

Bericht

Untersuchungen zur Auswirkung von verkehrsbezogenen Maßnahmen auf die Luftqualität in ausgewählten Städten in Baden-Württemberg

hier: Freiberg Tempo 30

Untersuchungen zur Auswirkung von verkehrsbezogenen Maßnahmen auf die Luftqualität in ausgewählten Städten in Baden-Württemberg

hier: Freiberg, Tempo 30

Abschlussbericht August 2011

(rps2010t30)

Bearbeitung:

Federführung: AVISO
Dipl.-Ing. Arnold Niederau
Dr.-Ing. Christiane Schneider
Dr. rer. nat. Nicola Toenges-Schuller
Dipl.-Umw. Torsten Greis
Michael Nacken

PHEM-Berechnungen: TU Graz
Prof. Dr. Stefan Hausberger
Dipl.-Ing. Raphael Luz

Immissionsberechnungen: Ingenieurbüro Rau
Dipl.-Ing. Matthias Rau

Mikrosimulation: TraffGo Road GmbH
Dr. rer. nat. Joachim Wahle
Dipl.-Phys. Michael Klocke

Aachen. August 2011

Im Auftrag des Regierungspräsidium Stuttgart Abteilung Umwelt, Baden-Württemberg

AVISO GmbH

Am Hasselholz 15
52074 Aachen
Fon: +49 (0) 241 / 470358-0
Fax: +49 (0) 241 / 470358-9

E-Mail: info@avisogmbh.de
<http://www.avisogmbh.de>



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
2 Messfahrten	2
2.1 Die Messstrecke	2
2.2 Auswertung der Fahrten	4
2.3 Verkehrliche Grundlagedaten	9
2.4 Auswertung der dynamischen Fahrtparameter.....	11
3 Emissionsberechnung.....	15
3.1 Modell PHEM.....	15
3.2 Mittlere Ganglinien der Emissionsfaktoren	15
3.3 Emissionsfaktoren NO _x und PM10-Abgas	22
3.4 Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren zu HBEFA3.1	27
3.5 Jahresemissionen	29
4 Weitere Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs	34
4.1 Maximales Potential für eine Verkehrsverflüssigung	34
Auswirkungen eines Abschaltens der Fußgängerbedarfs-LSA	36
4.2 Wirkungen von Linksabbiegeverboten in Nebenstraßen	37
5 Grundlagen der Immissionsberechnung	39
5.1 Einleitung	39
5.2 Das Screeningmodell.....	39
5.3 Festlegung der Bebauungsstrukturen.....	40
5.4 Möglichkeiten und Grenzen des Screening-Modells.....	41
6 Berechnung statistischer Kenngrößen der Immissions-Gesamtbelastung	42
6.1 Windstatistik.....	42
6.2 Hintergrundbelastung.....	44
6.3 Beurteilungsgrundlage.....	44

6.4	Bestimmung der Gesamtbelastung.....	45
6.5	Berechnung von Kurzzeitwerten der Gesamtbelastung.....	45
7	Ergebnisse und Bewertung der Immissionsberechnungen.....	47
8	Zusammenfassung.....	50
	Literaturverzeichnis	52

Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Lage der Messstrecke entlang der Ortsdurchfahrten Freiberg.....	2
Bild 2.2:	Fotos entlang der Messstrecken, Lage: siehe Übersichtskarte in Bild 2.1	3
Bild 2.3:	Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung Osten : T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten..	5
Bild 2.4:	Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung Westen : T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten..	6
Bild 2.5:	Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung Norden : T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten..	7
Bild 2.6:	Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung Süden : T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten..	8
Bild 2.7:	Jahresmittlere durchschnittliche Verkehrsstärken (DTV) für Kfz-gesamt und die schweren Nutzfahrzeuge (sNfz) auf den Messstrecken in Freiberg Analyse 2010 (mit Lkw-Durchfahrtsverbot).....	10
Bild 3.1:	Das Modell PHEM zur Erstellung der Basis-Emissionsfaktoren in HBEFA3.1, Quelle: TU Graz, 2010	16
Bild 3.2:	Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für Pkw in Richtung Osten ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht	18
Bild 3.3:	Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für sNfz in Richtung Osten ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht	18
Bild 3.4:	Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für Pkw in Richtung Westen ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht.....	19
Bild 3.5:	Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für sNfz in Richtung Westen ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht.....	19

Bild 3.6: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für Pkw in Richtung Norden ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht.....	20
Bild 3.7: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für sNfz in Richtung Norden ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht.....	20
Bild 3.8: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für Pkw in Richtung Süden ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht	21
Bild 3.9: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO _x - und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für sNfz in Richtung Süden ; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht	21
Bild 3.10: Vergleich der warmen NO _x -Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „Distributor 50 km/h“ mit unterschiedlichen Störungsgraden aus HBEFA3.1 mit den mittleren („warmen“) Emissionsfaktoren abgeleitet aus den Messfahrten für Pkw und sNfz für die Ortsdurchfahrten in Freiberg.....	28
Bild 3.11: Vergleich der warmen PM10-Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „Distributor 50 km/h“ mit unterschiedlichen Störungsgraden aus HBEFA3.1 mit den mittleren („warmen“) Emissionsfaktoren abgeleitet aus den Messfahrten für Pkw und sNfz für die Ortsdurchfahrten in Freiberg.....	28
Bild 3.12: Jahresemission (oben: NO _x , unten: PM10 (gesamt)) unter Berücksichtigung von Kaltstarts sowie Aufwirbelung und Abrieb für die Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (angenommener Befolgungsgrad: 100%)	33
Bild 4.1: Exemplarische Darstellung der „Verflüssigung“ der Fahrprofile und der Auswirkungen auf die NO _x - Emissionsfaktoren	35
Bild 6.1: Die für die Immissionsbestimmung gewählte Häufigkeitsverteilung (% der Jahresstunden) der Windrichtungen (°) im Raum Freiberg; Basis: Windmessdaten der LUBW-Station Ludwigsburg.....	43
Bild 7.1: Zusammenstellung der für die betrachteten Straßenabschnitte und Szenarien berechneten maximal zu erwartenden Jahresmittelwerte für NO ₂ in µg/m ³ sowie Änderungen gegenüber dem Basisfall T50 in [%].....	49

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Beschreibung der Teilabschnitte der Ortsdurchfahrten.....	3
Tab. 2.2: Anzahl der durchgeführten Messfahrten nach Art und Richtung.....	4
Tab. 2.3: Jahresmittlere durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV) und zugehörige Anteile der Fahrzeugarten.....	10
Tab. 2.4: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung Osten) .	12
Tab. 2.5: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung Westen)	12
Tab. 2.6: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung Norden)	13
Tab. 2.7: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung Süden)	13
Tab. 3.1: Flottenzusammensetzung auf Innerortsstraßen für Freiberg für die Fahrzeuggruppen Pkw, INfz und sNfz im Bezugsjahr 2010.....	17
Tab. 3.2: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung Osten , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)	23
Tab. 3.3: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung Westen , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)	23
Tab. 3.4: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung Norden , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1).....	24
Tab. 3.5: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung Süden , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1).....	24
Tab. 3.6: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für PM₁₀ (Abgas) in Fahrtrichtung Osten , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)	25
Tab. 3.7: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für PM₁₀ (Abgas) in Fahrtrichtung Westen , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)	25

Tab. 3.8: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für PM10 (Abgas) in Fahrtrichtung Norden , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1).....	26
Tab. 3.9: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für PM10 (Abgas) in Fahrtrichtung Süden , abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1).....	26
Tab. 3.10: „Warme“ Abgas-Emissionen (NO _x und PM10, Abgas) für die Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1).....	30
Tab. 3.11: Zusammensetzung der Jahresemissionen (NO _x und PM10) für die Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile	31
Tab. 3.12: Jahresemissionen (NO _x und PM10 inklusive Kaltstartzuschlägen sowie Aufwirbelung und Abrieb), richtungsgetreunt für die Teilstrecken der Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (angenommener Befolgungsgrad: 100%, Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1).....	32
Tab. 4.1: Maximale Verkehrsverflüssigung: Jährliche NO _x - und PM10 (gesamt)-Emissionen für die originalen T50-Fahrprofile sowie für „verflüssigte“ Fahrprofile ohne eliminierbare Störungen (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1).	35
Tab. 4.2: Verkehrsverflüssigung durch Abschalten der Bedarfs-LSA: Jährliche NO _x - und PM10 (gesamt)- Emissionen für die originalen T50-Fahrprofile sowie für Profile ohne Halte an Fußgängerbedarfs-LSA (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1)	36
Tab. 4.3: RPA und mittlere Geschwindigkeit v_m der simulierten Fahrprofile auf den Messstrecken, jeweils T50 Normalfahrt und T50 mit Unterdrückung der Linksabbieger ohne eigene Abbiegespur in Nebenstraßen (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1).....	38
Tab. 6.1: Lufthygienische Grenzwerte der EU-Richtlinie (39. BImSchV) für die verkehrsrelevanten Luftschadstoffe NO ₂ und PM10	44
Tab. 7.1: Zusammenstellung der für die betrachteten Straßenabschnitte und Szenarien berechneten maximal zu erwartenden Jahresmittelwerte für NO ₂ und PM10 in µg/m ³ sowie Änderungen gegenüber dem Basisfall T50.....	47

1 Einleitung

Für die Ortsdurchfahrten in Freiberg (West-Ost-Richtung: L 1138: Mühlstraße, Benninger Straße, sowie Nord-Süd-Richtung: L 1129: Ludwigsburger Straße) wird die Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 30 km/h im Rahmen der Luftreinhalteplanung diskutiert.

Die Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung innerorts von 30 km/h auch auf Hauptverkehrsstraßen (HVS) wird in jüngster Zeit immer wieder diskutiert, um Überschreitungssituationen von PM₁₀ und/oder NO₂ zu beheben oder zumindest zu entschärfen. Einer Pressemitteilung des Umweltbundesamtes war jüngst zu entnehmen, dass durch die Einführung von 30 km/h im Vergleich zu 50 km/h eine Verminderung bei PM₁₀ um 10 Überschreitungstage erreichbar sei. Diese Aussage gründet sich allerdings auf nur einen Feldversuch in Berlin (im Wesentlichen auf die Schildhornstraße). Aus früheren Jahren liegen einige wenige Untersuchungen zum Einfluss eines Tempolimits innerorts auf die Luftqualität vor, die in der Regel unter speziellen Randbedingungen durchgeführt wurden.

Ziel des vorliegenden Gutachtens ist es, für die spezielle Situation an den Ortsdurchfahrten in Freiberg eine Aussage zum Einfluss eines Tempolimits T30 auf die PM₁₀- und NO_x-Emissions- und Immissionsbelastung abzuleiten.

Die zentrale Datenbasis zur Berechnung von Emissionen des Straßenverkehrs, das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA3.1), enthält auch in der aktuellsten Version vom Februar 2010 keine Emissionsfaktoren, die die Situation T30 an Hauptverkehrsstraßen abbildet (sondern nur Emissionsfaktoren für Tempo30-Zonen mit Rechts-vor-Links-Regelung).

Es besteht aber die Möglichkeit mit Hilfe von Simulationsprogrammen Fahrprofile, die im realen Verkehr erhoben wurden (z.B. T50 und T30 "fiktiv"), emissionsseitig „nachzufahren“. Über ein solches Programm (PHEM) verfügt die TU Graz. Mit diesem Programm wurden auch wesentliche Datengrundlagen des HBEFA3.1 ermittelt.

Zur Ermittlung der Situation an den Ortsdurchfahrten Freiberg wurden daher Messfahrten für „T50-Normalfahrt“ und „T30-fiktiv“ durchgeführt und basierend auf den erhobenen Fahrzyklen mit dem Modell PHEM die Abgasemissionen für diese Fahrprofile berechnet. Darüber hinaus wurden die Auswirkungen weiterer Maßnahmen zur Verkehrsverflüssigung auf die Emissionen untersucht.

Aufbauend auf den so bestimmten Emissionen wurden schließlich mit dem Screening-Modell ISIS Immissionsbelastungen entlang der zu untersuchenden Ortsdurchfahrten für T50, T30 sowie für den verstetigten Verkehrsfluss berechnet.

2 Messfahrten

Am 29.9.2010 wurden in Freiberg in allen Tageszeitbereichen zwischen 6 Uhr morgens und 22 Uhr abends mit einem Pkw Messfahrten zur Bestimmung der Auswirkung einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 30 km/h entlang der Ortsdurchfahrten durchgeführt. Zusätzlich wurden manuelle Kurzzeitmessungen mit Differenzierung nach Fahrzeugarten durchgeführt und die Strecke mit Video und Digitalkamera erfasst und dokumentiert.

2.1 Die Messstrecke

Die untersuchte Messstrecke ist in Bild 2.1 dargestellt. Untersucht wurde der Bereich der Ortsdurchfahrten Freiberg in West-Ost-Richtung (L1138: Mühlstraße, Benninger Straße) sowie in Nord-Süd-Richtung (L1129: Ludwigsburger Straße). Es existieren fünf Fußgängerbedarfs-LSA auf den untersuchten Strecken.

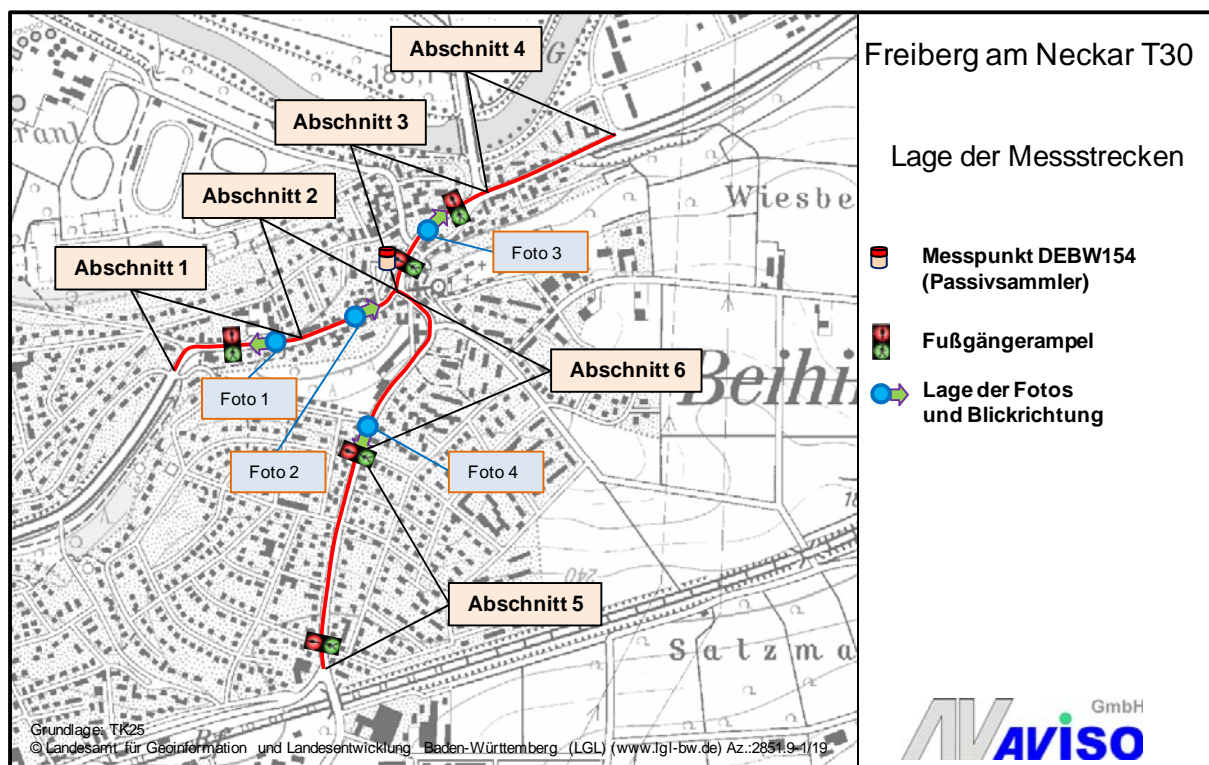


Bild 2.1: Lage der Messstrecke entlang der Ortsdurchfahrten Freiberg

Für die Untersuchungen wurden die gefahrenen Strecken in sechs Abschnitte unterteilt. Diese Teilabschnitte sind in Tab. 2.1 kurz beschrieben. Die Strecke verläuft in West-Ost-Richtung überwiegend eben, Abschnitt 2 weist eine Steigung von 2% auf. Abschnitt 3 enthält die Messstation für NO₂ und PM₁₀. Die Strecke in Nord-Süd-Richtung ist durch starke Steigungen von teilweise mehr als 6% charakterisiert. In Bild 2.2 sind Bilder aus den einzelnen Abschnitten dargestellt.

Tab. 2.1: Beschreibung der Teilabschnitte der Ortsdurchfahrten

ID	Straße	Abschnitt von	bis
1	Mühlstraße	August-Müller-Straße	Beginn der leichten Steigung (ca. 200m)
2	Mühlstraße	Beginn der leichten Steigung	Ludwigsburger Straße
3	Benninger Straße	Ludwigsburger Straße	Mundelsheimer Straße
4	Benninger Straße	Mundelsheimer Straße	Am Altneckar
5	Ludwigsburger Straße	Bahnhofstraße	Dürerstraße
6	Ludwigsburger Straße	Dürerstraße	Benninger Straße

Foto 1



Foto 2



Foto 3



Foto 4



Bild 2.2: Fotos entlang der Messstrecken, Lage: siehe Übersichtskarte in Bild 2.1

2.2 Auswertung der Fahrten

Insgesamt wurden 159 Fahrten in allen Tageszeitbereichen zwischen 6 Uhr morgens und 22 Uhr abends mit einem Pkw durchgeführt. Es wurden dabei Pkw-Verfolgungsfahrten, Lkw-Verfolgungsfahrten und T30-Fahrten („fiktiv“) unterschieden. Die Anzahl der Fahrten ist in Tab. 2.2 dargestellt. Bei der Durchführung der Fahrten wurde beachtet, die unterschiedlichen Möglichkeiten der Fahrtenbeziehungen am Anfangs- und Endknotenpunkt ausreichend abzudecken.

Die Daten zu Geschwindigkeit, Drehzahl und Uhrzeit wurden an der OBD2-Schnittstelle am Fahrzeug in hoher zeitlicher Auflösung (0,2 Sec-Takt) abgenommen. Zusätzlich wurden zeit-synchron mit einem GPS-Gerät die Zeit und die Koordinaten der Fahrstrecke erfasst.

Tab. 2.2: Anzahl der durchgeführten Messfahrten nach Art und Richtung

Fahrtart	Anzahl
Normalfahrt T50 Richtung Ost	25
Normalfahrt T50 Richtung West	27
T30 Richtung Ost	8
T30 Richtung West	9
Lkw-Verfolgungsfahrt Richtung Ost	11
Lkw-Verfolgungsfahrt Richtung West	10
Normalfahrt T50 Richtung Norden	17
Normalfahrt T50 Richtung Süden	15
T30 Richtung Norden	12
T30 Richtung Süden	12
Lkw-Verfolgungsfahrt Richtung Norden	6
Lkw-Verfolgungsfahrt Richtung Süden	7

In Bild 2.3 bis Bild 2.6 sind die gemessenen Fahrprofile dargestellt. Es ist jeweils für alle Messfahrten die aktuelle Fahrgeschwindigkeit über die gefahrene Wegstrecke aufgetragen. Der Einfluss der Fußgängerbedarfs-LSA ist durch Rückgänge der Geschwindigkeit zum Teil bis zum Stand zu erkennen. Insbesondere auf Abschnitt 3 musste in beiden Richtungen bei vielen Fahrten an gedrückten Fußgängerbedarfs-LSA aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens mehrfach gehalten werden.

Die erreichten Höchstgeschwindigkeiten liegen für die Pkw und Lkw bei der Normalfahrt T50 in allen Fahrtrichtungen nur selten über 50 km/h. Die T30-Fahrten sind in den Diagrammen ebenfalls dargestellt (rote Linien) und zeigen insgesamt ein niedrigeres Geschwindigkeitsniveau.

