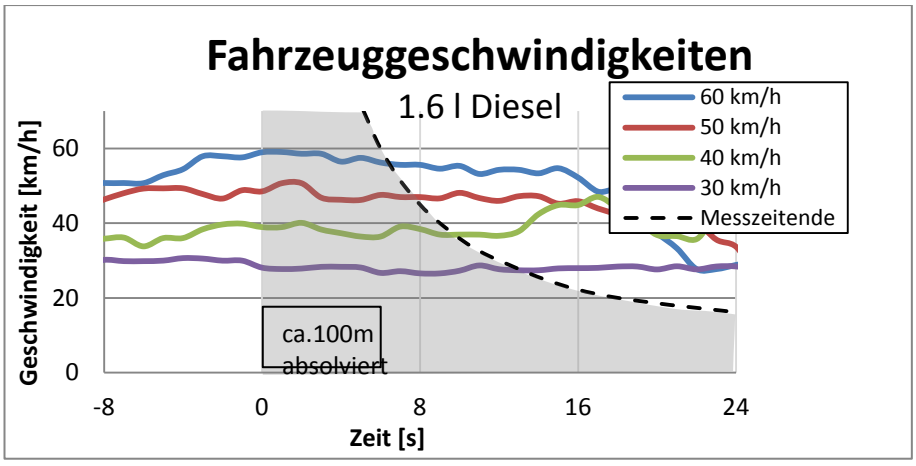



**Abbildung 18: Unterschiedliche Geschwindigkeiten an der Steigungsstrecke für das Fahrzeug mit dem 1.6 l Dieselmotor**

Aus den Messwerten ist ersichtlich, dass die Messfahrten im relevanten Zeitabschnitt bei jeweils etwa konstanter Fahrgeschwindigkeit absolviert wurden. Je größer die gefahrene Geschwindigkeit entlang der Steigungsstrecke, desto höher ist die von dem Motor abgeforderte Leistung. Abbildung 19 zeigt den Verlauf der Motorleistung. Im Diagramm ist lediglich der für die Emissionsbewertung relevante Abschnitt der Messwerte dargestellt. Dementsprechend sind die Messwerte für den Versuch mit 30 km/h in einem längeren Zeitabschnitt aufgetragen, als die Ergebnisse bei 60 km/h. Abbildung 20 zeigt den zugehörigen Stickoxidemissionsverlauf der jeweiligen gewählten Geschwindigkeitsstufe.