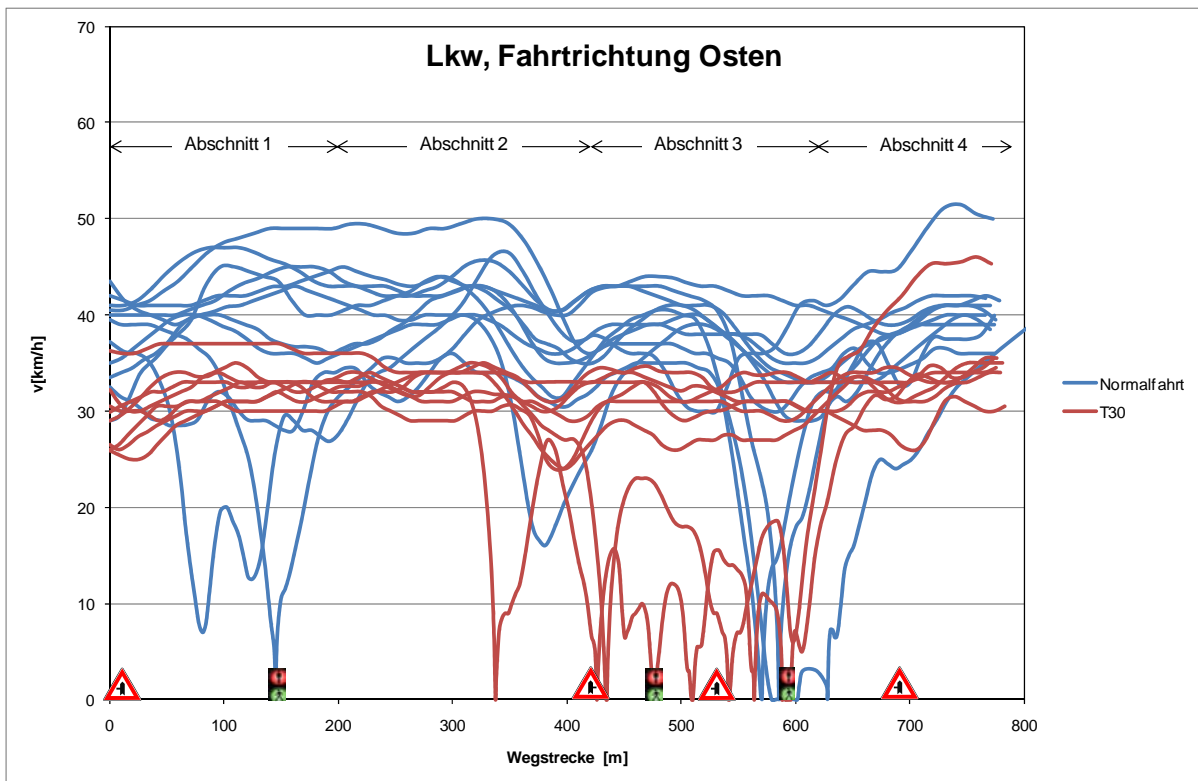
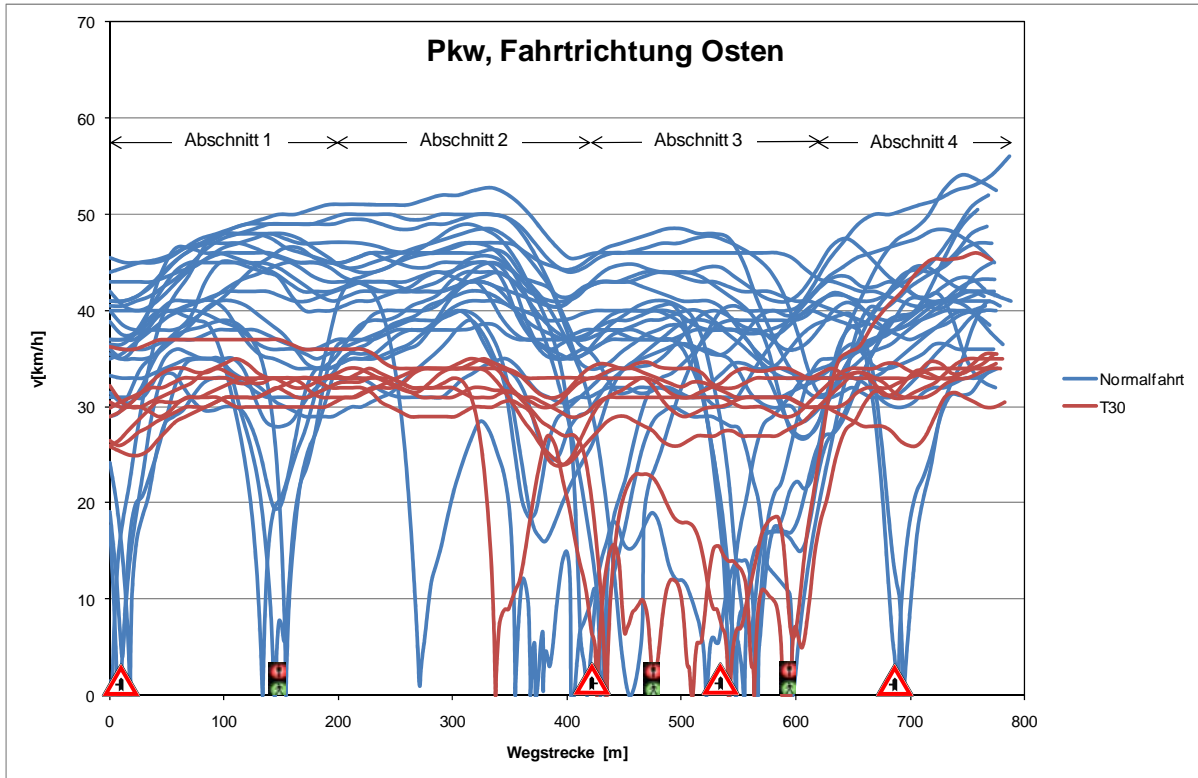


Bild 2.3: Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung **Osten**: T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten

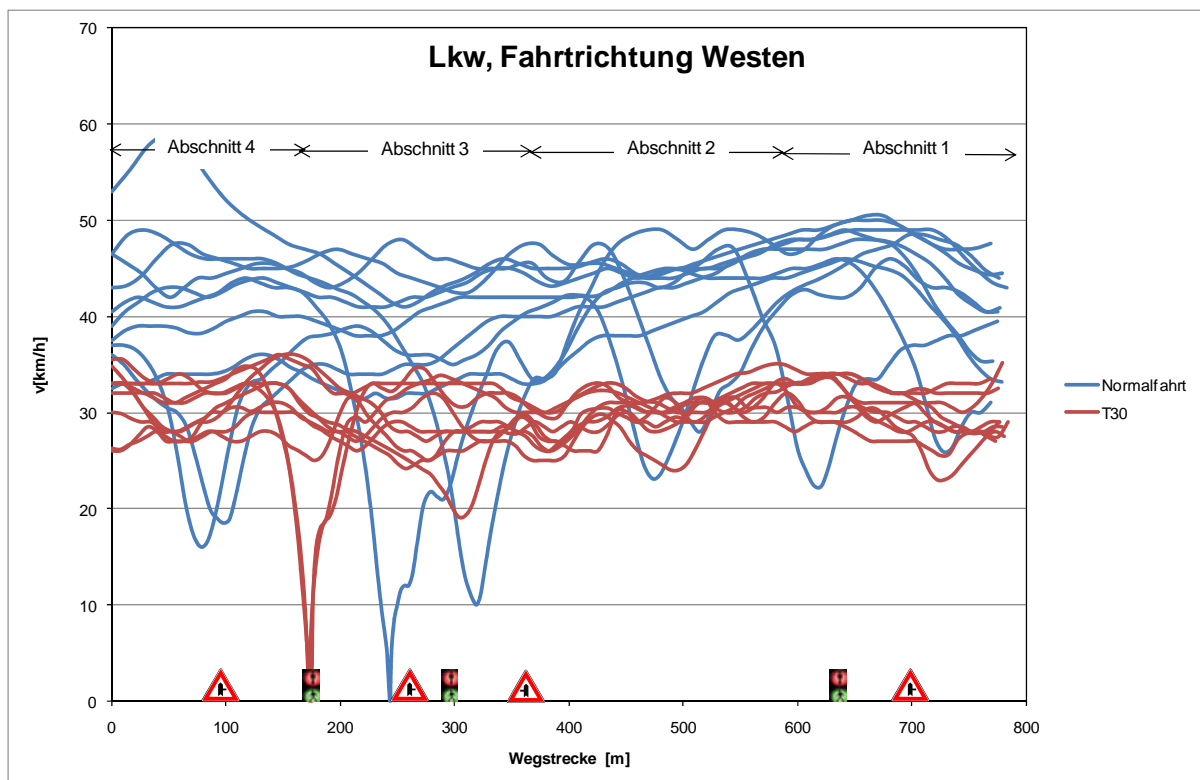
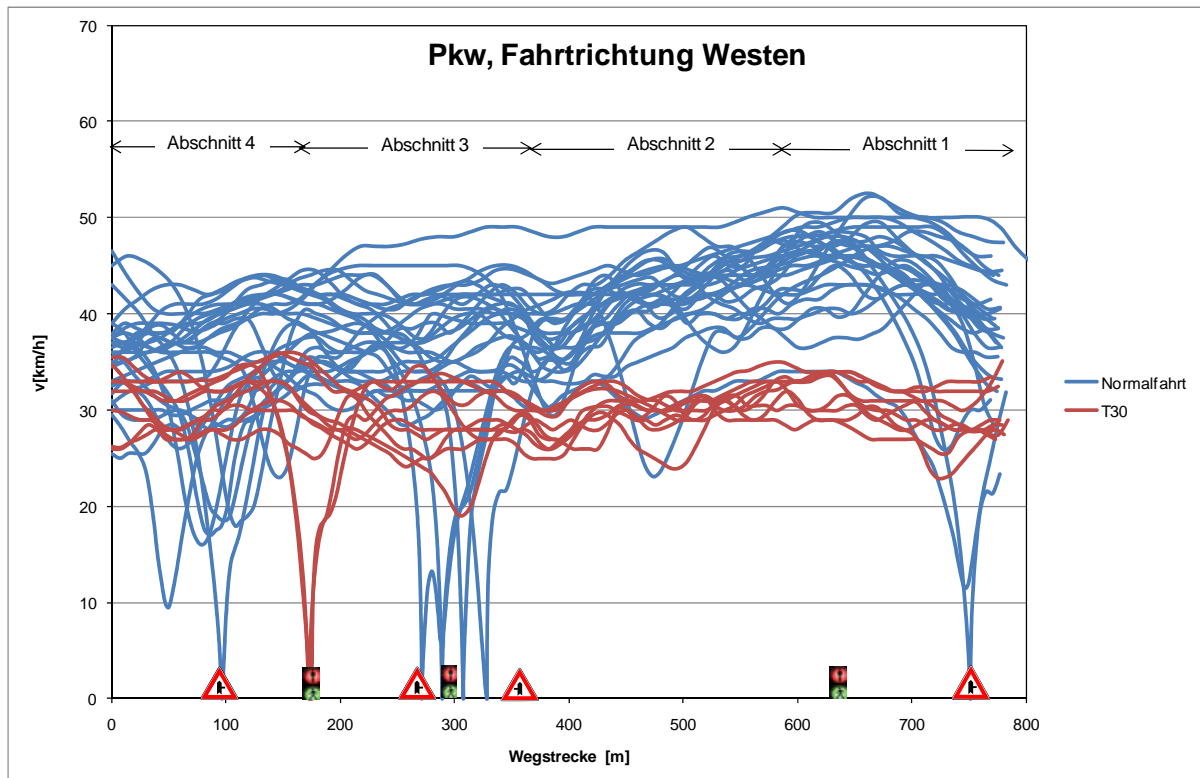


Bild 2.4: Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung **Westen**: T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten

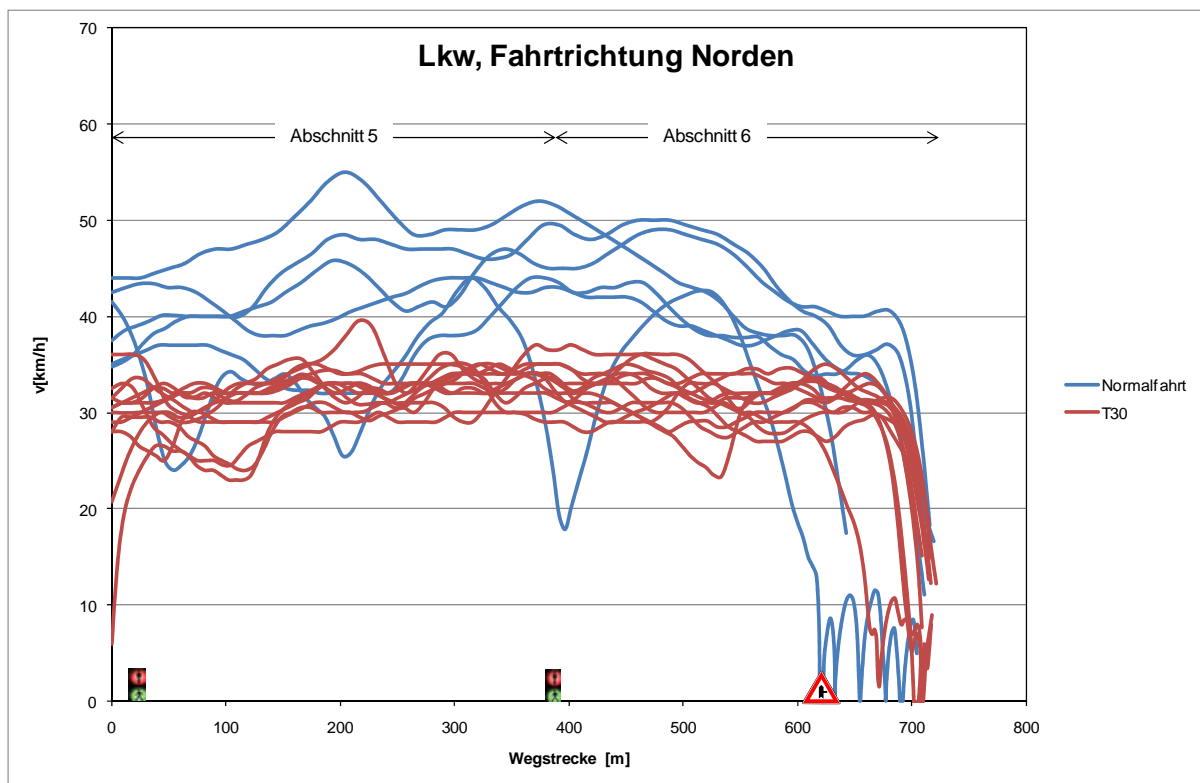
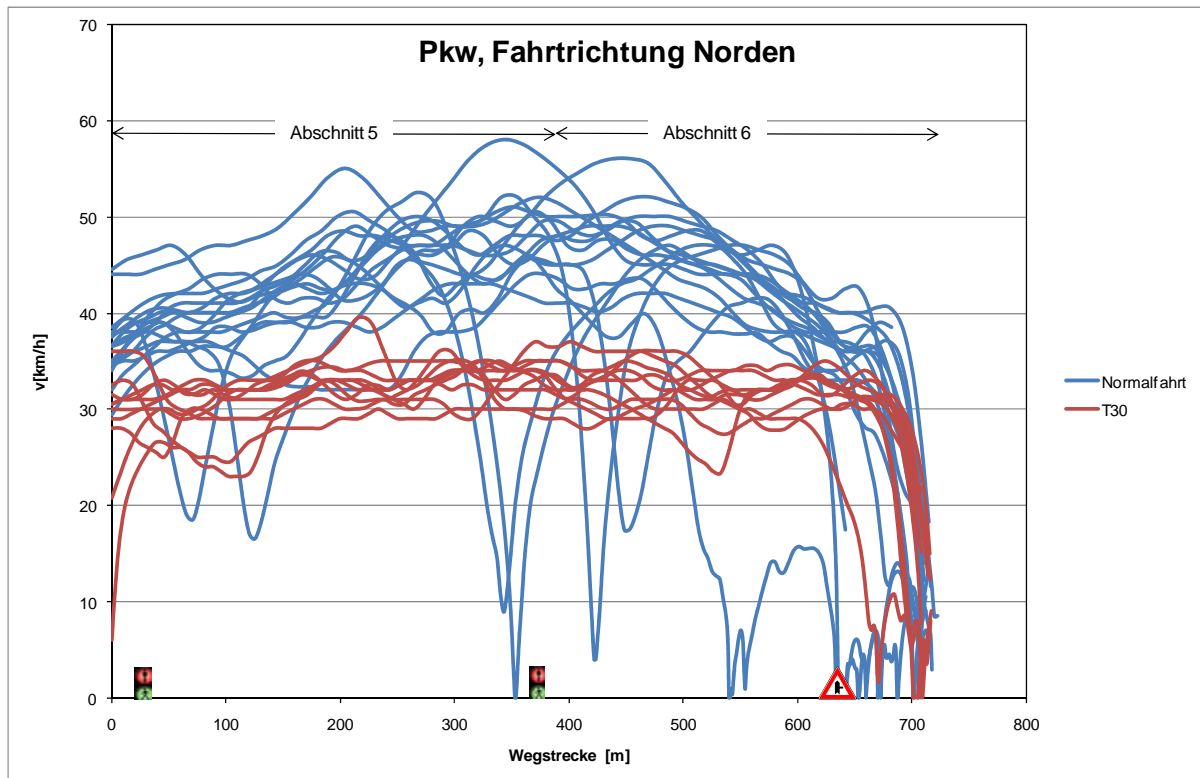


Bild 2.5: Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung **Norden**: T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten

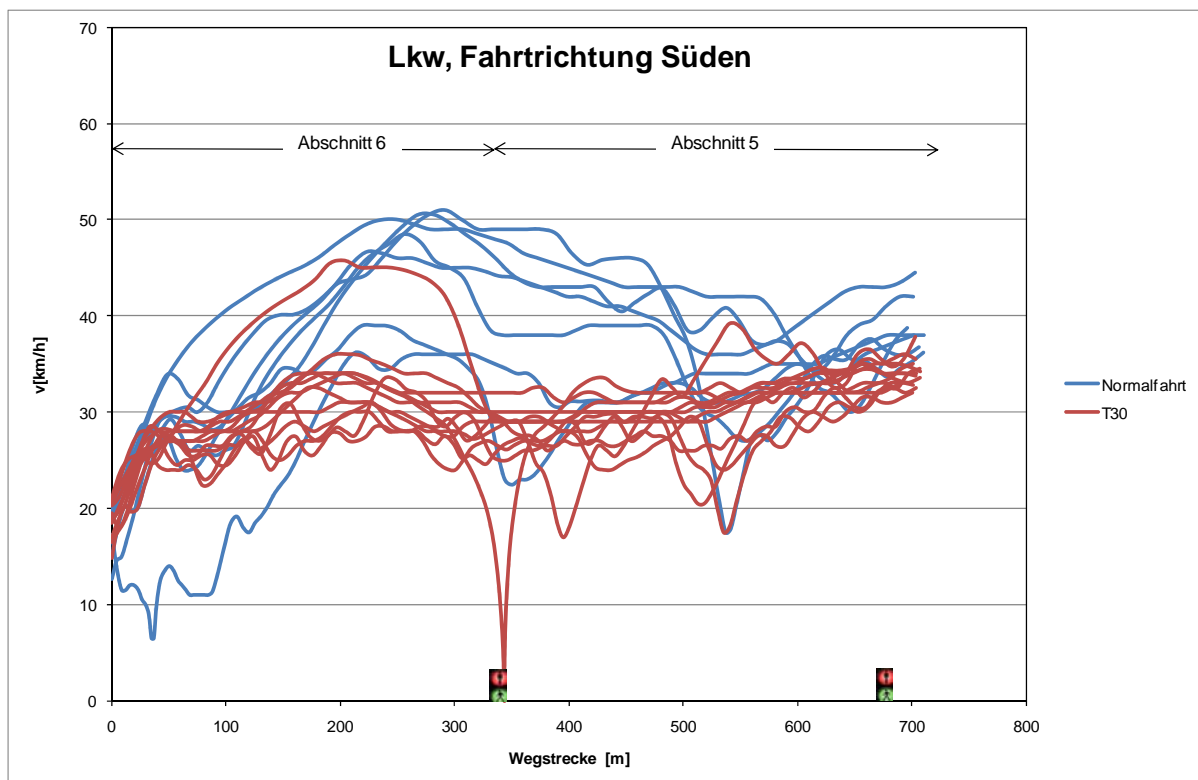
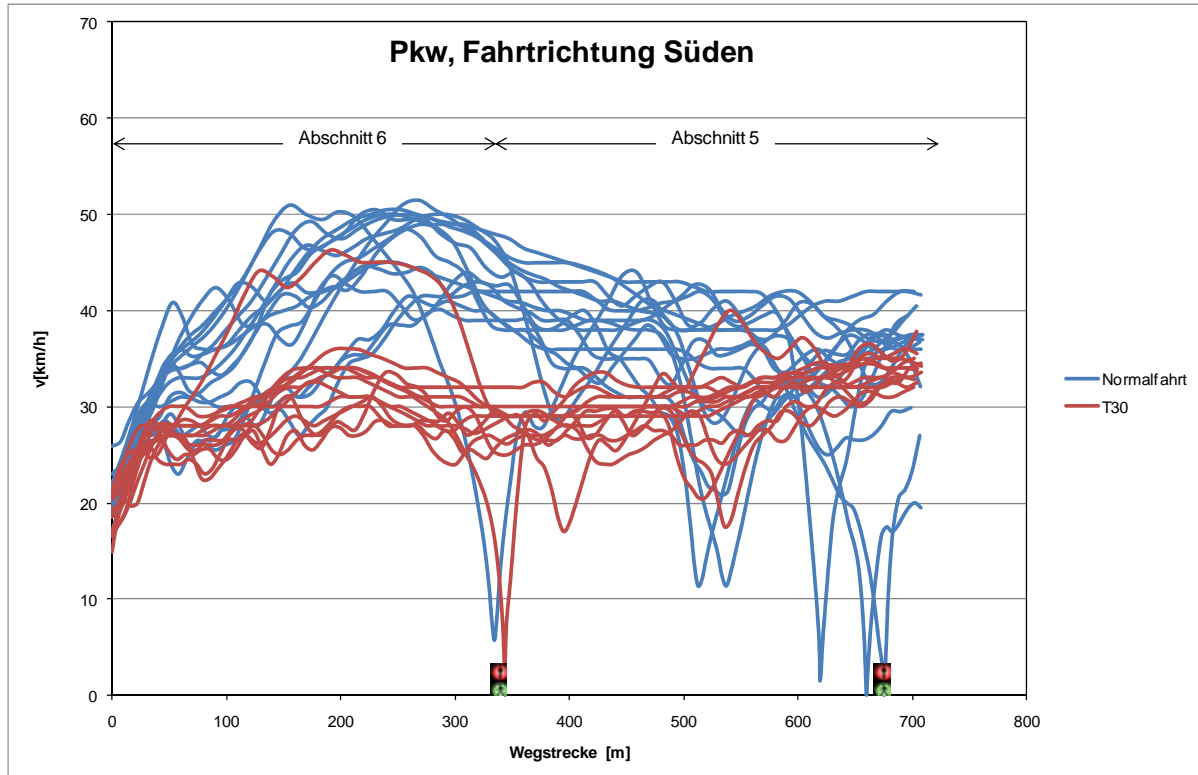


Bild 2.6: Fahrprofile der Messfahrten in Fahrtrichtung **Süden**: T50-Normalfahrt (blaue Linien) und T30-fiktiv (rote Linien), oben: Normalfahrten, unten: Lkw-Verfolgungsfahrten

2.3 Verkehrliche Grundlagedaten

Zusätzlich zu den Messfahrten wurden an acht Querschnitten entlang der Strecke manuelle Kurzzeitzählungen mit Differenzierung nach Fahrzeugarten durchgeführt und die Strecke mit Video und Digitalkamera erfasst und dokumentiert.

Die Zählungen wurden durchgeführt:

- Auf der Mühlstraße in Höhe der Blankensteinstraße,
- auf der Mühlstraße in der Mitte von Abschnitt 2,
- auf der Mühlstraße in Höhe der Bachstraße,
- auf der Benninger Straße in Höhe der Bachstraße,
- auf der Benninger Straße zwischen Talstraße und Mundelsheimer Straße,
- auf der Benninger Straße in Höhe „Am Altneckar“,
- auf der Ludwigsburger Straße in Höhe der Neckarstraße sowie
- auf der Ludwigsburger Straße zwischen Flattichstraße und Rilkestraße.

Diese bildeten die Basis für die zur Hochrechnung der Emissionen benötigten verkehrlichen Grundlagedaten für Freiberg.

Zum Zeitpunkt der Zählungen war die Anschlussstelle Pleidelsheim der A 81 Richtung Osten gesperrt, was zu einer Erhöhung des Verkehrsaufkommens in Freiberg aus Richtung Pleidelsheim (Ausweichverkehr) geführt haben kann. Zum Ausgleich wurden die Werte pauschal um 10% reduziert.

Als weitere Datenquellen wurden verwendet:

- Verkehrsdaten für Freiberg aus dem landesweiten Emissionskataster Baden-Württemberg /AVISO 2009/, differenziert nach den Fahrzeugarten Pkw, leichte Nutzfahrzeuge (INfz), schwere Nutzfahrzeuge (sNfz) und Kräder.
- Verkehrserhebungen vom 26.03.2009 im Rahmen der Erstellung des gemeinsamen Verkehrskonzepts Pleidelsheim – Ingersheim – Freiberg am Neckar – Bietigheim-Bissingen /BS 2010/
- Die Minderungen im Schwerverkehr aufgrund des geplanten Lkw-Durchfahrtsverbots wurden vereinbarungsgemäß aus dem Verkehrsmodell der Uni Stuttgart übernommen.

Die Daten der Verkehrszählungen wurden nach /LENSING 2003/ auf jahresmittlere Werte hochgerechnet und sind in Tab. 2.3 angegeben.

Tab. 2.3: Jahresmittlere durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken (DTV) und zugehörige Anteile der Fahrzeugarten

Kfz/ 24h	Krad	Pkw	INfz	sNfz	Kfz
Abschnitt 1	96 0,7%	12.368 90,0%	696 5,1%	580 4,2%	13.740 100,0%
Abschnitt 2	112 0,9%	11.182 91,3%	370 3,0%	588 4,8%	12.252 100,0%
Abschnitt 3	176 1,0%	15.908 90,4%	924 5,3%	592 3,4%	17.600 100,0%
Abschnitt 4	88 0,6%	11.708 84,9%	1.246 9,0%	742 5,4%	13.784 100,0%
Abschnitt 5	36 0,4%	7.918 89,0%	712 8,0%	226 2,5%	8.892 100,0%
Abschnitt 6	50 0,7%	6.784 92,1%	316 4,3%	216 2,9%	7.366 100,0%

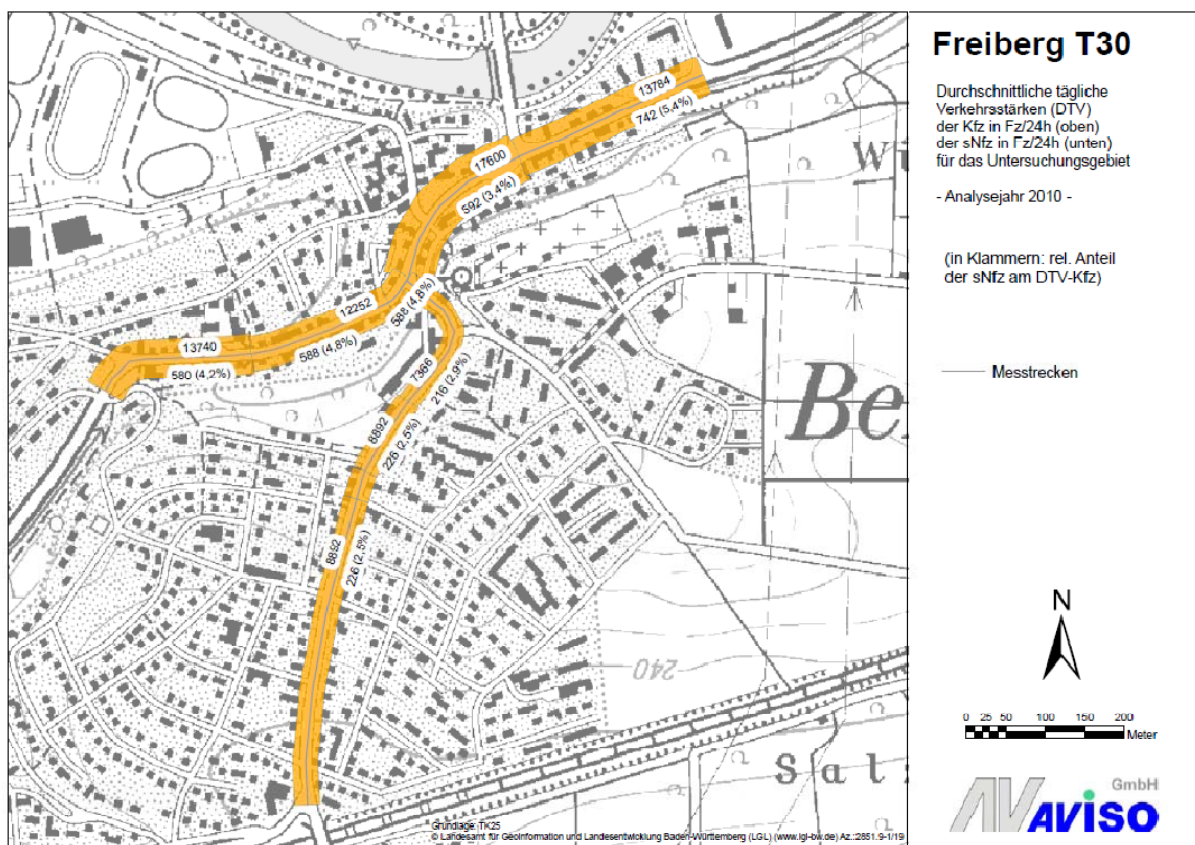


Bild 2.7: Jahresmittlere durchschnittliche Verkehrsstärken (DTV) für Kfz-gesamt und die schweren Nutzfahrzeuge (sNfz) auf den Messstrecken in Freiberg, Analyse 2010 unter Berücksichtigung des geplanten Lkw-Durchfahrtsverbots

In Bild 2.7 sind die jahresmittleren Verkehrsstärken (DTV) für Kfz und schwere Nutzfahrzeuge (sNfz) nochmals grafisch dargestellt. Die Verkehrsstärken liegen in dem betrachteten Gebiet im Bereich von 7.000 – 18.000 Kfz/24h, der Anteil der schweren Nutzfahrzeuge zwischen 2,5% und 5,4%.

2.4 Auswertung der dynamischen Fahrtparameter

Die Messfahrten wurden aufbereitet und in einer 1Hz-Taktung abgelegt. Sie wurden im Hinblick auf die dynamischen Parameter mittlere Reisegeschwindigkeit, RPA, Anteil Stopp und Anteil Konstantfahrt ausgewertet. RPA (relative positive acceleration) ist ein Dynamik-Parameter, der in HBEFA3.1 zur Charakterisierung der Verkehrssituationen verwendet wird:

$$\text{RPA} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} dt (v(t) \cdot a^+(t))}{s}$$

Darin bezeichnen $v(t)$ die Momentangeschwindigkeit, $a^+(t)$ die momentane positive Beschleunigung, t_1 und t_2 den zeitlichen Beginn und das zeitliche Ende der Fahrt sowie s die im Zeitintervall von t_1 bis t_2 zurückgelegte Strecke. RPA stellt somit einen mit der Momentangeschwindigkeit gewichteten Mittelwert der positiven Beschleunigung über die Strecke dar und wird in der Einheit m/s^2 angegeben.

Pro Fahrtengruppe (Pkw-Normalfahrt T50, Pkw T30, Lkw-Normalfahrt T50 und Lkw T30) wurden die mittleren Dynamik-Parameter v (Reisegeschwindigkeit unter Berücksichtigung von Halten und Haltezeiten) und RPA gemittelt über alle Fahrten der jeweiligen Fahrtengruppe berechnet und sind in Tab. 2.4 bis Tab. 2.7 ausgewiesen.

In Fahrtrichtung Osten liegt für die Pkw die mittlere Reisegeschwindigkeit bei 37,6 km/h, in Fahrtrichtung Westen bei 39,1 km/h, in Fahrtrichtung Norden bei 37,5 km/h und in Fahrtrichtung Süden bei 36,6 km/h. Für die Lkw ergeben sich nur geringfügig kleinere oder sogar etwas größere mittlere Reisegeschwindigkeiten. In allen Fahrtrichtungen und für alle Fahrzeugarten liegen die mittleren Reisegeschwindigkeiten dicht beieinander.

Von den Teilabschnitten liegen jeweils für beide Fahrzeugarten und alle Fahrtrichtungen in Teilabschnitt 3 die niedrigsten mittleren Reisegeschwindigkeiten vor. Auf diesem Abschnitt sind die Verkehrswerte am höchsten, da sich die L 1125 und die L 1129 überlagern. Außerdem wurde die Fußgängerbedarfs-LSA am westlichen Ende von Abschnitt 3 relativ häufig bedient.

Tab. 2.4: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung **Osten**)

Fahrt- parameter	Pkw				sNFz			
	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA
T50 N Ri Ost								
gesamt	37,6	8,3	0,164	0,076	36,7	6,6	0,119	0,049
Abschnitt 1	37,5	8,6	0,216	0,194	37,6	8,0	0,125	0,124
Abschnitt 2	40,5	6,1	0,079	0,024	39,1	5,1	0,088	0,054
Abschnitt 3	34,2	10,6	0,141	0,142	33,6	7,9	0,105	0,105
Abschnitt 4	39,6	7,0	0,244	0,204	37,0	5,7	0,077	0,006
T30 Ri Ost								
gesamt	29,4	7,9	0,085	0,056	29,4	7,9	0,085	0,056
Abschnitt 1	32,3	3,6	0,049	0,024	32,3	3,6	0,051	0,025
Abschnitt 2	30,6	4,9	0,057	0,053	30,6	4,9	0,057	0,052
Abschnitt 3	25,7	11,1	0,101	0,115	25,7	11,1	0,100	0,115
Abschnitt 4	33,0	4,6	0,146	0,154	33,0	5,0	0,065	0,044
Reduktion								
gesamt	-22%		-48%		-20%		-29%	
Abschnitt 1	-14%		-77%		-14%		-59%	
Abschnitt 2	-24%		-27%		-22%		-35%	
Abschnitt 3	-25%		-29%		-24%		-4%	
Abschnitt 4	-17%		-40%		-11%		-16%	

Tab. 2.5: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung **Westen**)

Fahrt- parameter	Pkw				sNFz			
	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA
T50 N Ri West								
gesamt	39,1	4,2	0,120	0,035	40,9	4,3	0,112	0,037
Abschnitt 1	43,3	4,8	0,092	0,074	43,5	4,7	0,098	0,088
Abschnitt 2	41,0	3,6	0,143	0,084	42,0	3,7	0,135	0,092
Abschnitt 3	37,7	5,4	0,104	0,094	38,0	6,9	0,110	0,089
Abschnitt 4	34,7	6,0	0,144	0,122	40,6	6,7	0,044	0,005
T30 Ri West								
gesamt	30,2	1,4	0,063	0,022	30,2	1,4	0,063	0,022
Abschnitt 1	31,0	1,4	0,035	0,019	31,0	1,4	0,035	0,020
Abschnitt 2	30,1	1,1	0,083	0,043	30,0	1,1	0,082	0,043
Abschnitt 3	28,9	3,9	0,071	0,096	28,8	3,9	0,071	0,096
Abschnitt 4	31,4	1,9	0,062	0,041	31,4	1,5	0,027	0,003
Reduktion								
gesamt	-23%		-47%		-26%		-44%	
Abschnitt 1	-28%		-62%		-29%		-64%	
Abschnitt 2	-27%		-42%		-29%		-39%	
Abschnitt 3	-23%		-31%		-24%		-35%	
Abschnitt 4	-9%		-57%		-23%		-38%	

Tab. 2.6: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung **Norden**)

Fahrt- parameter	Pkw				sNFz			
	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA
T50 N Ri Nord								
gesamt	37,5	8,9	0,123	0,047	37,5	12,3	0,091	0,060
Abschnitt 5	42,0	6,6	0,165	0,092	40,2	10,2	0,117	0,116
Abschnitt 6	34,0	9,9	0,076	0,070	35,5	10,8	0,062	0,034
T30 Ri Nord								
gesamt	30,1	2,7	0,059	0,017	30,1	2,7	0,058	0,017
Abschnitt 5	31,4	2,1	0,071	0,045	31,4	2,1	0,071	0,045
Abschnitt 6	28,8	3,5	0,045	0,024	28,8	3,5	0,045	0,024
Reduktion								
gesamt	-20%		-52%		-20%		-36%	
Abschnitt 5	-25%		-57%		-22%		-40%	
Abschnitt 6	-15%		-41%		-19%		-28%	

Tab. 2.7: Mittlere Reisegeschwindigkeit und RPA pro Fahrtengruppe für die T50-Normalfahrten und T30-Fahrten (Gesamtstrecke und Teilabschnitte Richtung **Süden**)

Fahrt- parameter	Pkw				sNFz			
	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA	v [km/h]	stddev v	RPA [m/s ²]	stddev RPA
T50 N Ri Süd								
gesamt	36,6	3,4	0,160	0,032	34,1	4,1	0,139	0,026
Abschnitt 5	35,6	4,6	0,100	0,057	36,0	4,0	0,076	0,024
Abschnitt 6	37,8	3,4	0,228	0,090	32,1	4,8	0,211	0,078
T30 Ri Süd								
gesamt	29,7	2,0	0,092	0,041	29,3	1,9	0,087	0,036
Abschnitt 5	30,2	1,9	0,079	0,059	29,8	2,2	0,075	0,054
Abschnitt 6	29,2	2,8	0,107	0,063	28,8	2,3	0,101	0,050
Reduktion								
gesamt	-19%		-43%		-14%		-37%	
Abschnitt 5	-15%		-22%		-17%		-1%	
Abschnitt 6	-23%		-53%		-10%		-52%	

Es zeigen sich für alle Fahrtrichtungen und Fahrzeugarten beim Vergleich T30 zu T50-Normalfahrt Reduktionen der mittleren Fahrgeschwindigkeit, die für die Gesamtstrecke zwischen -14% und -26% liegen.

Auch für den Dynamik-Parameter RPA zeigen sich beim Vergleich T30 zu T50-Normalfahrt auf der Gesamtstrecke sowohl für die Pkw als auch für die Lkw deutliche Reduktionen zwischen -29% und -52%.

Auf den Einzelabschnitten gibt es überall Reduktionen der mittleren Reisegeschwindigkeiten sowie der RPA-Werte. Hier ist insbesondere bei der Interpretation RPA-Werte jedoch Vorsicht angebracht, wie ein Blick auf die Standardabweichungen zeigt. Die Beschleunigung unterliegt aus physikalischen Gründen stärkeren Schwankungen als die Geschwindigkeit. Bei einer Mittelung über die Strecke wird dies zum Teil ausgeglichen. Je kürzer der betrachtete Streckenabschnitt jedoch ist, desto größer ist die Streuung der RPA-Werte zwischen den einzelnen Fahrten auf diesem Abschnitt. Trotzdem ist die Tendenz beim Übergang von T50 zu T30 eindeutig, überall wird RPA reduziert. Dies ist ein Indiz dafür, dass die T30-Fahrten weniger dynamisch verlaufen sind als die Normalfahrten T50, d.h. T30 zu einer Vergleichmäßigung des Verkehrsablaufes geführt hat.

3 Emissionsberechnung

3.1 Modell PHEM

Das Modell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model /HAUSBERGER 2010/) basiert auf umfangreichen Emissionskennfeldern einzelner Fahrzeugschichten, die es ermöglichen, das komplette Fahrverhalten (einschließlich Schaltverhalten) zu simulieren und emissionsseitig zu berechnen, es ist schematisch in Bild 3.1 dargestellt. Die Emissionskennfelder sind die gleichen Basisdaten, die auch zur Ableitung der spezifischen Schichtemissionsfaktoren der Verkehrssituationen, die im HBEFA3.1 enthalten sind, verwendet wurden.

Eingangsdaten der Berechnungen bilden die Daten der gemessenen Fahrprofile in 1 Hz-Taktung (Zeit, Geschwindigkeit, Drehzahl und Steigung/Gefälle). Die Ergebnisse liegen ebenfalls in 1 Hz-Taktung vor, dies sind neben den Emissionen verschiedener Schadstoffe auch weitere Daten z.B. zur Beschreibung der Fahrdynamik wie Geschwindigkeit und RPA. Zusätzlich werden für jedes Fahrprofil mittlere Daten angegeben.

Das Ergebnis von PHEM sind sogenannte „warme“ Emissionen d.h. Emissionen von Fahrzeugen mit warmem Motor. Kaltstartzuschlagsemissionen wurden mit PHEM nicht berechnet. Die Emissionsberechnungen mit PHEM wurden für alle Fahrprofile und alle relevanten Fahrzeugschichten der Pkw, INfz und sNfz durchgeführt.

Für die weiteren Auswertungen wurden die Fahrten so ausgewählt, dass Störungsgrad und Anzahl der Halte an LSA bei T30- und T50-Fahrten vergleichbar und repräsentativ für den Tag der Messfahrten sind. Bei den Lkw-Verfolgungsfahrten war dies aufgrund der geringen Anzahl der Fahrten nicht immer möglich, dort wurden die Fahrten entsprechend gewichtet.

3.2 Mittlere Ganglinien der Emissionsfaktoren

Die Emissionen, die als Ergebnis der PHEM-Berechnungen für jedes Fahrprofil pro Fahrzeugschicht vorliegen, wurden zu mittleren Emissionsfaktoren aggregiert. Hierfür wurden die Fahrprofile, die als sekundliche Werte zu unterschiedlichen Orten vorliegen, auf ein einheitliches räumliches Gitter gebracht. Auf diesem Gitter konnte zunächst für jede Schicht einzeln über alle Fahrten gemittelt werden. Im nächsten Schritt wurde, unter Berücksichtigung der aktuellen Flottenzusammensetzung für Freiberg, über die Schichtemissionen der Fahrzeuggruppen Pkw, leichte Nutzfahrzeuge (INfz) und schwere Nutzfahrzeuge (sNfz) für T50 und T30 gemittelt.