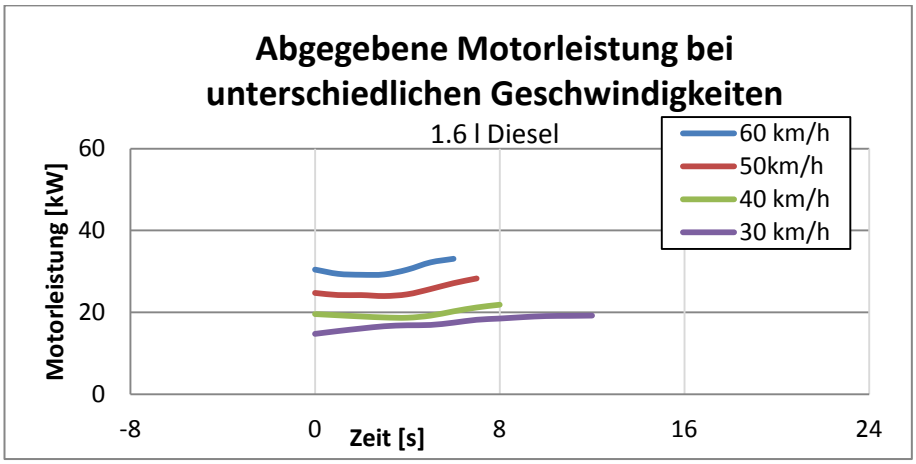



**Abbildung 19: Abgegebene Motorleistung für die Fahrt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten**

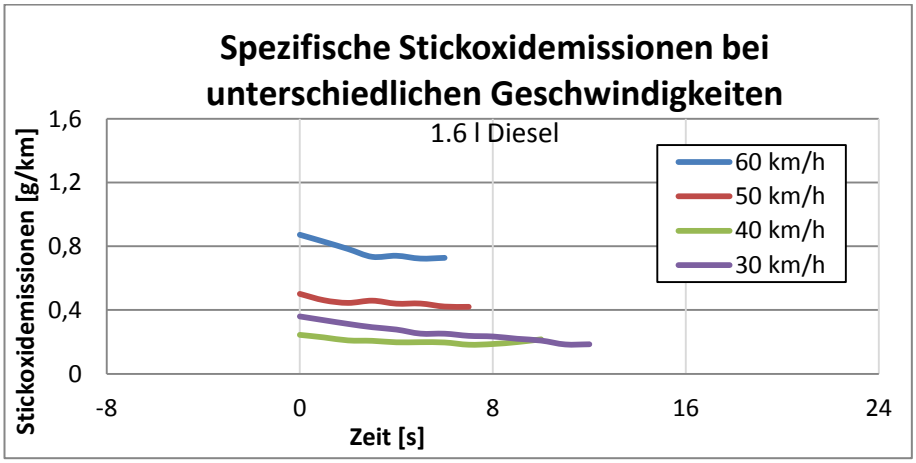



**Abbildung 20: Spezifische Stickoxidemissionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten**

Dargestellt sind die spezifischen Stickoxidemissionen bezogen auf eine Strecke von einem Kilometer, folglich angegeben in der Einheit [g/km]. Im relevanten Streckenabschnitt zeigen sich zum Teil deutliche Unterschiede in den Emissionsergebnissen. Mit der höchsten Geschwindigkeit wird auch die größte Menge an Stickoxidemissionen emittiert. Beim Vergleich von 60 km/h zu 50 km/h zeigt sich eine Steigerung um etwa den Faktor 2.

Abbildung 21 soll den dominierenden Einfluss der Steigung auf die abgerufene Motorleistung verdeutlichen, berechnet aus den Fahrwiderstandskenndaten und der Steigung der Strecke. Dargestellt ist der Leistungs(mehr)bedarf für das Fahrzeug mit dem 1.6 l Dieselmotor am Bergabschnitt mit 7% Steigung gegenüber einer Fahrt in der Ebene. In beiden Fällen ergibt sich über der Geschwindigkeit ein progressiver Verlauf, wobei sich unter Einfluss der Steigung ein deutlich höherer Leistungsbedarf ergibt.

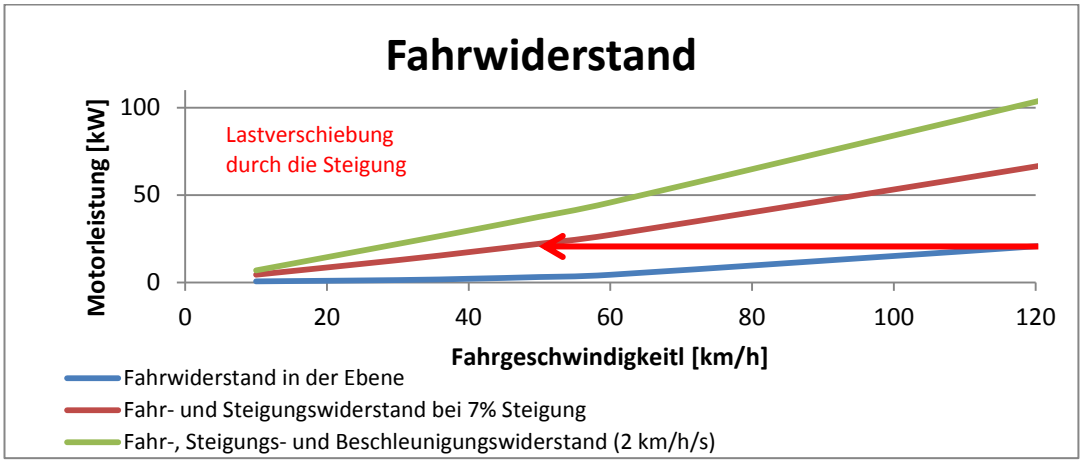



**Abbildung 21: Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die abgeforderte Motorleistung des PKW bei unterschiedlichen Steigungen, am Beispiel des Fahrzeuges mit dem 1.6 l Dieselmotor**