PHEM Passenger car and Heavy duty Emission Model

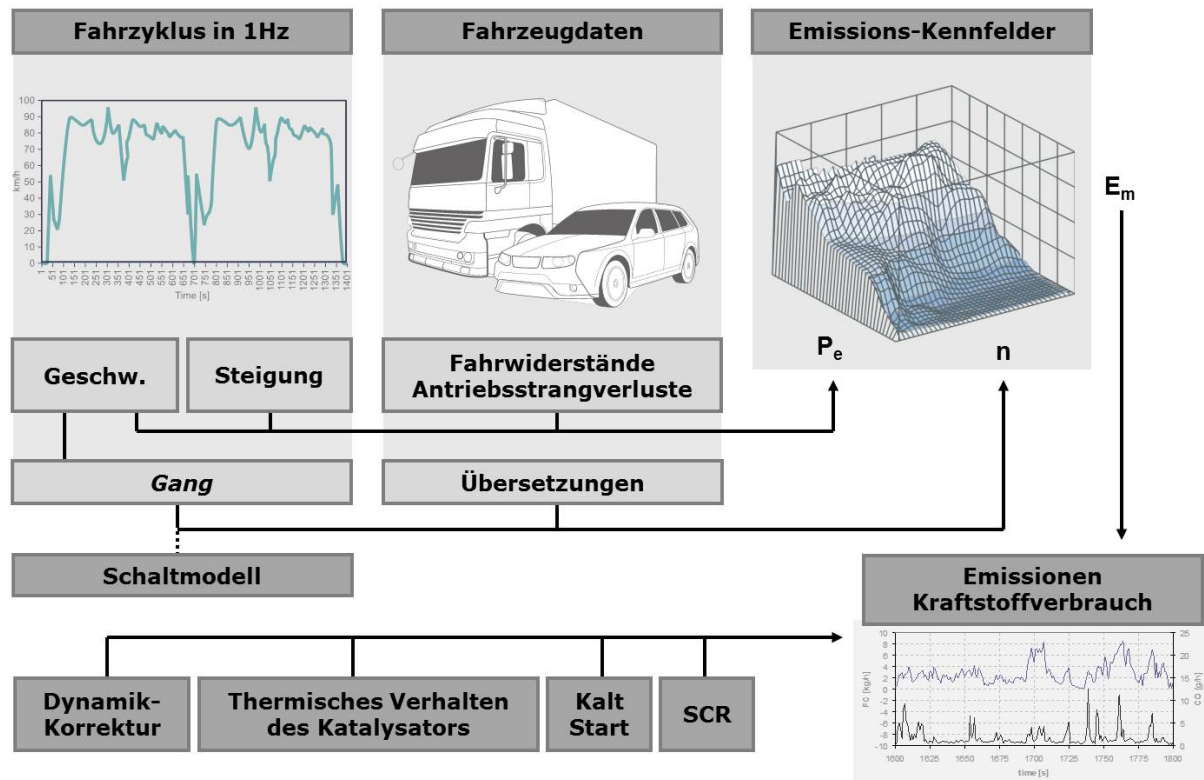


Bild 3.1: Das Modell PHEM zur Erstellung der Basis-Emissionsfaktoren in HBEFA3.1, Quelle: TU Graz, 2010

Die Daten zur Flottenzusammensetzung (dynamischer Bestand) basieren auf der Datengrundlage des landesweiten Emissionskatasters Straßenverkehr /AVISO 2009/, die pro Zulassungsbezirk und Bezugsjahr Daten zum dynamischen Bestand enthält. Für Freiberg sind dort für die Fahrzeuggruppen Pkw und INfz die Bestandsdaten des Zulassungsbezirks Ludwigsburg berücksichtigt, aus denen mittels einer Fahrleistungsgewichtung die Flottenzusammensetzung für Innerortsstraßen abgeleitet worden war. Es wurde eine Anpassung an die Fahrzeugschichtendefinition aus dem aktuellen HBEFA3.1 /HBEFA2010/ durchgeführt.

Die Flotte der schweren Nutzfahrzeuge wird stärker vom überregionalen als vom regionalen Bestand bestimmt, daher wurde für die schweren Nutzfahrzeuge die aktuelle bundesmittlere Flottenzusammensetzung aus HBEFA3.1 verwendet.

In Tab. 3.1 sind die Flottenzusammensetzungen für Pkw und die schweren Nutzfahrzeuge (sNfz) auf Innerortsstraßen für 2010 aufgeführt.

Tab. 3.1: Flottenzusammensetzung auf Innerortsstraßen für Freiberg für die Fahrzeuggruppen Pkw, INfz und sNfz im Bezugsjahr 2010

Pkw		INfz		sNfz	
Otto vor E1	0,6%	Otto vor E1	0,3%	Ds vor E I	5,4%
Otto E1	4,4%	Otto E1	0,2%	Ds E I	3,0%
Otto E2	5,2%	Otto E2	0,7%	Ds E II	12,1%
Otto E3	21,9%	Otto E3	0,7%	Ds E III	27,5%
Otto E4	31,2%	Otto E4	2,2%	Ds E IV	15,5%
Otto E5	1,2%	Otto E5	0,0%	Ds E V	36,6%
Otto E6	0,0%	Otto E6	0,0%	Ds E VI	0,0%
Gas/Alternativ	0,4%	Gas/Alternativ	0,0%		
Ds vor E1	0,4%	Ds vor E1	1,5%		
Ds E1	1,0%	Ds E1	2,2%		
Ds E2	2,5%	Ds E2	11,6%		
Ds E3	11,2%	Ds E3	27,0%		
Ds E4	18,8%	Ds E4	52,8%		
Ds E5	1,1%	Ds E5	0,7%		
Ds E6	0,1%	Ds E6	0,0%		
gesamt	100,0%	gesamt	100,0%	gesamt	100,0%

Das Ergebnis der oben beschriebenen Mittelungen sind mittlere Ganglinien für die Emissionen der Pkw, der leichten und der schweren Nutzfahrzeuge, jeweils für beide Fahrtrichtungen. Sie sind in Bild 3.2 bis Bild 3.9 dargestellt. Zur besseren Orientierung sind jeweils die mittleren Geschwindigkeiten mit eingetragen. Um die Darstellung im gleichen Diagramm zu ermöglichen, wurden die Emissionsfaktoren für PM10 (Abgas) um einen Faktor 10 überhöht.

Für Freiberg lässt sich aus diesen Bildern folgendes ableiten:

- In West-Ost-Richtung gibt es ein Freiberg kaum Steigungen oder Gefälle, hier unterscheiden sich die Emissionsfaktoren hinsichtlich der Richtungen kaum.
- Ganz anders in Nord-Süd-Richtung: Hier sind sowohl NO_x- wie auch PM10-Emissionen in Fahrtrichtung Süden (teilweise mehr als 6% Steigung) deutlich höher als in Richtung Norden.
- Auf Beschleunigungsstrecken sind die Emissionsfaktoren bei Tempo 50 i. d. R. höher als bei Tempo 30, da im letzteren Fall die Zielgeschwindigkeit eher erreicht ist.
- Auf Strecken mit sinkender Geschwindigkeit ist es genau anders herum. Hier können Fahrzeuge etwa beim Zufahren auf eine rote Ampel bei T50 ihren Schwung ausnutzen, während bei T30 trotzdem Gas gegeben werden muss.

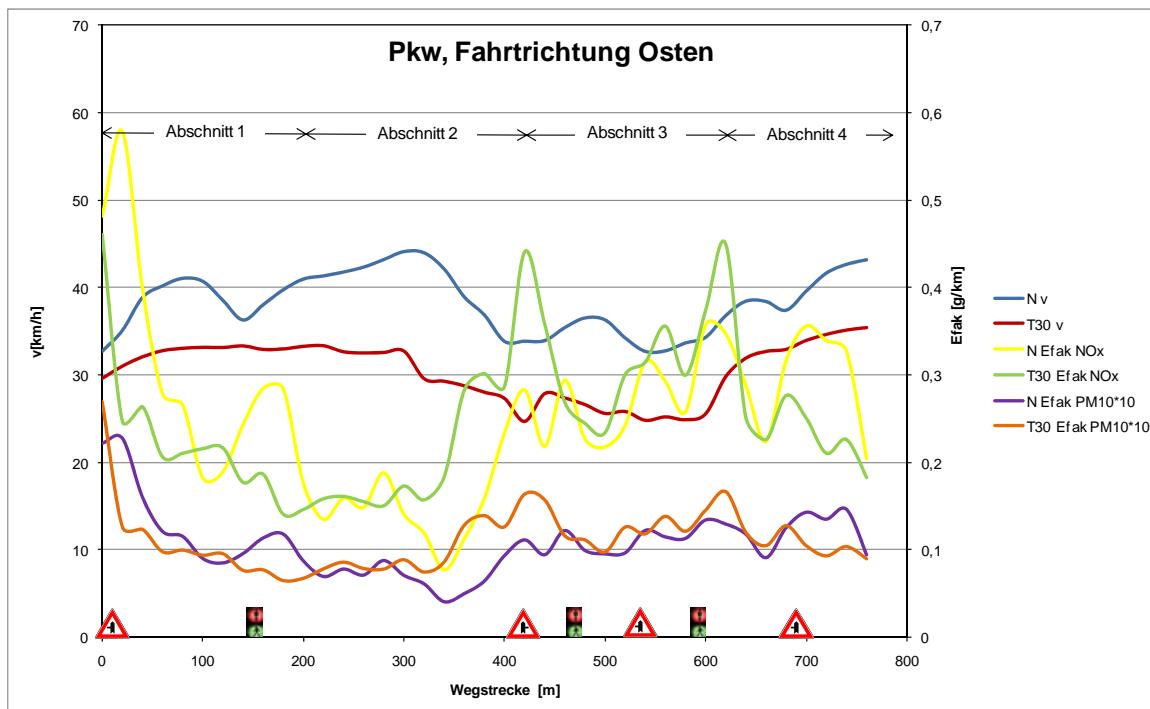


Bild 3.2: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **Pkw in Richtung Osten**; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

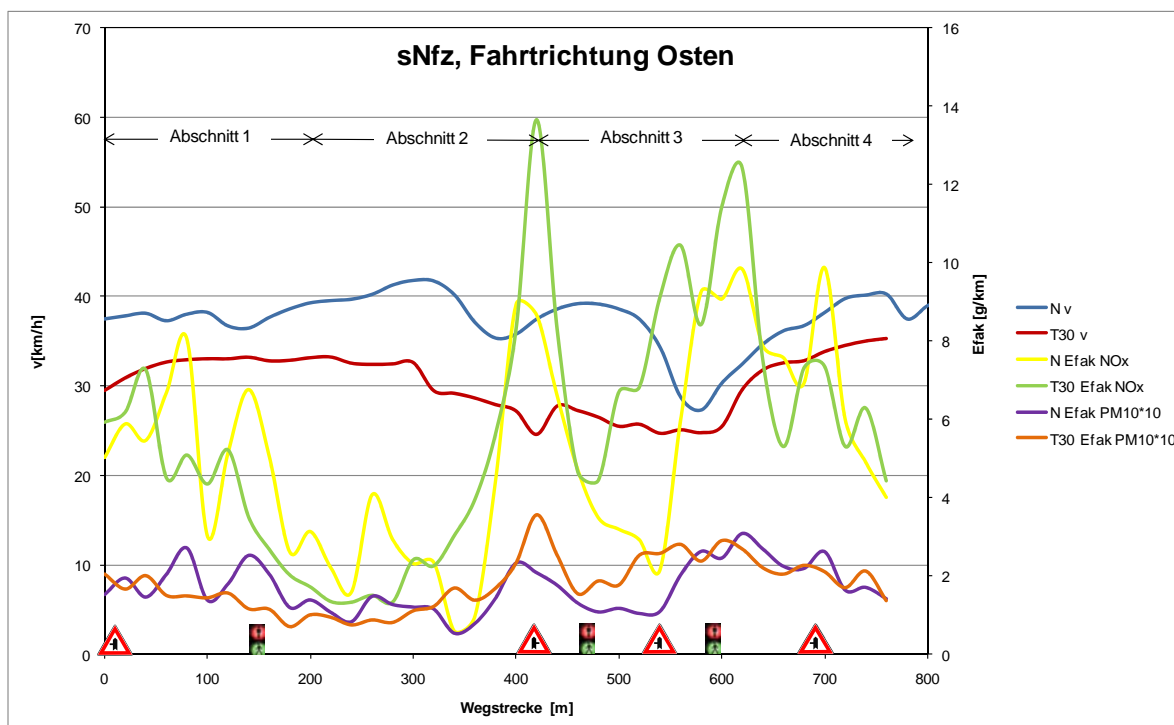


Bild 3.3: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **sNfz in Richtung Osten**; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

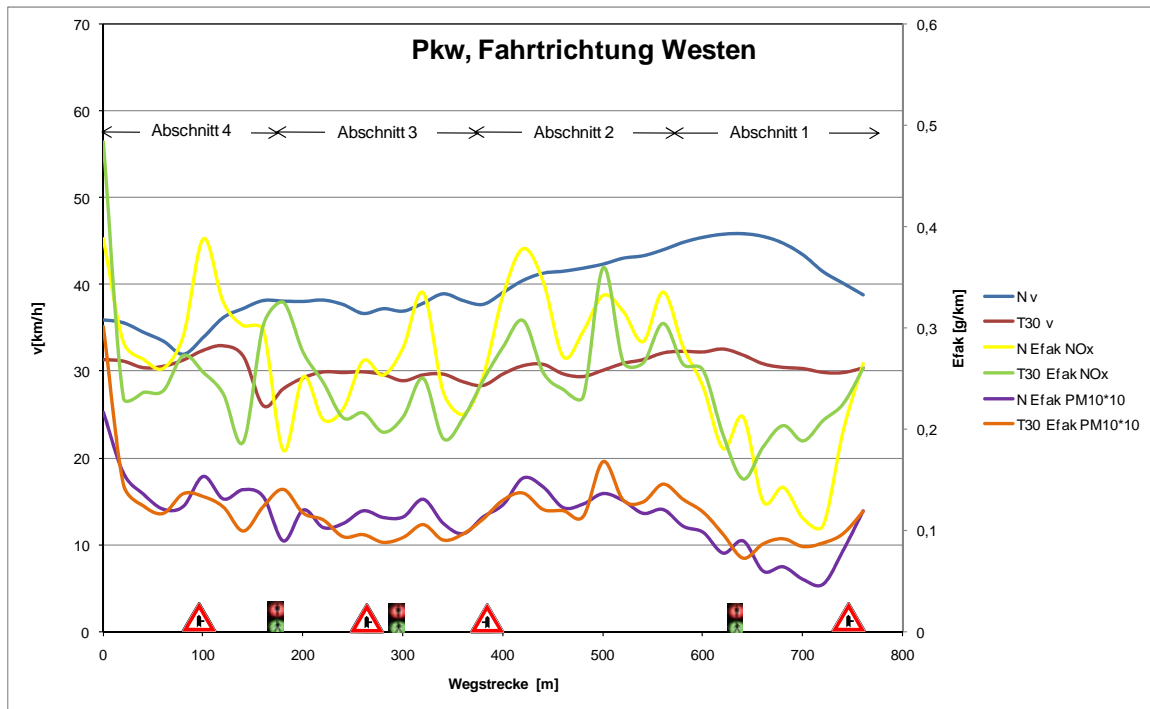


Bild 3.4: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **Pkw in Richtung Westen**; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

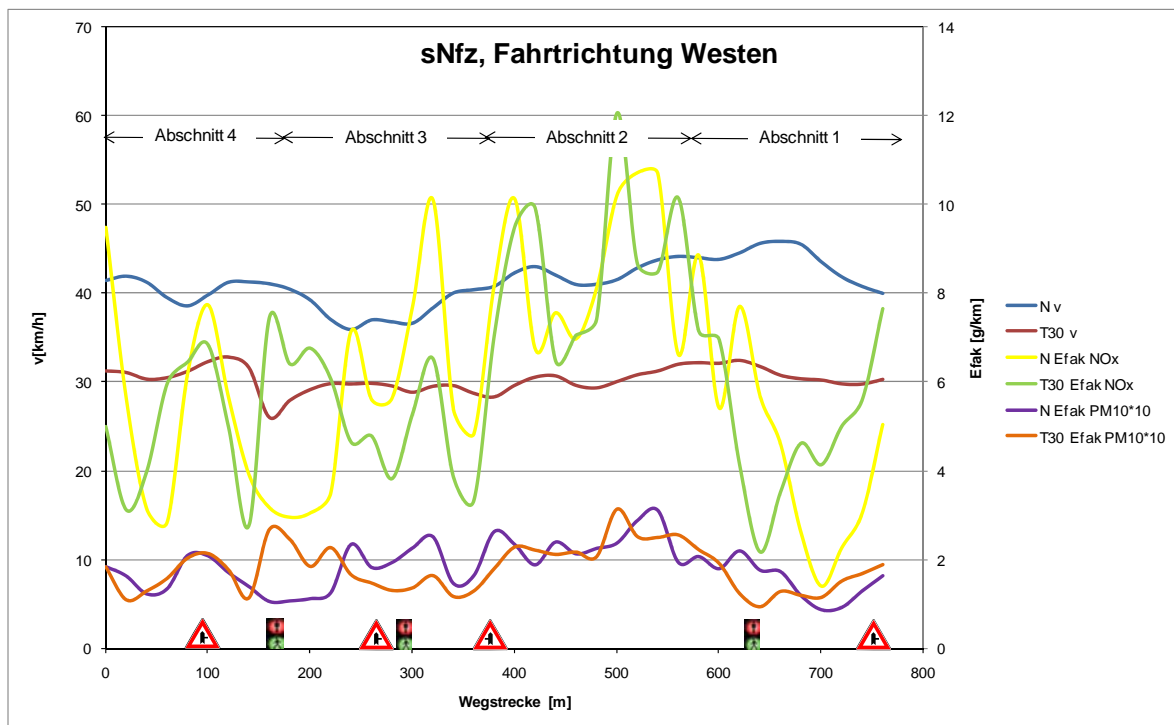


Bild 3.5: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **sNfz in Richtung Westen**; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

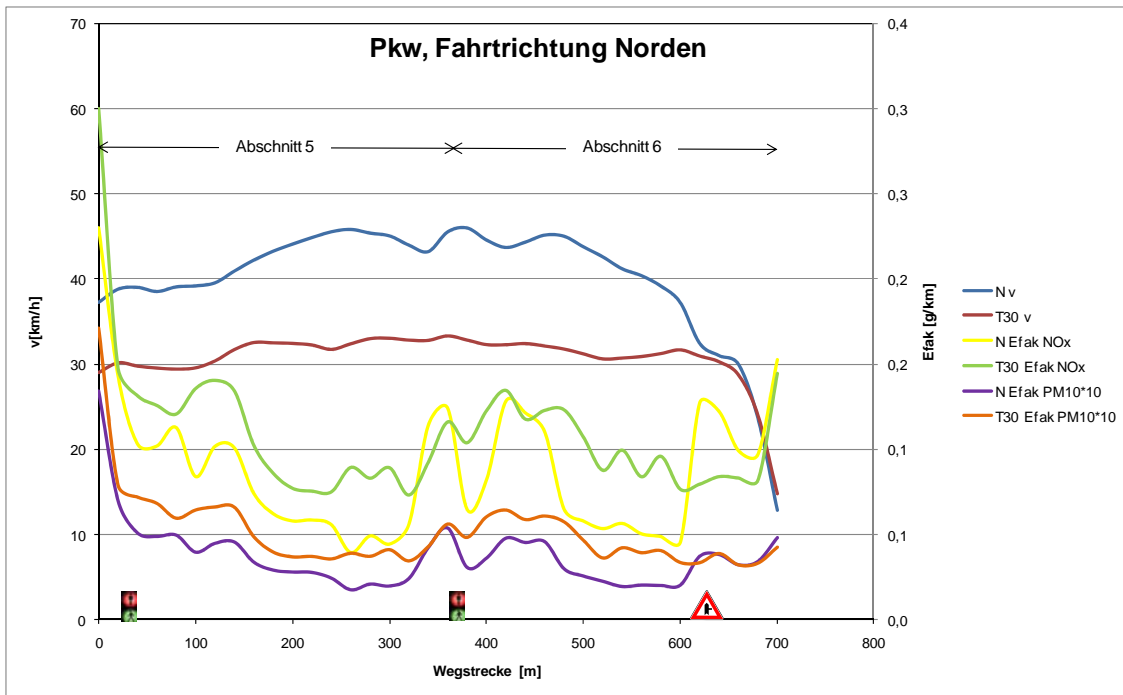


Bild 3.6: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **Pkw in Richtung Norden**; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

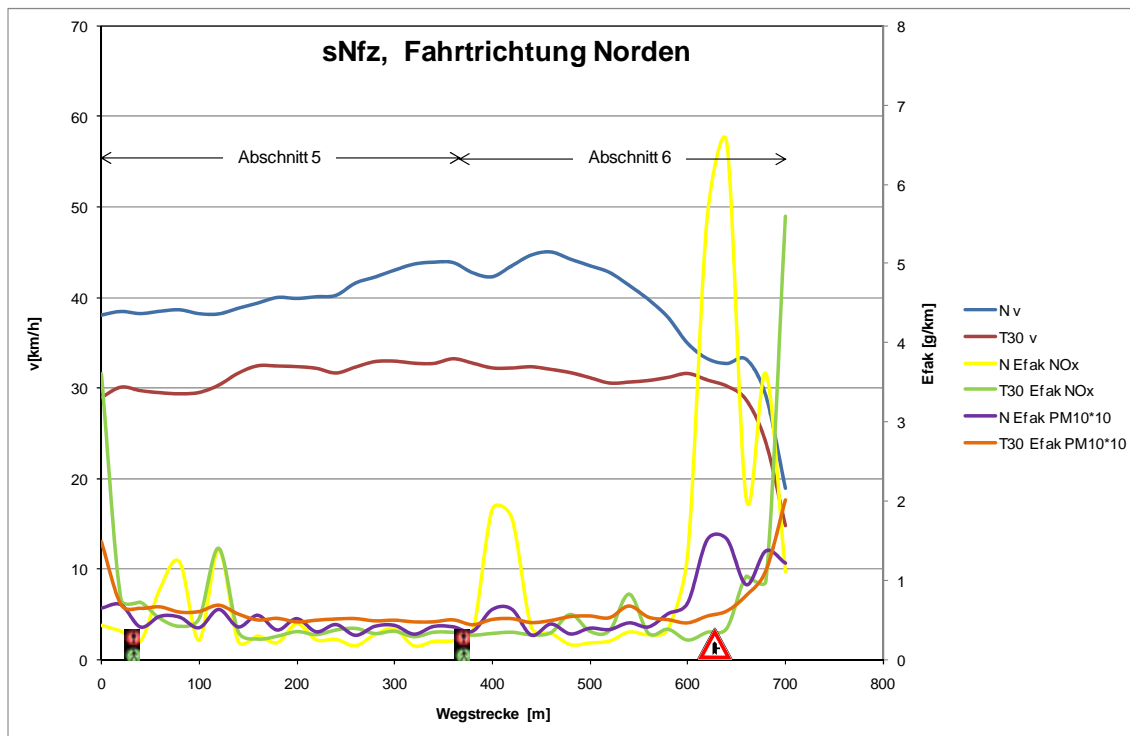


Bild 3.7: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM10-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **sNfz in Richtung Norden**; die PM10-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