Diese Verschiebung hat zur Folge, dass dem Fahrzeug bei einer Fahrt bei einer 7 %-igen Steigung und einer Geschwindigkeit von 50 km/h die gleiche Leistung abgefordert wird, wie bei einer Fahrt in der Ebene mit ca. 125 km/h. Diese Daten entsprechen einer Konstantfahrt und berücksichtigen keine Beschleunigung entlang der Steigungsstrecke und verdeutlichten die Notwendigkeit der Berücksichtigung des Höhenprofiles im Streckenverlauf. In Abbildung 21 ist zusätzlich die Kennlinie aufgetragen, die sich ergibt, wenn als weiterer Fahrwiderstand (zur Steigung und Fahrgeschwindigkeit) eine konstante Beschleunigung des Fahrzeuges von 2 km/h/s berücksichtigt wird. Diese Beschleunigung entspricht ca. 0.5 m/s² und wurde vor dem Hintergrund gewählt, dass im zukünftigen Zertifizierungszyklus (WLTC) eine maximale Beschleunigung von 1.6 m/s² zu absolvieren ist. Bereits die angenommene, nur ein Drittel der zukünftig zu absolvierenden maximalen Beschleunigung zeigt bereits einen erheblichen Einfluss auf die abgerufene Motorleistung. Für den Betrieb des Motors bei höherer Last ist grundsätzlich ein weiterer Anstieg der erzeugten Abgasemissionen zu erwarten.

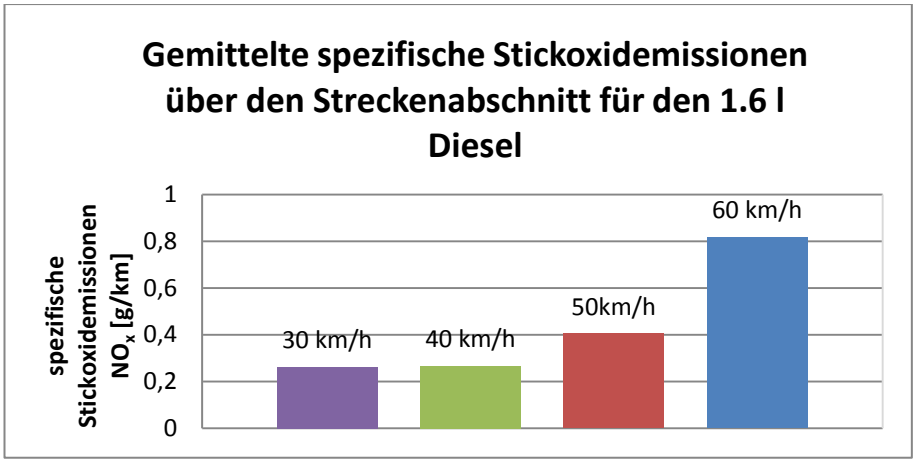



**Abbildung 22: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 1.6 l Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7 %**

Neben der Abbildung 20, die den Verlauf der Emissionen zeigt, stellt Abbildung 22 diese gemittelt über den Streckenabschnitt für die unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen dar. Die Untersuchung wurde für alle weiteren Fahrzeuge äquivalent durchgeführt.

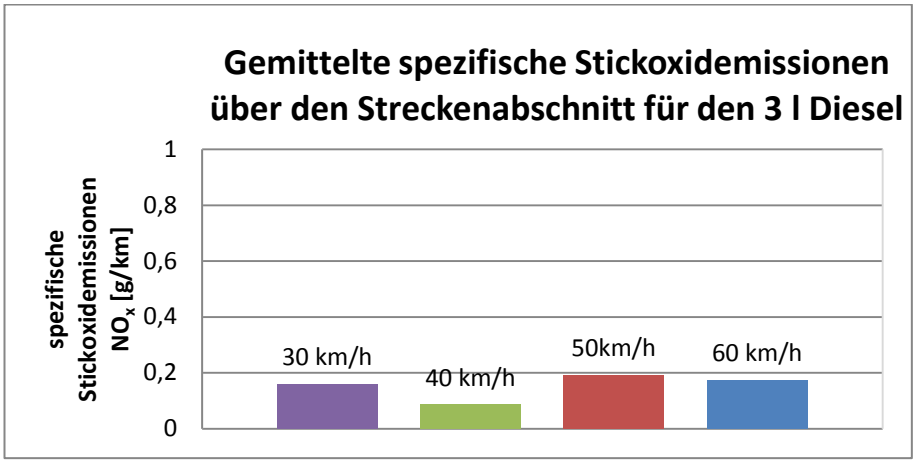



**Abbildung 23: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 3 l Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7%**

Abbildung 23 stellt die spezifischen Stickoxidemissionen für den 3.0 l Dieselmotor dar. Diese Messergebnisse zeigen, dass die Stickoxidemissionen für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen 80-190 mg/km liegen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einfluss unterschiedlicher Geschwindigkeitsstufen auf die Stickoxidemissionen auch beim 3.0 l Dieselmotor sichtbar wird, jedoch gegenüber dem 1.6 l Dieselmotor weitaus geringer ausfällt. Die auf die Maximalleistung bezogene relative abgeforderte Motorleistung fällt bei diesem leistungsstarken Aggregat kleiner aus. In Kombination mit dem eingesetzten Abgasnachbehandlungssystem ergibt sich (im vorliegenden Versuch) sogar eine Minderung der Stickoxidemissionen bei 60 km/h im Vergleich einer Fahrt mit 50 km/h.

Bei den Versuchen mit dem Benzinmotor können mit der eingesetzten Messtechnik keine Stickoxidemissionen gemessen werden. Die Ergebnisse mit dem Benzinmotor zeigen, dass dieses Antriebsaggregat aufgrund seiner Betriebsweise und der damit möglichen hocheffizienten Abgasnachbehandlung in der vorliegenden Ausführung keinen messbaren Beitrag zur Stickoxidemission liefert. Entsprechend diesem Verhalten, ist im Testszenario kein Einfluss hinsichtlich der gewählten Geschwindigkeitsstufe erkennbar.

## 3.2 Untersuchung der Nutzfahrzeuge

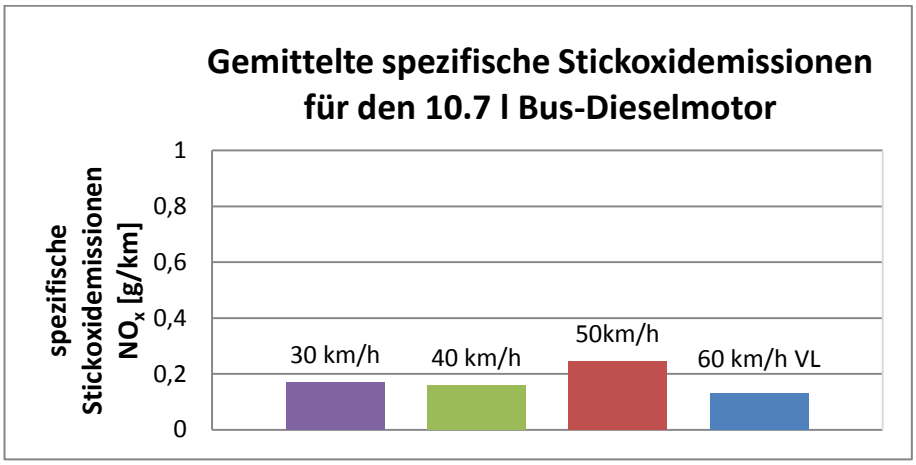



**Abbildung 24: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 10.7 l Bus-Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7 %**

Abbildung 24 stellt die Emissionsergebnisse für den vermessenen Stadtbus dar. Da bei diesem Versuchsträger der Luft- bzw. Abgasmassenstrom nicht aufgezeichnet werden konnte, wurde dieser anhand der erforderlichen Antriebsleistung (entsprechend der Fahrzeugmasse und Steigung der Versuchsstrecke, bezogen auf die Luftmenge und Leistung des LKWs) überschlägig berechnet. Diese Näherung ist möglich, da es sich bei beiden Fahrzeugen um ähnliche Motorenkonzepte (6-Zylinder Motor mit Turboaufladung) handelt. Bei den Busmessungen ergeben sich maximal gemessene Stickoxidkonzentrationen von 8 ppm. Die Messergebnisse zeigen, vergleichbar dem PKW mit 3.0 l Dieselmotor, keine eindeutige Tendenz, dass eine höhere Geschwindigkeit einen Anstieg der Emission bedingt. So ergibt sich im Versuch mit 60 km/h, was der Volllast des Fahrzeuges entspricht, eine geringere Stickoxidemission als bei der Fahrt mit 50 km/h.