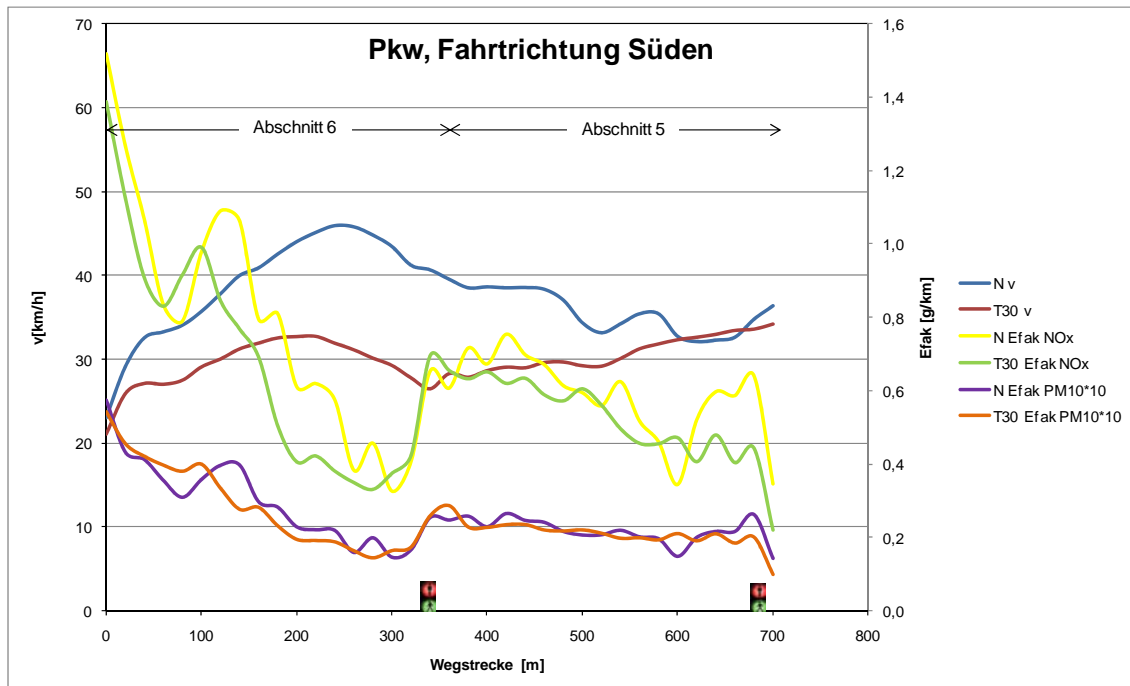


Bild 3.8: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM₁₀-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **Pkw in Richtung Süden**; die PM₁₀-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

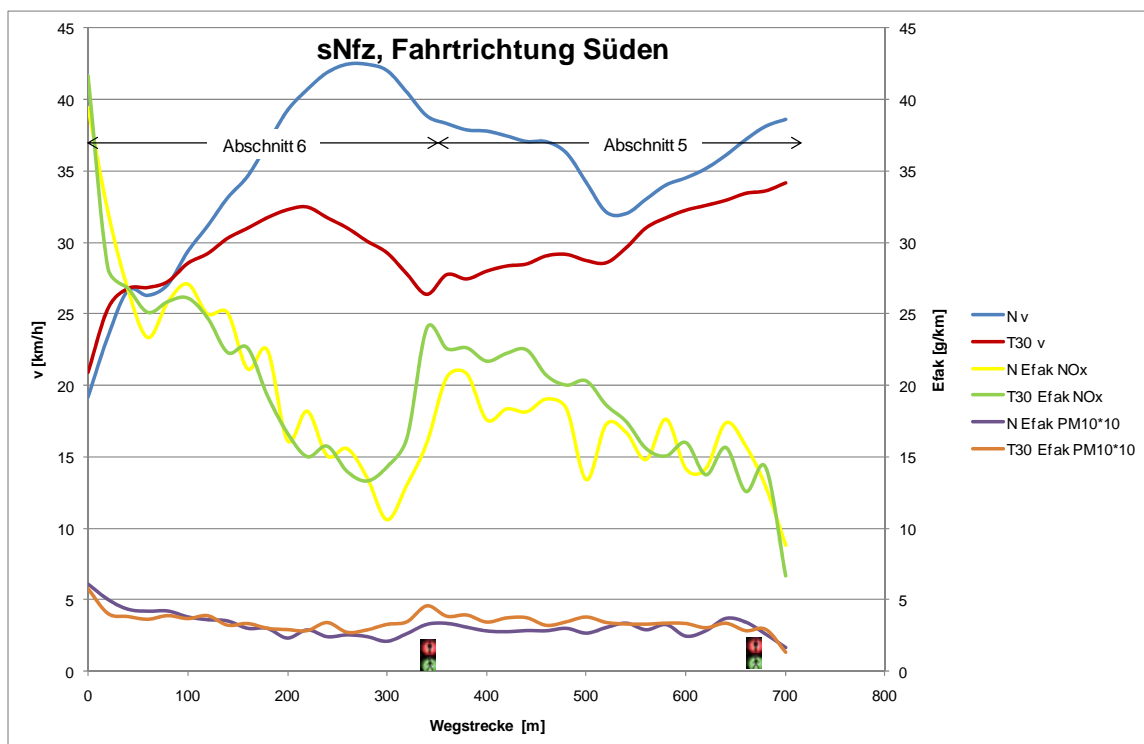


Bild 3.9: Profile der Fahrgeschwindigkeit sowie der NO_x- und PM₁₀-Emissionsfaktoren (Abgas) für T50-Normalfahrten (N) und die T30-fiktiv (T30) für **sNfz in Richtung Süden**; die PM₁₀-Emissionsfaktoren sind aus Darstellungsgründen um den Faktor 10 überhöht

3.3 Emissionsfaktoren NO_x und PM10-Abgas

Aus den in Bild 3.2 bis Bild 3.9 dargestellten Ganglinien können für alle drei Fahrzeuggruppen mittlere „warme“ Emissionsfaktoren für NO_x und PM10 (Abgas) auf den Messstrecken abgeleitet werden. Wenn die Strecken hinsichtlich ihrer Verkehrswerte, Verkehrssituationen (LSA etc.) oder der Steigung sehr heterogen sind, kann es sinnvoll sein, zusätzlich Emissionsfaktoren für Unterabschnitte zu bestimmen. Die Unsicherheiten auf den Teilabschnitten sind jedoch aus folgenden Gründen höher als für die Gesamtstrecken:

- Wie schon bei RPA ist die Streuung der Emissionsfaktoren zwischen den Fahrten sehr hoch, und je kürzer die betrachteten Abschnitte sind, desto höher ist die Standardabweichung.
- Weil Luftschadstoffe im Wesentlichen während der Beschleunigungsphasen emittiert werden, wurden bei der Mittelwertbildung die Fahrprofile für T50 und T30 jeweils so gewichtet, dass ähnliche Störungsgrade auf den Messstrecken vorliegen. Dies kann auf kurzen Teilabschnitten nicht überall garantiert werden, auch weil sich Störungen, die zu mehrfachen Halten führen, oft über Abschnittsgrenzen erstrecken.
- Weiterhin enthalten einzelne Streckenabschnitte teilweise nur eine Beschleunigungs-, Ausroll-, Konstantfahrt- oder Abbremsstrecke. Damit besitzen sie einen emissionsseitigen Vor- oder Nachteil, der zu Lasten bzw. zu Gunsten benachbarter Streckenabschnitte geht. Wenn etwa ein Abschnitt nur eine Beschleunigungsstrecke enthält und der Folgeabschnitt nur eine Ausrollstrecke, so ist im ersten Abschnitt eine emissionsmindernde und im zweiten Abschnitt eine emissionserhöhende Wirkung von T30 zu erwarten. Diese sind nicht unabhängig voneinander zu realisieren.

Trotzdem liefern die Emissionsfaktoren für die Einzelabschnitte nützliche Zusatzinformationen zu den Werten für die Gesamtstrecken. Die Auswirkungen eines Tempolimits können auf verschiedenen Teilabschnitten durchaus gegenläufig sein. Allerdings sind die entsprechenden Unsicherheiten zu beachten.

Die so gebildeten Emissionsfaktoren für NO_x und PM10 (Abgas) für die Fahrzeuggruppen Pkw, leichte und schwere Nutzfahrzeuge sind gemittelt über die in Bild 2.1 eingetragenen Teilabschnitte in Tab. 3.2 bis Tab. 3.9 getrennt nach Fahrrichtungen dargestellt. Ebenfalls angegeben sind die Standardabweichungen aus der Mittelung über die Fahrten jeweils als Absolutwerte und als relativer Anteil. Im unteren Teil der Tabellen ist jeweils die Veränderung von T30 gegenüber T50 angegeben.

Tab. 3.2: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung **Osten**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)

Efaktor NO_x [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri Ost									
gesamt	0,25	0,08	32%	0,65	0,24	37%	5,15	1,40	27%
Abschnitt 1	0,32	0,18	57%	0,81	0,61	75%	5,38	4,26	79%
Abschnitt 2	0,15	0,03	22%	0,32	0,03	8%	3,06	1,27	42%
Abschnitt 3	0,27	0,17	63%	0,70	0,51	72%	5,62	4,43	79%
Abschnitt 4	0,30	0,19	63%	0,84	0,60	71%	7,14	2,69	38%
T30 Ri Ost									
gesamt	0,25	0,09	35%	0,49	0,22	45%	5,63	3,09	55%
Abschnitt 1	0,23	0,06	24%	0,45	0,08	18%	4,67	1,36	29%
Abschnitt 2	0,20	0,08	39%	0,33	0,16	47%	2,98	2,70	91%
Abschnitt 3	0,32	0,21	66%	0,65	0,52	80%	8,40	9,04	108%
Abschnitt 4	0,26	0,10	40%	0,58	0,37	63%	6,99	3,90	56%
Änderung									
gesamt	-1,8%			-24,0%			9,3%		
Abschnitt 1	-26,9%			-44,6%			-13,2%		
Abschnitt 2	31,3%			5,3%			-2,6%		
Abschnitt 3	18,1%			-8,0%			49,6%		
Abschnitt 4	-13,5%			-31,2%			-2,1%		

Tab. 3.3: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung **Westen**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)

Efaktor NO_x [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri West									
gesamt	0,26	0,06	22%	0,67	0,13	19%	6,06	1,36	22%
Abschnitt 1	0,19	0,08	44%	0,51	0,26	51%	4,66	2,19	47%
Abschnitt 2	0,31	0,11	36%	0,88	0,32	36%	8,25	3,61	44%
Abschnitt 3	0,25	0,11	45%	0,58	0,28	48%	5,43	3,15	58%
Abschnitt 4	0,31	0,14	46%	0,72	0,40	55%	5,57	2,81	50%
T30 Ri West									
gesamt	0,25	0,02	9%	0,53	0,07	12%	6,04	0,87	14%
Abschnitt 1	0,21	0,02	11%	0,42	0,06	14%	5,09	1,14	22%
Abschnitt 2	0,27	0,03	11%	0,63	0,12	19%	8,19	2,03	25%
Abschnitt 3	0,24	0,10	41%	0,51	0,32	62%	5,56	4,63	83%
Abschnitt 4	0,27	0,08	30%	0,57	0,20	34%	4,89	1,13	23%
Änderung									
gesamt	-5,7%			-20,9%			-0,2%		
Abschnitt 1	14,7%			-17,0%			9,2%		
Abschnitt 2	-11,5%			-28,4%			-0,8%		
Abschnitt 3	-4,0%			-12,2%			2,5%		
Abschnitt 4	-14,7%			-20,5%			-12,3%		

Tab. 3.4: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung **Norden**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1)

Efaktor NO_x [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri Nord									
gesamt	0,09	0,04	46%	0,18	0,09	49%	0,84	2,89	345%
Abschnitt 5	0,09	0,03	30%	0,16	0,05	32%	0,41	0,94	228%
Abschnitt 6	0,09	0,09	102%	0,19	0,20	102%	1,42	5,30	374%
T30 Ri Nord									
gesamt	0,11	0,02	19%	0,17	0,02	13%	0,52	0,38	73%
Abschnitt 5	0,12	0,03	22%	0,18	0,03	18%	0,63	0,71	113%
Abschnitt 6	0,10	0,03	33%	0,16	0,04	26%	0,38	0,16	43%
Änderung									
gesamt	23,7%			-4,6%			-37,7%		
Abschnitt 5	28,5%			9,5%			51,0%		
Abschnitt 6	18,3%			-17,9%			-72,8%		

Tab. 3.5: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für NO_x in Fahrtrichtung **Süden**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1)

Efaktor NO_x [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri Süd									
gesamt	0,69	0,07	10%	2,28	0,18	8%	18,97	0,61	3%
Abschnitt 5	0,59	0,11	19%	1,87	0,38	20%	16,43	1,76	11%
Abschnitt 6	0,80	0,19	24%	2,74	0,54	20%	21,80	2,25	10%
T30 Ri Süd									
gesamt	0,60	0,09	16%	2,09	0,18	9%	19,72	0,46	2%
Abschnitt 5	0,53	0,10	19%	2,03	0,37	18%	18,01	1,70	9%
Abschnitt 6	0,68	0,18	27%	2,16	0,36	17%	21,64	1,62	8%
Änderung									
gesamt	-12,5%			-8,3%			4,0%		
Abschnitt 5	-10,3%			8,7%			9,6%		
Abschnitt 6	-14,3%			-21,3%			-0,7%		

Tab. 3.6: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für **PM10** (Abgas) in Fahrtrichtung **Osten**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)

Efaktor PM10 [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri Ost									
gesamt	0,011	0,003	31%	0,048	0,014	29%	0,170	0,038	23%
Abschnitt 1	0,014	0,006	44%	0,055	0,023	42%	0,186	0,113	61%
Abschnitt 2	0,007	0,002	35%	0,030	0,008	27%	0,122	0,033	27%
Abschnitt 3	0,011	0,006	58%	0,053	0,035	66%	0,166	0,099	59%
Abschnitt 4	0,012	0,007	58%	0,058	0,026	46%	0,220	0,079	36%
T30 Ri Ost									
gesamt	0,011	0,003	30%	0,043	0,013	31%	0,179	0,026	14%
Abschnitt 1	0,011	0,004	36%	0,043	0,011	25%	0,148	0,008	5%
Abschnitt 2	0,009	0,004	40%	0,034	0,010	30%	0,127	0,048	38%
Abschnitt 3	0,013	0,006	47%	0,054	0,033	62%	0,245	0,190	78%
Abschnitt 4	0,011	0,005	40%	0,045	0,015	34%	0,207	0,059	29%
Änderung									
gesamt	3,8%			-9,7%			5,3%		
Abschnitt 1	-16,5%			-22,7%			-20,4%		
Abschnitt 2	33,8%			11,0%			3,6%		
Abschnitt 3	17,5%			0,9%			47,3%		
Abschnitt 4	-7,2%			-21,5%			-5,9%		

Tab. 3.7: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für **PM10** (Abgas) in Fahrtrichtung **Westen**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 4 nach Tab. 2.1)

Efaktor PM10 [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri West									
gesamt	0,012	0,003	23%	0,051	0,008	15%	0,182	0,038	21%
Abschnitt 1	0,008	0,003	39%	0,041	0,017	41%	0,155	0,071	46%
Abschnitt 2	0,013	0,005	36%	0,059	0,017	28%	0,232	0,087	38%
Abschnitt 3	0,011	0,005	41%	0,049	0,014	29%	0,168	0,085	51%
Abschnitt 4	0,015	0,007	45%	0,059	0,020	34%	0,166	0,057	34%
T30 Ri West									
gesamt	0,012	0,001	10%	0,048	0,009	18%	0,179	0,026	14%
Abschnitt 1	0,010	0,002	20%	0,041	0,009	23%	0,149	0,035	23%
Abschnitt 2	0,013	0,001	12%	0,050	0,013	25%	0,223	0,052	23%
Abschnitt 3	0,011	0,004	34%	0,043	0,019	45%	0,177	0,115	65%
Abschnitt 4	0,015	0,005	36%	0,058	0,020	35%	0,160	0,020	12%
Änderung									
gesamt	3,0%			-7,6%			-1,7%		
Abschnitt 1	24,2%			0,5%			-3,6%		
Abschnitt 2	1,3%			-14,2%			-4,0%		
Abschnitt 3	-6,8%			-11,9%			5,3%		
Abschnitt 4	0,1%			-1,2%			-4,0%		

Tab. 3.8: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für **PM10** (Abgas) in Fahrtrichtung **Norden**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1)

Efaktor PM10 [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri Nord									
gesamt	0,004	0,001	38%	0,018	0,006	35%	0,053	0,065	122%
Abschnitt 5	0,004	0,002	37%	0,018	0,006	31%	0,046	0,032	70%
Abschnitt 6	0,003	0,003	78%	0,017	0,012	69%	0,062	0,108	174%
T30 Ri Nord									
gesamt	0,005	0,001	25%	0,021	0,003	12%	0,056	0,011	20%
Abschnitt 5	0,006	0,002	31%	0,023	0,005	21%	0,059	0,020	34%
Abschnitt 6	0,005	0,002	38%	0,019	0,004	22%	0,052	0,013	25%
Änderung									
gesamt	37,5%			19,6%			6,3%		
Abschnitt 5	36,4%			25,2%			28,4%		
Abschnitt 6	39,2%			12,7%			-16,1%		

Tab. 3.9: Mittlere („warme“) Emissionsfaktoren für **PM10** (Abgas) in Fahrtrichtung **Süden**, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 5 und 6 nach Tab. 2.1)

Efaktor PM10 [g/km]	Pkw			INFz			sNFz		
	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.	MW	stddev abs.	stddev rel.
T50 N Ri Süd									
gesamt	0,026	0,004	15%	0,105	0,009	9%	0,316	0,036	11%
Abschnitt 5	0,022	0,005	21%	0,090	0,015	17%	0,293	0,055	19%
Abschnitt 6	0,030	0,009	29%	0,122	0,022	18%	0,341	0,070	20%
T30 Ri Süd									
gesamt	0,025	0,004	16%	0,114	0,020	17%	0,347	0,055	16%
Abschnitt 5	0,021	0,004	17%	0,110	0,029	27%	0,340	0,078	23%
Abschnitt 6	0,029	0,008	29%	0,120	0,027	23%	0,355	0,074	21%
Änderung									
gesamt	-3,5%			8,8%			9,9%		
Abschnitt 5	-3,1%			22,0%			16,0%		
Abschnitt 6	-3,8%			-2,0%			4,1%		

Beim Vergleich der Emissionsfaktoren T30 mit den Emissionsfaktoren T50-Normalfahrt zeigen sich bei NO_x für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge in den meisten Fahrtrichtungen Abnahmen, eine Ausnahme stellt für die Pkw die Fahrtrichtung nach Norden dar. Diese Strecke ist durch ein starkes Gefälle charakterisiert. Die Pkw können zum Großteil bei T50 in einem günstigen Gang „bergab rollen“. Für die schweren Nutzfahrzeuge gibt es bei NO_x Emissionszunahmen in den Richtungen Osten und Süden und Abnahmen in den Richtungen Westen und Norden. Bei den PM10-Abgas-Emissionsfaktoren gibt es teils Ab- teils Zunahmen.

Ähnliche Tendenzen, allerdings auch zum Teil gegenläufige Effekte, ergeben sich bei der Betrachtung der Einzelabschnitte. Wie oben schon erläutert, sind jedoch die Unsicherheiten bei Betrachtung der Einzelabschnitte groß.

3.4 Gegenüberstellung der Emissionsfaktoren zu HBEFA3.1

Üblicherweise werden zur Ermittlung der Emissionen auf einem Streckenabschnitt keine individuellen Messfahrten durchgeführt, sondern die Berechnung erfolgt auf der Basis des HBEFA3.1. Zu deren Bestimmung muss dem Streckenabschnitt eine Hauptverkehrssituation und eine Steigung/Gefälle-Klasse zugewiesen werden. In Abhängigkeit des Tagesganges des Störungsgrades werden dann die Emissionen berechnet.

Den betrachteten Streckenabschnitten wurde die Hauptverkehrssituation „Distributor Speedlimit 50 km/h“ zugewiesen, da es sich um innerörtliche Hauptverkehrsstraßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h handelt.

Angesichts der hohen Unsicherheiten auf den Einzelabschnitten sollen hier jedoch nur die Emissionsfaktoren für die Gesamtstrecken verglichen werden. Die Ost-West-Strecke verläuft im Wesentlichen ohne Gefälle, daher wird für den Vergleich mit dem Handbuch eine Steigung von 0% für die angenommen. Für die Nord-Süd-Strecke liegt die Steigung teilweise über 6%. Da die höchste nach HBEFA3.1 auswählbare Steigung 6% beträgt, wird für den Vergleich in Fahrtrichtung Norden -6% und in Fahrtrichtung Süden +6% Steigung angesetzt.

Für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge sind die Emissionsfaktoren nach HBEFA3.1 in Bild 3.10 (NO_x) und Bild 3.11 (PM₁₀, Abgas) den Emissionsfaktoren gegenübergestellt, die über die Messfahrten und PHEM-Berechnungen ermittelt wurden. Ziel war es, zu analysieren inwieweit mit den Basisdaten aus HBEFA3.1 die Emissionssituation an dem betrachteten Streckenabschnitt für die Ist-Situation T50 abgebildet werden kann.