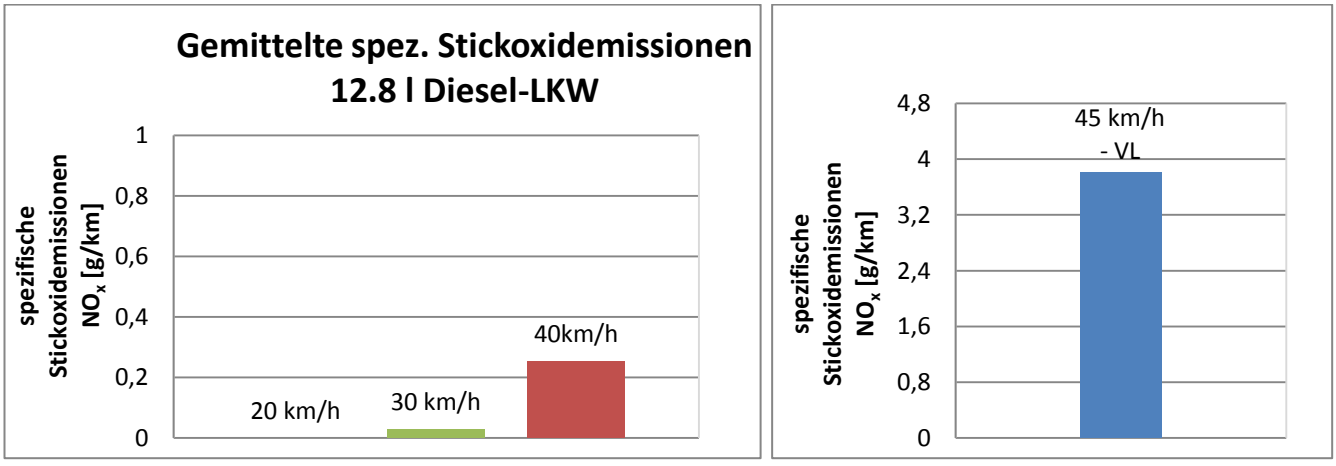



**Abbildung 25: Gemittelte spezifische Stickoxidemissionen für den 12.8 l LKW-Dieselmotor, bei einer mittleren Steigung von ca. 7 %**

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse der Messung mit dem LKW. Aufgrund der Beladung des Fahrzeugs konnte lediglich eine Höchstgeschwindigkeit von 45 km/h erreicht werden. Um dennoch aussagekräftige Daten zu erheben, wurde die Strecke zusätzlich mit einer Geschwindigkeit von 20 km/h absolviert. Die spezifischen Stickoxidemissionsergebnisse zeigen, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten ein geringer Stickoxidwert emittiert wird (bei 30 km/h nur

ca. 30 mg/km). Ausgehend von diesem niedrigen Niveau ist mit steigender Geschwindigkeit und Motorlast ein deutlicher Anstieg zu verzeichnen. Für 40 km/h liegt die Stickoxidemission bereits bei 250 mg/km (Faktor 8), für die Vollastfahrt ergibt sich bezogen auf diesen erhöhten Wert eine nochmalige Steigerung um den Faktor 14 auf 3,6 g/km.
Äquivalent zu der Darstellung der Fahrt mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten der PKW zeigt Abbildung 26 die Versuche mit dem LKW.