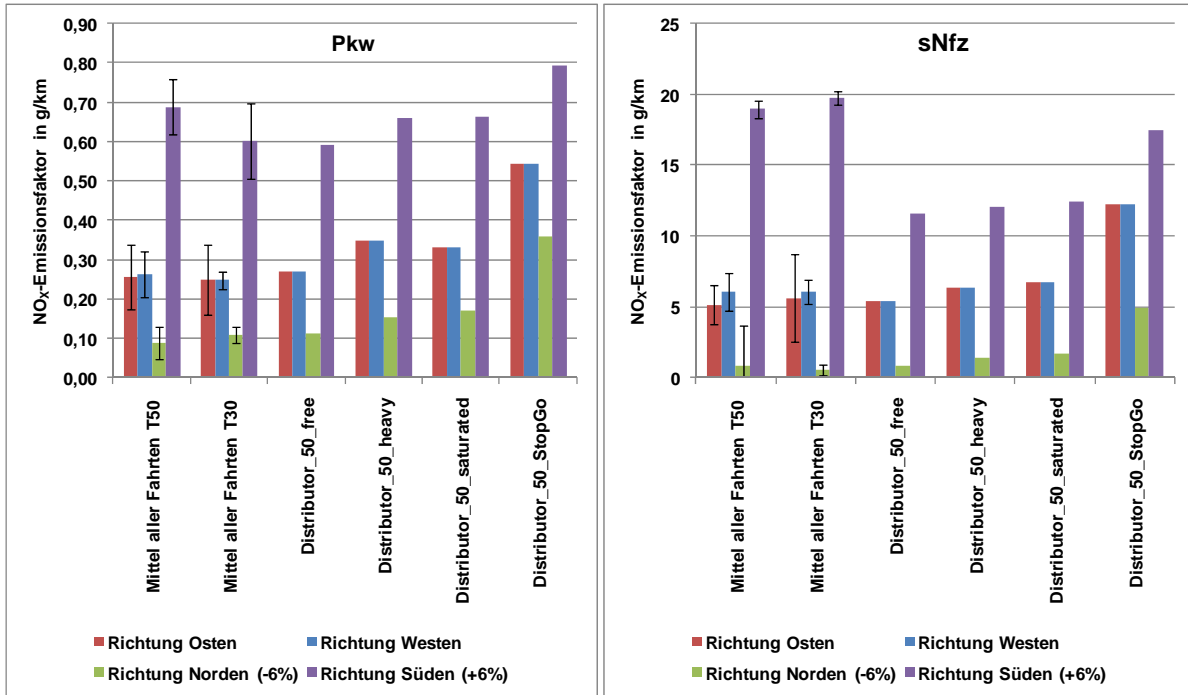


Bild 3.10: Vergleich der warmen NO_x-Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „Distributor 50 km/h“ mit unterschiedlichen Störungsgraden aus HBEFA3.1 mit den mittleren („warmen“) Emissionsfaktoren abgeleitet aus den Messfahrten für Pkw und sNfz für die Ortsdurchfahrten in Freiberg

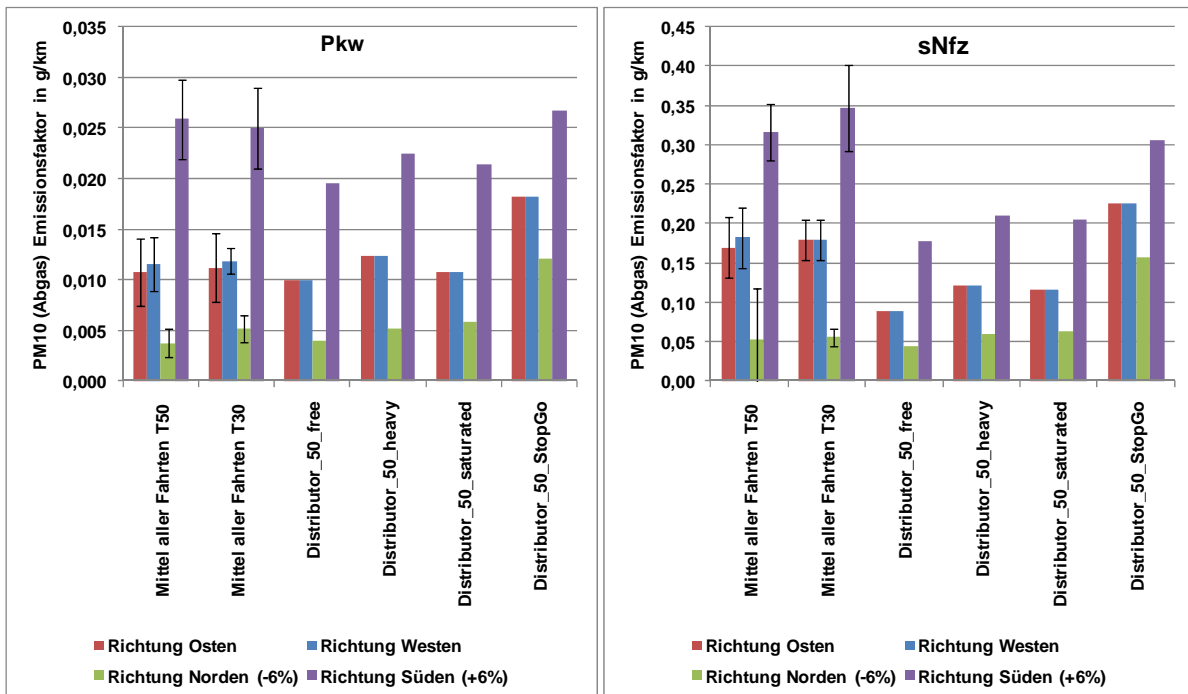


Bild 3.11: Vergleich der warmen PM10-Emissionsfaktoren für die Verkehrssituation „Distributor 50 km/h“ mit unterschiedlichen Störungsgraden aus HBEFA3.1 mit den mittleren („warmen“) Emissionsfaktoren abgeleitet aus den Messfahrten für Pkw und sNfz für die Ortsdurchfahrten in Freiberg

Dieser Vergleich wurde für die „warmen“ Emissionsfaktoren durchgeführt, da in HBEFA3.1 die warmen Emissionsfaktoren und der Kaltstartzuschlag (für Pkw und INfz) separat ausgewiesen werden und die PHEM-Berechnungen ausschließlich für den warmen Motor durchgeführt worden sind.

Aus den gemessenen Fahrprofilen konnte abgeleitet werden, dass der Störungsgrad im Tagzeitbereich im Bereich von geringen (free) bis mittleren Störungen (heavy) liegt. Auf Teilabschnitt 6 traten bei einer Fahrt auch große Störungen mit Stop&Go-Verkehr auf.

In Ost-West Richtung sind für die Pkw die aus den Messfahrten abgeleiteten Emissionsfaktoren sowohl für NO_x wie auch für PM10 mit den Emissionsfaktoren nach HBEFA3.1 für die relevanten Verkehrssituationen verträglich. Bei den Fahrten in Richtung Nord-Süd-Richtung macht sich bemerkbar, dass durch die maximale Steigung nach HBEFA3.1 die tatsächliche Steigung noch etwas unterschätzt wird: Hier liegen die Emissionsfaktoren in Richtung Norden (Gefälle >6%) unter den relevanten Werten aus dem Handbuch, in Richtung Süden entsprechend darüber.

Für die schweren Nutzfahrzeuge sieht es ähnlich aus, der Effekt ist nur noch deutlicher. Insbesondere für PM10 in Fahrtrichtung Süden liegen die aus den Messfahrten abgeleiteten Emissionsfaktoren deutlich über den zu erwartenden Werten nach dem Handbuch.

3.5 Jahresemissionen

Mit dem aus den Verkehrszählungen berechneten durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV, Tab. 2.3) können die Emissionsfaktoren zu Jahresemissionen in Kilogramm pro Kilometer und Jahr hochgerechnet werden. Als Summe über die Fahrzeuggruppen und Richtungen ergeben sich die in Tab. 3.10 angegebenen Werte.

Tab. 3.10: „Warme“ Abgas-Emissionen (NO_x und PM10, Abgas) für die Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1)

	NO_x	stddev NO_x	stddev rel.	PM10 (Abgas)	stddev PM10	stddev rel.
	[kg/(km*a)]			[kg/(km*a)]		
T50 N						
W-O gesamt	2.705	699	25,8%	108	26	24,2%
Abschnitt 1	2.380	1.393	58,5%	97	45	46,6%
Abschnitt 2	2.233	838	37,5%	84	29	34,4%
Abschnitt 3	2.945	1.786	60,6%	119	61	50,8%
Abschnitt 4	3.399	1.687	49,6%	137	59	42,8%
N-S gesamt	2.091	316	15,1%	67	13	19,2%
Abschnitt 5	1.943	368	19,0%	66	15	23,1%
Abschnitt 6	2.190	692	31,6%	66	23	35,2%
T30						
W-O gesamt	2.667	757	28,4%	109	20	18,4%
Abschnitt 1	2.160	465	21,5%	90	21	23,1%
Abschnitt 2	2.226	747	33,6%	89	23	25,9%
Abschnitt 3	3.353	2.526	75,3%	131	70	53,7%
Abschnitt 4	3.005	1.204	40,1%	129	40	30,9%
N-S gesamt	2.001	210	10,5%	70	12	17,0%
Abschnitt 5	1.990	338	17,0%	73	16	22,2%
Abschnitt 6	1.984	362	18,3%	66	18	27,1%
Änderung						
W-O gesamt	-1,4%			1,1%		
Abschnitt 1	-9,2%			-7,1%		
Abschnitt 2	-0,3%			5,2%		
Abschnitt 3	13,9%			10,0%		
Abschnitt 4	-11,6%			-5,5%		
N-S gesamt	-4,3%			4,9%		
Abschnitt 5	2,4%			10,4%		
Abschnitt 6	-9,4%			0,4%		

Es ergeben sich für die Ortsdurchfahrten Freiberg für die motorbedingten „warmen“ Emissionen in West-Ost-Richtung insgesamt Abnahmen von -1% bei NO_x und Zunahmen von +1% bei PM10 (Abgas). In Nord-Süd-Richtung gibt es bei NO_x Abnahmen von -4%, bei PM10 Zunahmen von +5%.

In Teilabschnitt 3, auf dem sich die Messstation befindet, würde die Einführung von T30 hingegen zu Emissionszunahmen führen. Aufgrund der teilweise hohen Streuungen bei den Einzelabschnitten sind hier entsprechend auch die Aussagen unsicherer als für die Gesamtabschnitte.

Die Berechnung der Jahresemissionen einschließlich der Kaltstarts wurde unter Berücksichtigung folgender Annahmen durchgeführt:

- Für die Kaltstartemissionen, die in HBEFA3.1 für Pkw und INfz zusätzlich ausgewiesen sind, wurde angenommen, dass diese durch die Veränderung von T50 auf T30 unbeeinflusst bleiben, da keine weiteren Daten hierzu vorliegen. Die Kaltstartemissionen werden in Form eines Zuschlages auf die warmen Emissionen addiert.
- Die PM10-Emissionen verursacht durch Aufwirbelung und Abrieb wurden nach den Ansätzen aus /AVISO 2009/ ermittelt. Ergänzend wurde in Anlehnung an /BAST 2009/ angenommen, dass diese auf allen Abschnitten durch die Einführung von T30 um ca. 10% reduziert werden können.

In Tab. 3.11 sind die so bestimmten Jahresemissionen für T50 sowie T30 mit angenommenen Befolgungsgraden von 100% und 50% für die Gesamtstrecke dargestellt.

Tab. 3.11: Zusammensetzung der Jahresemissionen (NO_x und PM10) für die Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile

jährliche Emissionen [kg/(km*a)]	NO _x Strecke W-O	NO _x Strecke N-S	PM10 Strecke W-O	PM10 Strecke N-S
"Warme" Emissionen T50	2.705	2.091	108	67
"Warme" Emissionen T30	2.667	2.001	109	70
Kaltstartzuschlag	95	56	19	13
Aufwirbelung und Abrieb T50			211	105
Aufwirbelung und Abrieb T30			190	95
Jahresemissionen T50	2.800	2.147	338	185
Jahresemissionen T30, Befolgungsgrad 100%	2.763	2.057	318	178
Jahresemissionen T30, Befolgungsgrad 50%	2.781	2.102	328	181
Änderung Befolgungsgrad 100%	-1,3%	-4,2%	-5,9%	-3,9%
Änderung Befolgungsgrad 50%	-0,7%	-2,1%	-2,9%	-2,0%

In Tab. 3.12 sind diese Jahresemissionen richtungstrennt für die Einzelabschnitte angegeben (nur Befolgungsgrad 100%). Ebenso angegeben sind die durch Einführung von T30 jeweils erreichbaren Emissionsminderungen.

Tab. 3.12: Jahresemissionen (NO_x und PM10 inklusive Kaltstartzuschlägen sowie Aufwirbelung und Abrieb), richtungsgetreunt für die Teilstrecken der Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (angenommener Befolgungsgrad: 100%, Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1)

Gesamt- emissionen [kg/(km*a)]	NO _x	PM10 (gesamt)	NO _x	PM10 (gesamt)	NO _x	PM10 (gesamt)
	Fahrrichtung Osten		Fahrrichtung Westen		gesamt	
T50 N						
gesamt	1.336	167,2	1.464	170,9	2.800	338,1
Abschnitt 1	1.444	163,5	1.029	145,7	2.473	309,2
Abschnitt 2	701	126,0	1.618	151,1	2.320	277,1
Abschnitt 3	1.580	201,3	1.487	201,8	3.067	403,0
Abschnitt 4	1.846	185,0	1.634	183,3	3.480	368,3
T30				-		
gesamt	1.357	158,0	1.406	160,2	2.763	318,2
Abschnitt 1	1.128	143,1	1.126	139,7	2.253	282,8
Abschnitt 2	791	122,6	1.522	140,9	2.312	263,5
Abschnitt 3	2.015	202,5	1.460	186,5	3.475	388,9
Abschnitt 4	1.678	168,1	1.409	171,9	3.087	340,0
Veränderung						
gesamt	1,6%	-5,5%	-4,0%	-6,2%	-1,3%	-5,9%
Abschnitt 1	-21,9%	-12,5%	9,4%	-4,1%	-8,9%	-8,5%
Abschnitt 2	12,7%	-2,7%	-6,0%	-6,7%	-0,3%	-4,9%
Abschnitt 3	27,5%	0,6%	-1,8%	-7,6%	13,3%	-3,5%
Abschnitt 4	-9,1%	-9,1%	-13,8%	-6,2%	-11,3%	-7,7%
Gesamt- emissionen [kg/(km*a)]	NO _x	PM10 (gesamt)	NO _x	PM10 (gesamt)	NO _x	PM10 (gesamt)
	Fahrrichtung Norden		Fahrrichtung Süden		gesamt	
T50 N						
gesamt	199	68,0	1.948	117,0	2.147	185,0
Abschnitt 5	200	74,8	1.806	120,0	2.007	194,8
Abschnitt 6	200	60,4	2.039	111,1	2.238	171,5
T30						
gesamt	214	65,1	1.843	112,7	2.057	177,8
Abschnitt 5	248	72,5	1.805	117,8	2.053	190,4
Abschnitt 6	177	56,9	1.856	105,3	2.032	162,2
Veränderung						
gesamt	8,8%	-4,2%	-5,4%	-3,7%	-4,2%	-3,9%
Abschnitt 5	28,4%	-3,1%	-0,1%	-1,8%	2,3%	-2,3%
Abschnitt 6	-13,0%	-5,8%	-9,0%	-5,3%	-9,2%	-5,4%

Wie schon bei den Emissionsfaktoren (siehe Tab. 3.2 bis Tab. 3.9) gibt es auch bei den Gesamtemissionen in den Fahrrichtungen Westen und Süden für NO_x und PM_{10} Abnahmen, die zwischen -4% und -6% liegen. In Fahrtrichtung Osten (Norden) treten bei NO_x Zunahmen von 2% (9%) und bei PM_{10} Abnahmen von -6% (-4%) auf.

Über beide Fahrrichtungen gemittelt überwiegen die Abnahmen: Auf der Ost-West-Strecke (Nord-Süd-Strecke) ergeben sich Abnahmen von -1% (-4%) bei NO_x und -6% (-4%) bei PM_{10} . Auf Abschnitt 3, auf dem sich die Messstation befindet, kommt es bei NO_x jedoch auch richtungsgemittelt zu Zunahmen. Hier sind, wie auch bei den Emissionsfaktoren und den „warmen“ Emissionen, hohe Unsicherheiten aufgrund der Kürze des Abschnitts zu beachten.

In Bild 3.12 sind die Jahresemissionen bei angenommenem Befolgungsgrad von 100% auch für die Einzelabschnitte grafisch dargestellt.

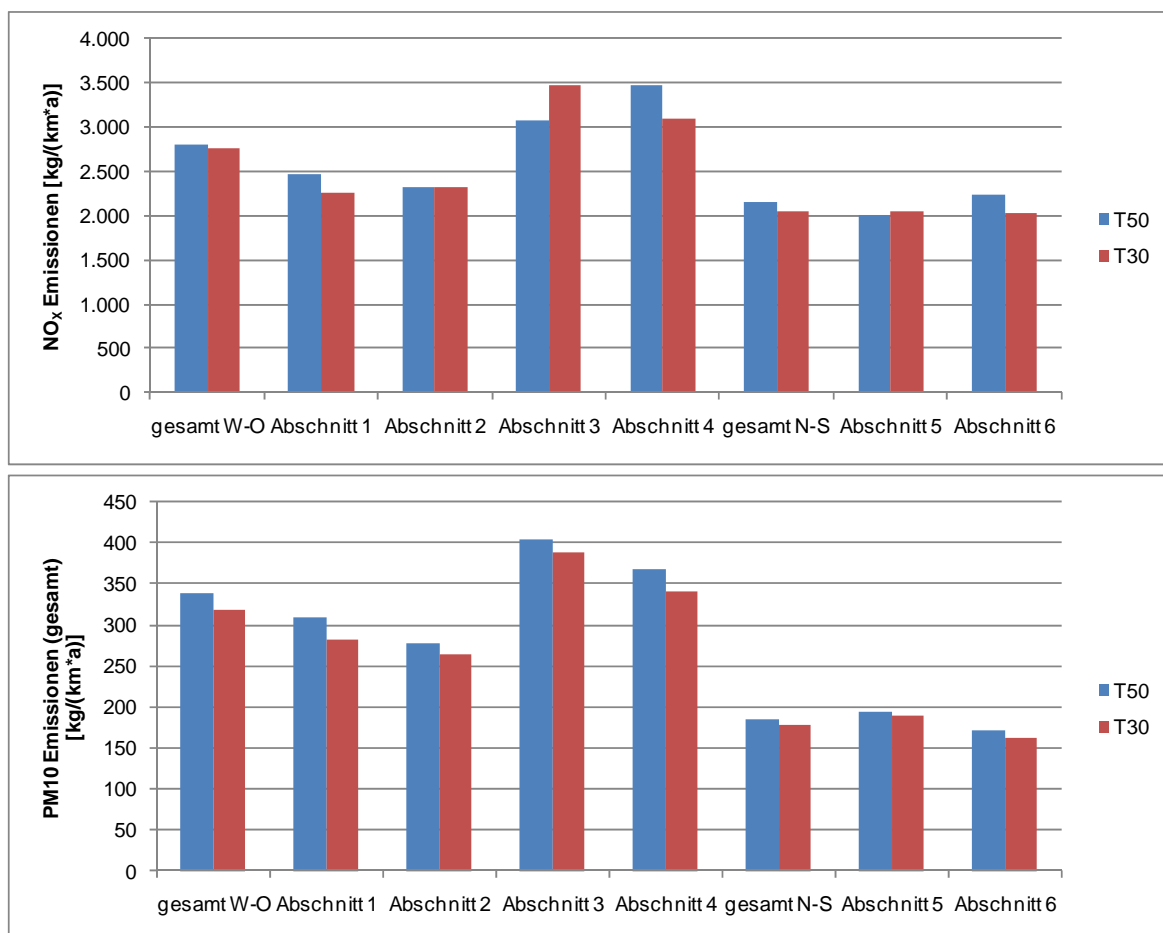


Bild 3.12: Jahresemission (oben: NO_x , unten: PM_{10} (gesamt)) unter Berücksichtigung von Kaltstarts sowie Aufwirbelung und Abrieb für die Ortsdurchfahrten Freiberg, abgeleitet aus den mit PHEM berechneten Emissionen auf Basis der gemessenen Fahrprofile (angenommener Befolgungsgrad: 100%)

4 Weitere Maßnahmen zur Verstetigung des Verkehrs

Als Alternative oder Ergänzung zur Einführung eines Tempolimits 30 km/h kommen zur Senkung von Verkehrsemissionen auch verkehrsverflüssigende Maßnahmen in Betracht. Die Auswirkungen solcher Maßnahmen auf die NO_x- bzw. PM10-Emissionen sollen im folgenden Kapitel untersucht werden.

Zur Abschätzung der maximal durch Verflüssigung möglichen Emissionsminderungen werden in Abschnitt 4.1 alle signifikanten Störungen des Verkehrsflusses (betätigte Fußgängerampeln, Linksabbieger in Nebenstraßen und ein-/ausparkende Fahrzeuge am Randstreifen) aus den gemessenen Fahrprofilen (T50) eliminiert. Dann werden die Emissionen der so „verflüssigten“ Fahrprofile berechnet.

In Abschnitt 0 werden die Emissionsminderungen, die durch ein Abschalten aller Fußgängerbedarfs-LSA auf den Messstrecken erreichbar wären, abgeschätzt.

In Abschnitt 4.2 wird mittels einer Mikrosimulation gezielt untersucht, welche Auswirkung allein das Unterbinden von Linksabbiegern in Nebenstraßen auf den Verkehrsfluss hat.

Nach den Beobachtungen unserer Testfahrer stellten ein- oder ausparkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand kein großes Verkehrshindernis dar, so dass hierzu keine weiteren Untersuchungen für Ingersheim durchgeführt wurden.

4.1 Maximales Potential für eine Verkehrsverflüssigung

Im folgenden Abschnitt wird abgeschätzt, wie groß die maximal durch Verkehrsverflüssigungen erreichbaren Emissionsminderungen sind. Mögliche Ursachen für Störungen des Verkehrsflusses sind betätigte Fußgängerbedarfsampeln, Linksabbieger in Nebenstraßen sowie ein- oder ausparkende Fahrzeuge am Fahrbahnrand. Für die Maximalabschätzung werden alle diese Störungen aus den gemessenen Fahrprofilen „eliminiert“. Entscheidungskriterium für eine Störung ist

- eine signifikante Verringerung der Geschwindigkeit, gefolgt von
- einer signifikant erhöhten Beschleunigung.

Durch die Linienführung der Straße bedingte fahrdynamische „Störungen“ sowie die Halte an der Einmündung L 1129 / L 1138 bleiben beibehalten. In den identifizierten Störungsbereichen werden mittlere Emissionsfaktoren der „ungestörten“ Fahrten angesetzt. In Bild 4.1 ist dieses Vorgehen exemplarisch für eine Pkw-Fahrt dargestellt.

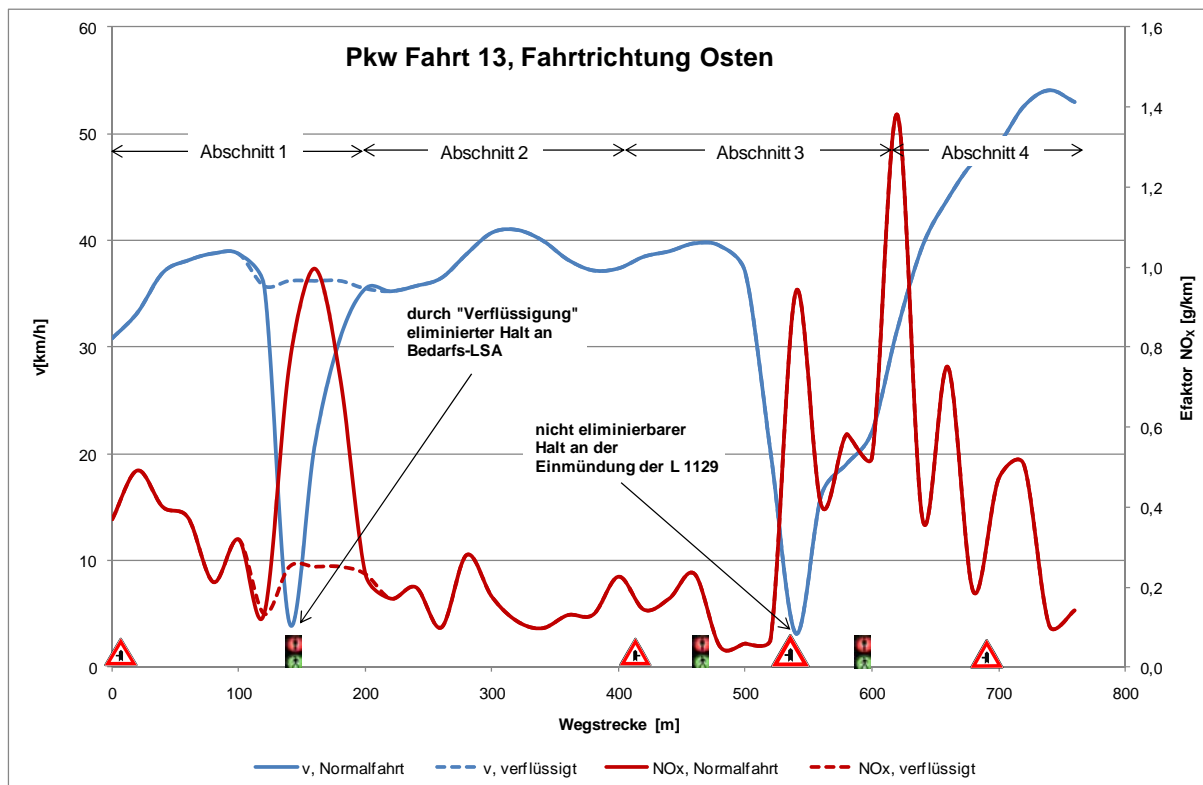


Bild 4.1: Exemplarische Darstellung der „Verflüssigung“ der Fahrprofile und der Auswirkungen auf die NO_x-Emissionsfaktoren

Tab. 4.1: **Maximale Verkehrsverflüssigung:** Jährliche NO_x- und PM₁₀ (gesamt)-Emissionen für die originalen T50-Fahrprofile¹ sowie für „verflüssigte“ Fahrprofile ohne eliminierbare Störungen (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1).

Gesamt-emissionen	NO _x	PM ₁₀	NO _x	PM ₁₀	Veränderung (maximale "Verflüssigung")
	[kg/(km*a)] originale Fahrprofile		[kg/(km*a)] maximal "verflüssigte" Fahrprofile		
gesamt W-O	2.800	338	2.665	323	-4,8% -4,5%
Abschnitt 1	2.473	309	2.034	286	-17,7% -7,4%
Abschnitt 2	2.320	277	2.320	277	0,0% 0,0%
Abschnitt 3	3.067	403	3.033	387	-1,1% -3,9%
Abschnitt 4	3.480	368	3.480	368	0,0% 0,0%
gesamt N-S	2.161	185	2.113	179	-2,2% -3,3%
Abschnitt 5	2.008	195	1.935	188	-3,6% -3,7%
Abschnitt 6	2.269	171	2.226	171	-1,9% -0,3%

¹ Bei der Berechnung der Jahresemissionen in Tab. 3.12 wurden T50- und T30-Fahrten so gewichtet, dass vergleichbare Störungsgrade gewährleistet sind. Die Gesamtemissionen in Tab. 4.1 basieren dagegen auf allen T50-Messfahrten. Daher können im Vergleich zu Tab. 3.12 leicht abweichende Werte auftreten.

Aus den so bestimmten Emissionsfaktoren für die „verflüssigten“ Fahrten wurden analog zum Verfahren in Kapitel 3 unter den in Abschnitt 3.5 beschriebenen Annahmen Jahresemissionen für NO_x und PM10 einschließlich Aufwirbelung und Abrieb berechnet. Diese sind, wie auch die Gesamtemissionen der ursprünglichen Fahrprofile, in Tab. 4.1 angegeben.

Das maximale Minderungspotential durch Verflüssigung beträgt in Richtung Ost-West (Nord-Süd) -5% (-2%) für die NO_x- und -5% (-3%) für die PM10-Emissionen.

Auswirkungen eines Abschaltens der Fußgängerbedarfs-LSA

Im vorherigen Abschnitt wurden die Auswirkung einer maximalen Verflüssigung durch Eliminierung von Störungen unterschiedlicher Ursachen auf die Emissionen abgeschätzt. Im folgenden werden nur die Auswirkungen eines Abschaltens der Fußgängerbedarfs-LSA betrachtet. Hierzu wurden die Störungsanteile durch Auswertung von 30minütigen Videoaufnahmen an diesen Ampeln bestimmt. Die resultierenden Emissionsminderungen sind in Tab. 4.2 ausgewiesen.

Die durch die Abschaltung der Bedarfs-LSA erreichbaren Emissionsminderungen finden sich vornehmlich im Bereich der Fußgängerbedarfs-LSA über die Mühlstraße in Abschnitt 1. Während der Messfahrten war dies die von Fußgängern am häufigsten frequentierte Ampel in Freiberg, fast 7% aller im Zeitraum der Videoaufnahmen erfassten Fahrzeuge mussten dort ihre Geschwindigkeit signifikant reduzieren, teilweise bis zum Stillstand. Die Emissionsminderungen, die in Abschnitt 3 durch ein Abschalten dieser LSA erreichbar wären, betragen für NO_x -8% und PM10 -3%.

Tab. 4.2: **Verkehrsverflüssigung durch Abschalten der Bedarfs-LSA: Jährliche NO_x- und PM10 (gesamt)- Emissionen für die originalen T50-Fahrprofile sowie für Profile ohne Halte an Fußgängerbedarfs-LSA (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1)**

Gesamtemissionen	NO _x	PM10	NO _x	PM10	NO _x	PM10
	[kg/(km*a)]		[kg/(km*a)]		Veränderung durch Abschalten der Bedarfs-LSA	
	originale Fahrprofile		Fahrprofile ohne Halte an Bedarfs-LSA			
gesamt W-O	2.800	338	2.743	332	-2,0%	-1,9%
Abschnitt 1	2.473	309	2.275	299	-8,0%	-3,3%
Abschnitt 2	2.320	277	2.320	277	0,0%	0,0%
Abschnitt 3	3.067	403	3.033	387	-1,1%	-3,9%
Abschnitt 4	3.480	368	3.480	368	0,0%	0,0%
gesamt N-S	2.161	185	2.111	182	-2,3%	-1,8%
Abschnitt 5	2.008	195	1.946	189	-3,1%	-3,1%
Abschnitt 6	2.269	171	2.232	171	-1,6%	-0,2%

Die weiteren Bedarfsampeln in Freiberg werden weniger häufig betätigt, ihr Abschalten würde entsprechend zu geringeren Emissionsreduktionen führen. Die Störungen zwischen Abschnitt 2 und Abschnitt 3 sind durch die Einmündung der Ludwigsburger Straße verursacht und können durch Verflüssigungsmaßnahmen nicht weiter reduziert werden.

Insgesamt ergibt sich in Richtung Ost-West wie auch in Richtung Nord-Süd ein Einsparpotential von jeweils -2% für NO_x- und PM10-Emissionen durch ein Abschalten der Fußgängerbedarfs-LSA.

4.2 Wirkungen von Linksabbiegeverboten in Nebenstraßen

Im Rahmen einer Mikrosimulation können gezielt einzelne Prozesse untersucht werden. So wurde hier die Wirkung der Linksabbieger ohne eigene Abbiegespur in Nebenstraßen auf den Verkehrsfluss auf der Hauptstraße untersucht. Das eingesetzte Mikrosimulationsmodell ist in /TRAFFGO 1992/ beschrieben.

Die Basis für die Simulationen bildeten die Fahrprofile der normalen T50-Fahrten. Das Modell wurde mit diesen Messfahrten kalibriert, dazu wurden 1.045 Normalfahrten in Nord-Süd-Richtung und 875 Normalfahrten in Ost-West-Richtung simuliert. Anschließend wurden in Nord-Süd-Richtung 1.139 und in Ost-West-Richtung 932 T50-Fahrten simuliert, bei denen Linksabbieger in Nebenstraßen unterdrückt wurden.

Die Simulationsergebnisse sind jeweils in Form der Parameter „mittlere Geschwindigkeit“, „RPA“, „Standzeitanteil“ und „Konstantfahrtanteil“ für beide Messstrecken getrennt nach Richtungen sowohl für die Normalfahrten wie auch für die nicht durch Linksabbiegen in Nebenstraßen gestörten Fahrten in Tab. 4.3 zusammengefasst.

Das Unterdrücken von Linksabbiegern ohne eigene Abbiegespur in Nebenstraßen führt in Richtung Westen, Norden und Süden nur zu einer geringen Verstärkung des Verkehrsflusses auf der Hauptstraße, die Abnahme von RPA liegt unter -2%. In Richtung Osten nimmt RPA sogar zu. Die Störungen werden durch Unterdrücken von Linksabbiegern demnach nicht vermieden, sondern es kommt lediglich zu räumlichen Verlagerungen.

In Richtung Osten sind aufgrund des steigenden RPA Emissionszunahmen zu erwarten, in den anderen Richtungen liegen mögliche Emissionsminderungen unter einem Prozent.

Tab. 4.3: RPA und mittlere Geschwindigkeit v_m der simulierten Fahrprofile auf den Messstrecken, jeweils T50 Normalfahrt und T50 mit Unterdrückung der Linksabbieger ohne eigene Abbiegespur in Nebenstraßen (Abschnitt 1 bis 6 nach Tab. 2.1)

Fahrparameter	Richtung Osten		Richtung Westen		Richtung Norden		Richtung Süden	
	Wert	stdev	Wert	stdev	Wert	stdev	Wert	stdev
Normalfahrt T50								
RPA [m/s ²]	0,122	0,026	0,137	0,028	0,183	0,040	0,169	0,033
v_m [km/h]	41,9	3,7	39,7	4,2	33,4	5,8	36,0	4,9
Standzeitanteil	1,4%	2,5%	2,4%	3,2%	5,0%	4,7%	3,9%	4,4%
Konstantfahrtanteil	90,4%	5,8%	87,2%	5,9%	78,5%	7,1%	80,4%	6,4%
Linksabbieger unterdrückt								
RPA [m/s ²]	0,123	0,023	0,134	0,029	0,180	0,040	0,166	0,032
v_m [km/h]	41,2	4,2	39,6	4,6	33,1	6,1	36,5	4,8
Standzeitanteil	2,0%	3,2%	2,5%	3,1%	5,5%	5,2%	3,6%	4,5%
Konstantfahrtanteil	89,9%	5,7%	87,4%	6,6%	79,0%	7,0%	80,9%	6,5%
Änderung								
RPA [m/s ²]	1,2%		-1,6%		-1,6%		-1,8%	
v_m [km/h]	-1,8%		-0,4%		-1,1%		1,5%	
Standzeitanteil	42,1%		6,8%		9,4%		-7,6%	
Konstantfahrtanteil	-0,5%		0,3%		0,6%		0,6%	

5 Grundlagen der Immissionsberechnung

5.1 Einleitung

Das Strömungs- und Ausbreitungsfeld in bebauten Gebieten wird maßgeblich durch die Gebäude geprägt. Es bilden sich zum Teil sehr komplexe, dreidimensionale Strömungszonen wie Nachlaufzonen, Rückströmzonen und Wirbelgebiete aus. Zur flächendeckenden, detaillierten Prognostizierung der Immissionskonzentrationen unter Berücksichtigung der realen Bebauung kommen in aller Regel numerische Modelle zum Einsatz, die in der Lage sind, diese komplexen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse abzubilden. Alternativ werden häufig für eine Ersteinschätzung vereinfachte Verfahren, so genannte Screening-Modelle, eingesetzt, bei denen gegenüber detaillierten Berechnungen bzgl. der Genauigkeit Abstriche zu machen sind. Diese Vorgehensweise wird für Freiberg gewählt. Das Verfahren sowie die für die Berechnungen benötigten Eingangsparameter werden im Folgenden beschrieben.

5.2 Das Screeningmodell

Ein Screening-Modell ist ein Verfahren, mit dessen Hilfe unter Vorgabe bestimmter Randbedingungen die Immissionskonzentrationen im Nahbereich von Quellen abgeschätzt werden können. Die Grundlage des hier eingesetzten Screening-Modells ISIS /Bangert, 1996/ bilden so genannte Transmissionskoeffizienten, die im Vorfeld mit dem komplexen mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodell MISKAM /Eichhorn, 1989/ für standardisierte Randbedingungen gewonnen und in einer Datenbank abgelegt werden. „Standardisierte Randbedingungen“ bedeutet, dass die Transmissionskoeffizienten für fest vorgegebene

- Einheitsquellen (Lage und Größe)
- Emissionen $E_{\text{Screening}}$ (in diesem Fall die Kfz-erzeugten Emissionen)
- Windgeschwindigkeiten $U_{\text{Screening}}$
- Windrichtungen
- und Bebauungsstrukturen

ermittelt wurden. Für eine real gegebene Situation kann daraus die Immission I_{real} durch eine einfache lineare Skalierung der Transmissionskoeffizienten ($I_{\text{screening}}$) mit der tatsächlich vorhandenen Emission E_{real} und reziproken Skalierung mit der Windgeschwindigkeit U_{real} ermittelt werden:

$$I_{\text{real}} = I_{\text{Screening}} \cdot \frac{E_{\text{real}}}{E_{\text{Screening}}} \cdot \frac{U_{\text{Screening}}}{U_{\text{real}}}$$

Dieser Transformation liegt die Annahme zugrunde, dass bei gleicher Bebauungsstruktur, Quellposition, Anströmrichtung und atmosphärischer Schichtung die Immissionskonzentrationen reziprok von der Windgeschwindigkeit und linear von den Emissionen abhängen. Bei

einer real doppelt so hohen Windgeschwindigkeit bzw. Emissionsstärke verglichen mit der Einheitswindgeschwindigkeit und -emission, die bei der Generierung der dem Screening-Modell zugrunde liegenden Ergebnisse gewählt wurden, halbieren bzw. verdoppeln sich die Immissionswerte. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten führt diese Annahme zu Abweichungen im Vergleich zu den realen Immissionskonzentrationen, da die durch Kfz erzeugte Turbulenz und gegebenenfalls auch thermische Effekte zunehmend an Einfluss gewinnen. Allerdings sind sowohl die Bestimmung des Einflusses fahrzeuginduzierter Turbulenz als auch thermischer Einflüsse innerhalb einer Bebauung und deren Berücksichtigung selbst in prognostischen mikroskaligen Strömungs- und Ausbreitungsmodellen zurzeit noch nicht Stand der Technik. Durch die Nichtberücksichtigung bspw. der durch Kfz erzeugten Turbulenz liegt man im Sinne einer konservativen Betrachtung eher auf der sicheren Seite.

Variable Größen des Screening-Modells ISIS sind die mittlere Bebauungshöhe eines Straßenabschnitts, die mittlere Straßenbreite und die Bebauungsstruktur der Randbebauung. Dem Modell ISIS liegen folgende standardisierte Bebauungsstrukturen zugrunde:

- beidseitig geschlossene Randbebauung (Straßenschlucht)
- einseitig geschlossene, einseitig offene Randbebauung
- beidseitig durchbrochene Randbebauung
- einseitig durchbrochene, einseitig offene Randbebauung
- einseitig geschlossene, einseitig durchbrochene Randbebauung.

Das Screening-Modell liefert als Ergebnis eine mittlere Immissionskonzentration für den betrachteten Straßenabschnitt. Je näher die standardisierte Bebauungsstruktur dabei der tatsächlichen Bebauung kommt, desto besser ist die Übereinstimmung zwischen der Realität und der Screening-Berechnung.

5.3 Festlegung der Bebauungsstrukturen

Zur Festlegung der Bebauungsstrukturen wurden folgende Unterlagen verwendet:

- Katasterpläne
- Luftbildaufnahmen
- Videoaufnahmen.

Auf der Basis dieser Unterlagen wurden die mittleren Gebäudehöhen für einzelne Streckenabschnitte der Benninger Straße zwischen der Kreuzung mit der Ludwigsburger Straße und der Mühlstraße im Westen bzw. dem Ortsausgang im Osten, der Ludwigsburger Straße zwischen Bahnhofstraße im Süden und der Kreuzung mit der Benninger Straße/Mühlstraße im Norden sowie der Mühlstraße zwischen der Spaltung der Mühlstraße im Westen und der Kreuzung mit der Ludwigsburger Straße/Benninger Straße im Osten festgelegt. Das Screening-Modell kennt keine unterschiedlichen Gebäudehöhen für eine beidseitige Bebauung. Im Sinne einer konservativen Betrachtung wird bei unterschiedlicher mittlerer Bebauungshöhe die jeweils höhere mittlere Gebäudehöhe für beide Straßenseiten zugrunde gelegt. Neben

der mittleren Straßenbreite wurde aus den Katasterplänen für jeden Streckenabschnitt die Porosität der Straßenrandbebauung ermittelt. Nach Definition in ISIS ist ab einer Porosität von größer 40% von einer durchbrochenen Randbebauung auszugehen. Das Screening-Modell benötigt neben den Bebauungsstrukturen- und Geometrien auch noch die Straßenausrichtung gegen Nord. Diese wurde aus dem im Straßennetzmodell gegebenen Anfangs- und Endkoordinaten eines jeden Streckenabschnitts ermittelt.

Die für die Immissionsabschätzung gewählten Streckenabschnitte sind Abschnitte mit jeweils gleich bleibenden Verkehrs- und damit Emissionswerten sowie ähnlicher Bebauungsstruktur, Straßengeometrie sowie Ausrichtung gegen Nord. Insgesamt wurden unter Berücksichtigung dieser Kriterien die oben genannten Straßenzüge in 7 Streckenabschnitte unterteilt. Diese stimmen mit den in Bild 2.1 dargestellten 6 Teilabschnitten überein, Abschnitt 6 wurde weiter in zwei Teilabschnitte unterteilt:

- ID 6_1 zwischen Dürerstraße und Menzelstraße,
- ID 6_2 zwischen Menzelstraße und Benninger Straße.

5.4 Möglichkeiten und Grenzen des Screening-Modells

Der Ansatz des Screening-Verfahrens bringt dadurch, dass er auf standardisierten Bebauungsstrukturen basiert, eine Vereinfachung mit sich. Es ist damit zu rechnen, dass die in einem Screening-Modell bereitgestellten Bebauungsstrukturen im konkreten Fall die in der Natur gegebenen Bebauungsstrukturen nicht exakt wiedergeben. Aus diesem Grund handelt es sich bei Screening-Modellen um Abschätzverfahren. Je genauer jedoch die reale Bebauung durch eine standardisierte Bebauungsstruktur wiedergegeben werden kann, desto besser stimmen die berechneten Werte mit der Realität überein. Dies ist vor allem in innerstädtischen Kernbereichen mit dichter Straßenrandbebauung (Straßenschluchtcharakter) und häufig nur leicht variierenden Gebäudehöhen recht gut gegeben. Da in diesen Straßenschluchten aufgrund des reduzierten Luftaustausches mit der Atmosphäre über Dach mit hohen Immissionsbelastungen zu rechnen ist, kann man davon ausgehen, dass mit den Screening-Modellen für die lufthygienisch kritischeren Straßenzüge recht verlässliche Aussagen erzielt werden können.