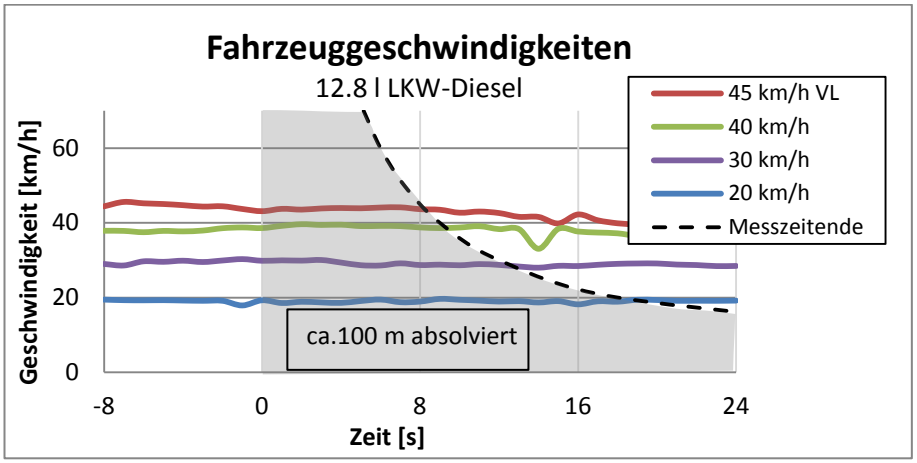



**Abbildung 26: Gefahrene Geschwindigkeiten beim LKW-Versuch**

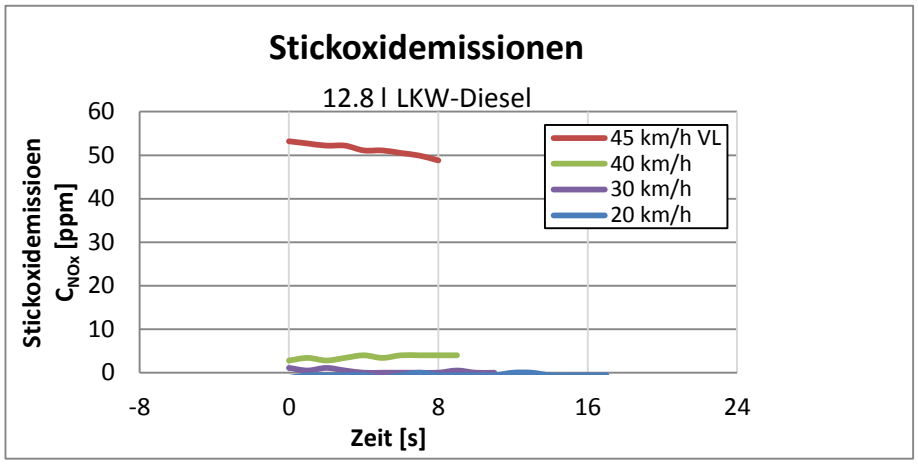



**Abbildung 27: Gemessene Stickoxidkonzentrationen des entnommenen Abgasteilstromes beim LKW-Versuch**

Abbildung 27 zeigt die gemessenen Stickoxidkonzentrationen für die Geschwindigkeitsstufen. Diese Ergebnisse verdeutlichen die effiziente Funktionsweise der Abgasnachbehandlung bei Nutzfahrzeugen. Die gemessenen Stickoxidemissionen, insbesondere bei 20, 30, 40 km/h liegen bei ca. 4 ppm und die der Volllast bei max. 55 ppm. Diese Konzentrationen liegen an der unteren Grenze des Messbereichs der verwendeten Messtechnik.

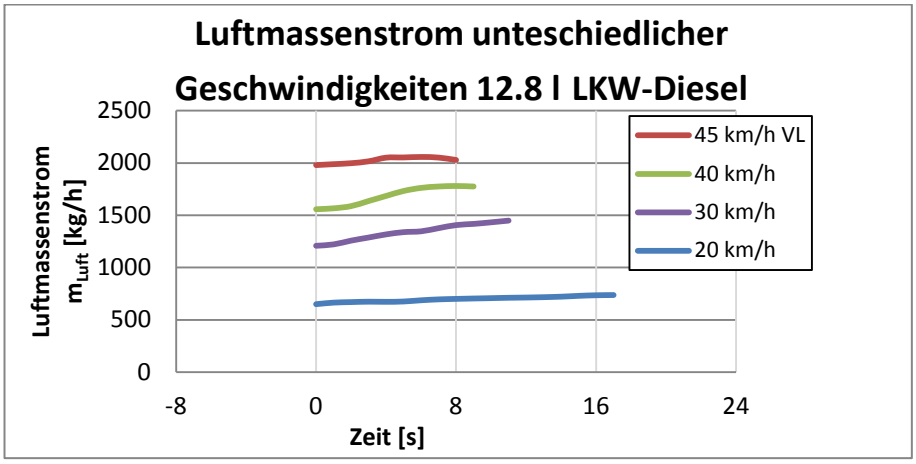



**Abbildung 28: Luftmassenstrom bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten für den LKW, mit 12.8 l Dieselmotor**

In die Berechnung der spezifischen Stickoxidemissionen geht der ermittelte Massenstrom des Abgases, der sich aus dem Luft- (vgl. Abbildung 28) und dem Kraftstoffmassenstrom zusammensetzt, in gleicher Weise wie die Stickoxidkonzentration proportional ein. Aus den geringen Konzentrationen und dem großen Massenstrom ergibt sich folglich die dargestellte Emissionsmenge. Im Vergleich zu den gemessenen Konzentrationen der LKW-Messung (Abbildung 27) zeigt Abbildung 29 die gemessenen Stickoxidkonzentrationen des Versuches mit dem 1.6 l PKW Dieselmotor. Die gemessenen Stickoxidkonzentrationen dieser Messreihe (keine Motorvollast) liegen mit einem Faktor bis zu 100 erheblich über denen der Nutzfahrzeuge bei vergleichbarer Motorbelastung. Selbst bei Motorvolllast fällt die Konzentration mit 55 ppm für den LKW und 8 ppm beim Bus signifikant niedriger aus.
Die Stickoxidkonzentrationen des 3.0 l Dieselmotors liegen zwischen 10-100 ppm.

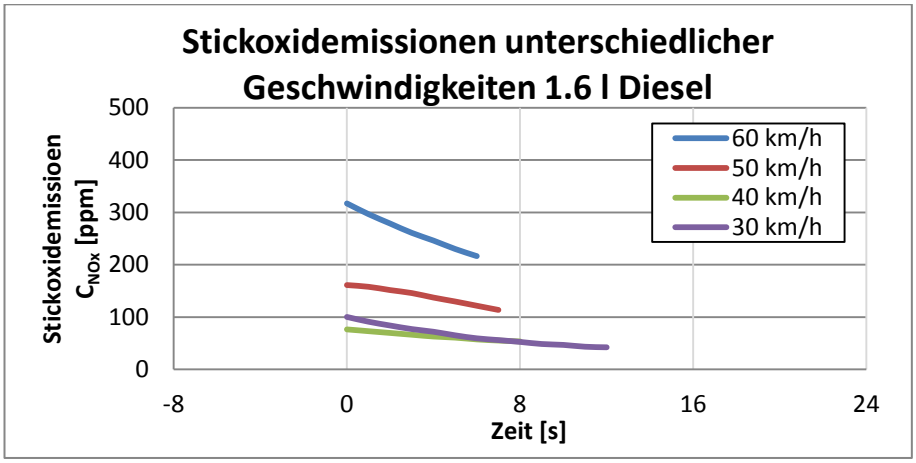



**Abbildung 29: Stickoxidkonzentrationen bei dem Versuch mit dem 1.6 l Diesel-PKW**

# 4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden ausgewählte Personenkraftwagen und schwere Nutzfahrzeuge in Hinblick auf die erzeugten Emissionen an Steigungsstrecken vermessen. Der Fokus liegt hier bei der Analyse der emittierten Stickoxidemissionen.

Die Analyse der Versuchsstrecke zeigt, dass die Leistungsabforderung von Fahrzeugmotoren an Steigungsstrecken sich deutlich von denen auf ebener Fahrbahn unterscheidet. Die Fahrt mit einem Mittelklasse-PKW entlang einer Steigungsstrecke mit 7 % Steigung und 50 km/h entspricht einer Fahrt auf ebener Strecke mit ca. 125 km/h. Dieses Verhältnis verdeutlicht, dass an Steigungsstrecken (wie der Versuchsstrecke) große Motorleistungen erforderlich sind. Bei einer Fahrt mit 60 km/h entlang der Steigungsstrecke ergeben sich äquivalente Motorleistungen einer Fahrt in der Ebene mit deutlich über 120 km/h. Diese Belastungen liegen außerhalb des Bereiches der Zertifizierung. Der bisherige Typprüfzyklus, der „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ), erfordert lediglich eine Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h auf ebener Strecke.

Die untersuchten PKW, insbesondere der 1.6 l PKW-Dieselmotor in Kombination mit der verbauten Abgasnachbehandlung, zeigen bei einer Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit an der Steigungsstrecke steigende Stickoxidemissionen. Je kleiner der eingesetzte Motor ist, desto größer ist die auf die Maximalleistung bezogene relative Leistung in Fahrmanövern wie der ausgewählten Steigungsstrecke. Das untersuchte Fahrzeug mit dem 3.0 l Dieselmotor zeigt zunächst eine ähnliche Tendenz. Bei steigender Motorleistung steigen die emittierten Stickoxidemissionen, jedoch fallen diese bei 60 km/h wieder. Hier zeigt sich, dass keine pauschale Aussage bezüglich der erzeugten Emissionen in Abhängigkeit der abgerufenen Motorleistung gegeben werden kann, ohne das Abgasnachbehandlungssystem einzubeziehen. Folglich können aus den Ergebnissen keine Rückschlüsse auf alle Fahrzeuge gezogen werden. Die Stickoxidemissionen des untersuchten Benzinmotors sind so gering, dass diese mit der eingesetzten Messtechnik nicht messbar sind. Die Ergebnisse der Vermessung der Nutzfahrzeuge zeigen, dass die auf den Kilometer berechneten spezifischen Stickoxidemissionen im Fall des Stadtbusses denen der PKW entsprechen und im Fall des LKW bei der Fahrt mit kleinen Geschwindigkeiten sogar kleiner ausfallen. Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die gemessenen Stickoxidkonzentrationen mit 1 - 55 ppm beim LKW und 1 - 8 ppm beim Bus sehr gering ausfallen und damit partiell an der Nachweisgrenze der eingesetzten Abgasmesstechnik liegen. Im Vergleich dazu liegen die gemessenen Stickoxidkonzentrationen der Versuche mit dem 1.6 l PKW Dieselmotor zwischen 80 - 300 ppm.

Das Leistungsgewicht ist bei den Nutzfahrzeugen mit 118 kg/kW beim LKW und 70 kg/kW beim Bus im Vergleich zu 12 - 21 kg/kW der untersuchten PKW um den Faktor 3 - 10 größer. Diese Kenngröße verdeutlicht, dass je kW Antriebsleistung die Nutzfahrzeuge in der Untersuchung ein bis zu Faktor 10 höheres Gewicht transportieren und dabei im Vergleich zu den untersuchten Personenkraftwagen ähnliche wegstreckenbezogenen Stickoxidemissionen aufweisen.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass bei ausgewählten Fahrzeugen die Abforderung hoher spezifischer Motorlasten signifikant steigende Stickoxidemissionen zur Folge hat. Die Analyse der Häufigkeitsverteilung der Fahrgeschwindigkeiten zeigt, dass eine Vielzahl an Verkehrsteilnehmern mit überhöhter Geschwindigkeit den relevanten Streckenabschnitt passiert. Eine Sicherstellung der Einhaltung der maximalen Geschwindigkeit trägt folglich zu einer Minderung der Abgasemissionen an der Steigungsstrecke bei. Darüber hinaus ist durch geeignete Maßnahmen der Verkehrsfluss im Streckenabschnitt so zu beeinflussen, dass potenziell emissionsträchtige Beschleunigungsphasen (Abforderung zusätzlicher Motorleistung) entlang der ohnehin von hoher Motorlast geprägten Steigungsstrecke vermieden werden.

# Literaturverzeichnis


HAUSBERGER, S.; MATZER, C.; KELLER, M.; WÜTHRICH PH.; NOTTER B.: Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA), http://www.hbefa.net/e/index.html, Projekt wird laufend fortgeschrieben

PAUSCH, A.; FRANKE, J.; HAUSMANN, A.; LÖSCHAU, G. (2017): Luftqualität in Sachsen, Jahresbericht 2016, Hrsg.: LfULG, https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/11388

K. KLOPSCH: Modelldaten Chemnitz, PTV Transport Consult GmbH im Auftrag der Stadt Chemnitz, Mitteilung per E-Mail am 14.06.2016

LH DRESDEN: Automatische Verkehrszählung, 2. Halbjahr 2016, Hrsg.: LH Dresden, Straßen- und Tiefbauamt, Abt. Verkehrssteuerung, Mitteilung per E-Mail von W. Nagel am 04.01.2017

LÖSCHAU, G; WOLF, U.; SCHREIBER, U.; PAUSCH, A.: Zuarbeit des LfULG (Verursacheranalyse) für die Fortschreibung des Luftreinhalteplanes Dresden an die Stadt Dresden, schriftliche Mitteilung, 02.12.2016

39. BIMSCHV: Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 10. Oktober 2016 (BGBl. I S. 2244), https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/BJNR106510010.html

SÄCHSIMSCHZUVO: Sächsische Immissionsschutz-Zuständigkeitsverordnung vom 26. Juni 2008 (SächsGVBl. S. 444), zuletzt geändert durch die Verordnung vom 30. Dezember 2015 (SächsGVBl. 2016 S. 20), https://www.revosax.sachsen.de/vorschrift/10289-Saechsische-Immissionsschutz-Zustaendigkeitsverordnung

**Herausgeber:**
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

**Autoren:**
Gerrit Mutke, Dr. Tilo Roß, Prof. Dr. Hans Zellbeck (TU Dresden,
Lehrstuhl Verbrennungsmotoren, Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD))
Annette Pausch, Dr. Andrea Hausmann, Uwe Wolf (LfULG)
Volker Dietz (Landeshauptstadt Dresden)
TU Dresden, IAD; George-Bähr-Str. 1c (Jante-Bau), 01069 Dresden
Telefon: +49 351 463 36225
Telefax: +49 351 463 37029
E-Mail: gerrit.mutke@tu-dresden.de

**Redaktion:**
Dr. Andrea Hausmann
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5100
Telefax: +49 351 2612-5099
E-Mail: andrea.hausmann@smul.sachsen.de

**Fotos:**
Abbildung 5: Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen;
Titel und Abbildung 4: Luftgütemessstationen Dresden-Bergstraße
und Chemnitz-Leipziger Straße (alle Fotos: B. Lehmann/LfULG)

**Redaktionsschluss:**
28.12.2017

**ISSN:**
1867-2868

**Hinweis:**
Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/29877 heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**
Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.
Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.
Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.
Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.