Erreichen für einen konkreten Fall die mit dem Screening-Modell berechneten Immissionskonzentrationen an beurteilungsrelevanten Punkten die maßgeblichen Grenzwerte, dann sollten vor allem für Abschnitte, bei denen die Bebauungsstrukturen in der Realität deutlich von den standardisierten Bebauungsstrukturen abweichen, Modellrechnungen mit einem detaillierten Modellverfahren wie bspw. MISKAM durchgeführt werden, mit dem die reale Bebauungsstruktur sowie das Strömungs- und Turbulenzfeld nahezu naturgetreu wiedergegeben werden kann.

6 Berechnung statistischer Kenngrößen der Immissions-Gesamtbelastung

6.1 Windstatistik

Für die Berechnung statistischer Kennwerte mit dem Screening-Modell sollten meteorologische Daten herangezogen werden, die für das Untersuchungsgebiet repräsentativ sind. Nächstgelegene Messstationen sind die Stationen Ludwigsburg und Bietigheim. Bei Bietigheim handelt es sich lediglich um eine einjährige Messreihe, bei Ludwigsburg um eine 10-jährige Messreihe. Die Hauptwindrichtungen in Ludwigsburg sind, topografisch bedingt, Nordwest und Südost. In Abstimmung mit dem Ingenieurbüro Lohmeyer wurden für die Screening-Berechnungen die Daten der Station Ludwigsburg herangezogen. Zur Berücksichtigung der topographischen Verhältnisse im Raum Freiberg erfolgt eine Drehung der in Ludwigsburg gemessenen Windrose um ca. 20° im Gegenuhrzeigersinn. Man erhält somit eine Verteilung mit dem Hauptmaximum aus West und dem Nebenmaximum aus Ost bis Südost.

Bild 6.1 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen der für Freiberg angepassten Windrose der Station Ludwigsburg. Die jahresmittlere Windgeschwindigkeit liegt in etwa bei 2 m/s.

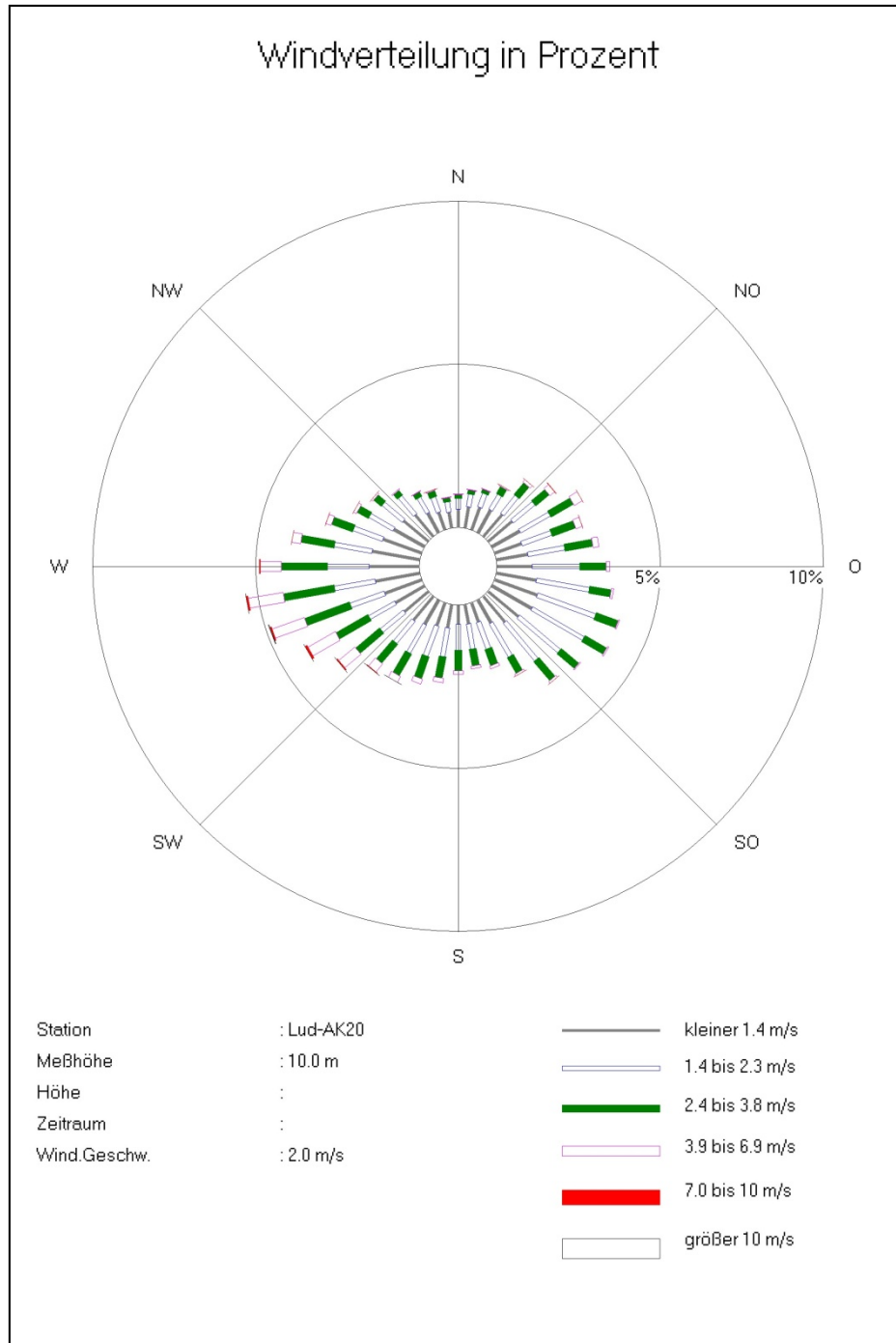


Bild 6.1: Die für die Immissionsbestimmung gewählte Häufigkeitsverteilung (% der Jahresstunden) der Windrichtungen (°) im Raum Freiberg; Basis: Windmessdaten der LUBW-Station Ludwigsburg

6.2 Hintergrundbelastung

Die Berechnungen mit ISIS liefern als Ergebnis die durch die Straßenemissionen eines Streckenabschnitts verursachten Immissionszusatzbelastungen. Die Immissionsgesamtbelastung an einem Ort ergibt sich durch Überlagerung der berechneten Zusatzbelastung mit der Hintergrundbelastung, die durch Gewerbe und Industrie, Hausbrand sowie die Kfz-Immissionen außerhalb des Untersuchungsgebietes bestimmt wird.

In Absprache mit dem RP Stuttgart wurden die Hintergrundbelastungswerte, die großräumig durch das Ingenieurbüro Lohmeyer im Bereich der Messstelle in der Benninger Straße, ebenfalls mit einem Screening-Modell, berechnet wurden, herangezogen. Danach liegt die Hintergrundbelastung im Jahr 2010 für das NO₂-Jahresmittel bei 32,2 µg/m³. Für das Jahresmittel von PM₁₀ wurde für das Jahresmittel im Bereich der Messstelle in der Benninger Straße ein Wert von 20,3 µg/m³ ermittelt.

6.3 Beurteilungsgrundlage

Für die Beurteilung der Immissionskonzentrationen von NO₂ und PM₁₀ werden die Grenzwerte der EU-Richtlinie 2008/50/EG herangezogen, die mit der 39. BImSchV in deutsches Recht umgesetzt wurde und seit 06.08.2010 in Kraft getreten ist. Die Grenzwerte sind in Tab. 6.1 zusammengestellt. Wie aus Tab. 6.1 zu entnehmen ist, müssen die Grenzwerte für NO₂ seit Beginn des Jahres 2010 eingehalten werden. Die Grenzwerte für PM₁₀ gelten seit Anfang 2005.

Tab. 6.1: Lufthygienische Grenzwerte der EU-Richtlinie (39. BImSchV) für die verkehrsrelevanten Luftschadstoffe NO₂ und PM₁₀

Luftschadstoff	Immissionswert	Statistische Definition	Zeitpunkt, seit dem der Grenzwert eingehalten werden muss
NO ₂	40 µg/m ³ 200 µg/m ³	Jahresmittelwert (Kalenderjahr) 1 Stunde; 200 µg/m ³ dürfen bis zu 18 mal im Kalenderjahr überschritten werden	gültig seit 01.01.2010 gültig seit 01.01.2010
Partikel (PM ₁₀)	40 µg/m ³ 50 µg/m ³	Jahresmittelwert (Kalenderjahr) 24 Stunden; 50 µg/m ³ dürfen bis zu 35 mal im Kalenderjahr überschritten werden	gültig seit 01.01.2005 gültig seit 01.01.2005

6.4 Bestimmung der Gesamtbelastung

Mit den charakteristischen Werten für die Hintergrundbelastung werden durch Überlagerung mit den berechneten Zusatzbelastungswerten aus ISIS die statistischen Kenngrößen (Jahresmittelwerte für PM₁₀ und NO_x) der Gesamtbelastung zum Vergleich mit den Grenzwerten berechnet. Die Überlagerung der Hintergrundbelastungswerte mit den Zusatzbelastungswerten erfolgt durch Addition der Jahresmittelwerte.

Da mit ISIS nur die Ausbreitung inerter Schadstoffe simuliert werden kann, andererseits jedoch die Konzentrationen des reaktiven Schadstoffs NO₂ bestimmt und beurteilt werden muss, muss bei der Berechnung der statistischen Kenngrößen für NO₂ die NO-NO₂-Konversion berücksichtigt werden. Die chemische Umwandlung von NO_x nach NO₂ ist äußerst komplex und von einer Reihe von Parametern wie UV-Strahlung, Ozonwert, Temperatur, um nur einige zu nennen, abhängig. Im Rahmen dieser Screening-Berechnungen erfolgt die Umwandlung mittels des empirischen Modelansatzes nach Düring /DÜRING, 2009/, das den NO-NO₂-Umwandlungsgrad als Funktion der NO_x-Gesamtmission und der O₃-Hintergrundkonzentration beschreibt.

6.5 Berechnung von Kurzzeitwerten der Gesamtbelastung

Die 39. BImSchV, deren Grenzwerte für die Immissionsbeurteilung relevant sind, enthält neben den Immissionsgrenzwerten für die Jahresmittelwerte von NO₂ und PM₁₀ auch Immissionsgrenzwerte für den Kurzzeitwert (Mittelungszeit 1 Stunde) von NO₂, der nicht öfter als 18 mal im Kalenderjahr überschritten werden darf (entspricht einem 99,8%-Wert), sowie für den Kurzzeitwert (Tagesmittelwert) von PM₁₀, der nicht öfter als 35 mal im Kalenderjahr überschritten werden darf. Mit den vorliegenden Eingangsdaten und dem eingesetzten Berechnungsverfahren können direkt keine Kurzzeitwerte bestimmt werden. Hierzu wären eine meteorologische Zeitreihe, Zeitreihen der Stundenmittelwerte der Vorbelastung sowie detaillierte, möglichst stundenfeine Informationen bzgl. des Verkehrsablaufs notwendig. Diese Datengrundlage wäre nur mit großem Aufwand zu erstellen.

Aus den in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2008 gemessenen NO₂-Stundenmittelwerten und NO₂-Jahresmittelwerten lässt sich zumindest ableiten, dass bei einem Jahresmittelwert unter 60 µg/m³ der Kurzzeitgrenzwert sicher eingehalten wird, wohingegen bei Jahresmittelwerten über 80 µg/m³ von Überschreitungen des Kurzzeit-Grenzwertes ausgegangen werden muss /LUBW, 2011/.

Bei PM₁₀ ist es derzeit Standard, den 90,4%-Wert auf der Basis des Jahresmittelwertes abzuschätzen. Die Auswertung umfangreicher Messungen von kontinuierlich betriebenen Dauermessstellen in Deutschland und europäischen Nachbarländern zeigt einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem 90,4%-Wert der Tagesmittelwerte vom Jahresmittelwert. Bei einem zulässigen 24-Stundenwert von 50 µg/m³ liegen die Schwellenwerte für den Jahresmittelwert etwa zwischen 28 und 31 µg/m³. Das LANUV NRW kommt auf Grund der neueren

Auswertung der PM10-Messungen von bundesweit über 1000 Messstellen zu dem Ergebnis, dass ab einem Jahresmittel von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in über 90% der Fälle von mehr als 35 Überschreitungstagen ausgegangen werden kann.

Legt man die Ergebnisse der LANUV-Studien zugrunde, dann ist bezogen auf den ab 2005 gültigen Grenzwert für den 24-h-Wert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei einem Jahresmittel von bis zu $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Unterschreitung des 90,4%-Wertes gegeben, bei einem Jahresmittel von $> 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Überschreitung des 90,4%-Wertes.

7 Ergebnisse und Bewertung der Immissionsberechnungen

Mit dem Screening-Modell ISIS wurden unter Berücksichtigung der Emissionen, der Hintergrundbelastung und der für den Raum Freiberg charakteristischen Meteorologie für das Jahr 2010 die NO₂- und PM10-Jahresmittelwerte der Gesamtbelastung für die interessierenden Straßenabschnitte für die drei betrachteten Szenarien berechnet. Die Ergebnisse der Immissionsberechnungen sind in Tab. 7.1 zusammengestellt. Für die Emissionen bei T30 wurde ein Befolgungsgrad von 100% angenommen; bei geringeren Befolgungsgraden reduzieren sich die Effekte entsprechend.

Tab. 7.1: Zusammenstellung der für die betrachteten Straßenabschnitte und Szenarien berechneten maximal zu erwartenden Jahresmittelwerte für NO₂ und PM10 in µg/m³ sowie Änderungen gegenüber dem Basisfall T50

ID	Straße	Jahresmittlere Konzentrationen in µg/m ³			Reduktion gegenüber T50		
		Berechnungsfall			Berechnungsfall		
		T50	T30	T50 ohne Bedarfs-LSA	T30	T50 ohne Bedarfs-LSA	
1	Mühlstraße	NO ₂	54,6	53,0	53,2	-2,9%	-2,6%
		PM10	26,3	25,8	26,2	-1,9%	-0,2%
2	Mühlstraße	NO ₂	56,4	56,4	56,4	0,0%	0,0%
		PM10	26,6	26,4	26,6	-0,9%	0,0%
3	Benninger Straße	NO ₂	55,6	58,1	55,4	4,5%	-0,4%
		PM10	27,0	26,7	27,0	-0,9%	0,0%
4	Benninger Straße	NO ₂	60,1	57,5	60,1	-4,3%	0,0%
		PM10	27,0	26,4	27,0	-1,9%	0,0%
5	Ludwigsburger Straße	NO ₂	50,0	50,3	49,5	0,6%	-1,0%
		PM10	24,0	23,9	23,9	-0,5%	-0,1%
6_1	Ludwigsburger Straße	NO ₂	55,3	53,4	55,0	-3,4%	-0,5%
		PM10	24,1	23,8	24,0	-1,1%	-0,2%
6_2	Ludwigsburger Straße	NO ₂	55,0	53,1	54,6	-3,5%	-0,7%
		PM10	23,9	23,6	23,8	-1,1%	-0,2%

Im Basisfall T50 werden mit ISIS für den Streckenabschnitt ID 4 mit 60,1 µg/m³ bzw. 27,0 µg/m³ die höchsten Jahresmittelwerte für NO₂ bzw. PM10 berechnet. Der Grenzwert für das Jahresmittel von NO₂ wird in diesem Streckenabschnitt wie auch in allen anderen betrachteten Streckenabschnitten im Analysejahr 2010 bei Tempo 50 überschritten. Allerdings liegen die NO₂-Jahresmittelwerte bei maximal 60 µg/m³. Aus den unter Absatz 6.5 gemachten Ausführungen lässt sich ableiten, dass der Kurzzeitgrenzwert für NO₂ sicher eingehalten werden kann.

Die berechneten Jahresmittelwerte für PM10 unterschreiten auf allen untersuchten Straßenabschnitten den Grenzwert für das Jahresmittel von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sicher. Die Jahresmittelwerte liegen zudem in allen Streckenabschnitten unter dem in Absatz 6.5 diskutierten Schwellenwert von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist eine Einhaltung der maximal zulässigen 35 Überschreitungen des Kurzzeitwertes für PM10 somit sichergestellt.

In Streckenabschnitt 3 liegt der Messpunkt, an dem im Jahr 2010 NO_2 -Spotmessungen mit Passivsammlern durchgeführt wurden. Dabei wurde ein NO_2 -Jahresmittelwert von $53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen. Der mit ISIS für diesen Abschnitt berechnete NO_2 -Jahresmittelwert von $55,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, basierend auf mittleren meteorologischen Verhältnissen für einen 10-Jahres-Zeitraum, trifft die Messung recht gut.

In Bild 7.1 sind die jahresmittleren Immissionskonzentrationen für NO_2 (oben) sowie die relativen Anteile [%], bezogen auf den Basisfall T50, grafisch dargestellt. Der Vergleich von T30 mit T50 zeigt Folgendes (s. Tab. 7.1 sowie Bild 7.1):

- Die Auswirkungen von Tempo 30 auf die Immissionen sind wie bei den Emissionen auf den einzelnen Streckenabschnitten unterschiedlich.
- Bei NO_2 liegen bei T30 die Änderungen zwischen -4,3% und +4,5%, bei PM10 zwischen -0,5% und -1,9%. Die höchsten Zuwächse sind dabei im Bereich der Messstelle in der Benninger Straße (ID 3) feststellbar.
- In keinem Streckenabschnitt führt die Einführung von T30 dazu, dass der Grenzwert für die Jahresmittlere NO_2 Konzentration eingehalten werden kann.
- Bei PM10 wird der Grenzwert auch bei T30 für das Jahresmittel deutlich unterschritten. Des Weiteren ist von einer Einhaltung des Immissions-Kurzzeitwertes auszugehen.

Die Auswirkungen einer Verflüssigung bei T50 auf die Immissionskonzentrationen sind folgende:

- Die Verflüssigung bringt gegenüber dem Basisfall T50 bei NO_2 im Jahresmittel Reduktionen zwischen 0 und -2,6% und bei PM10 zwischen 0 und -0,2%. Insgesamt ist die Wirkung einer Verflüssigung als gering einzuschätzen.

Zusammenfassend führt Tempo 30 für NO_2 auf einigen Streckenabschnitten zu Zunahmen um maximal 4,5%, auf anderen Streckenabschnitten zu Abnahmen in dergleichen Größenordnung. Eine Verflüssigung führt auf einigen Streckenabschnitten zu einer leichten Konzentrationsabnahme; auf einigen Streckenabschnitten treten keine Veränderungen auf. In den Streckenabschnitten, in denen durch die Maßnahmen Minderungen erzielt werden, wird der Grenzwert für das Jahresmittel von NO_2 weiterhin überschritten.

Bei PM10 führt T30 auf einigen Streckenabschnitten zu Abnahmen um maximal -1,9%. Die Minderungen durch eine Verflüssigung bei T50 ist gegenüber dem Basisfall T50 sehr gering.

NO₂-Immissionen in Freiberg

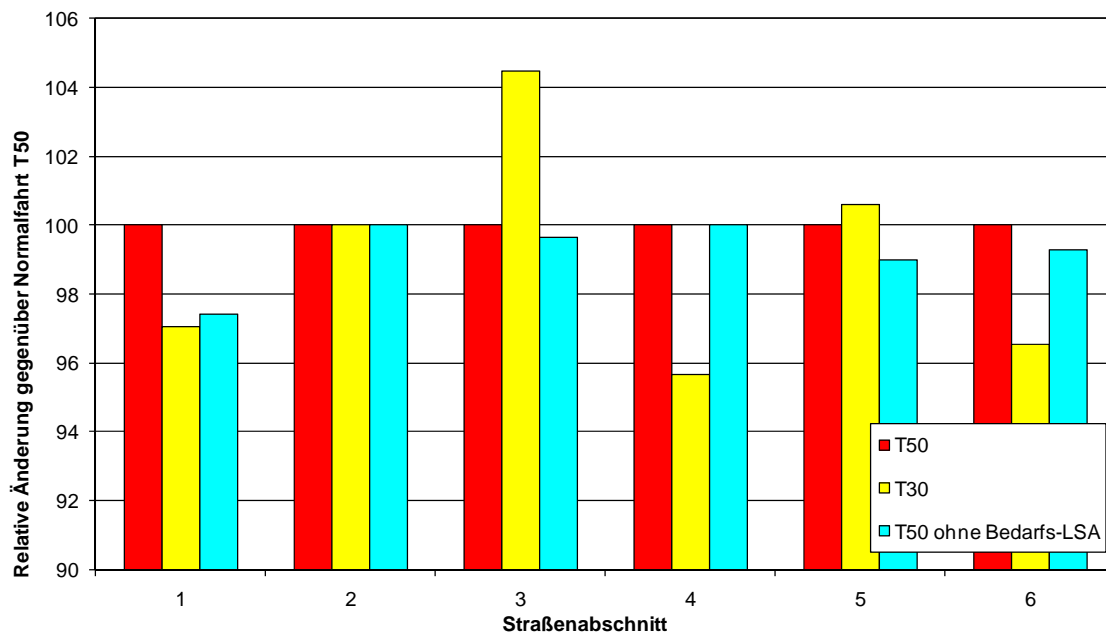
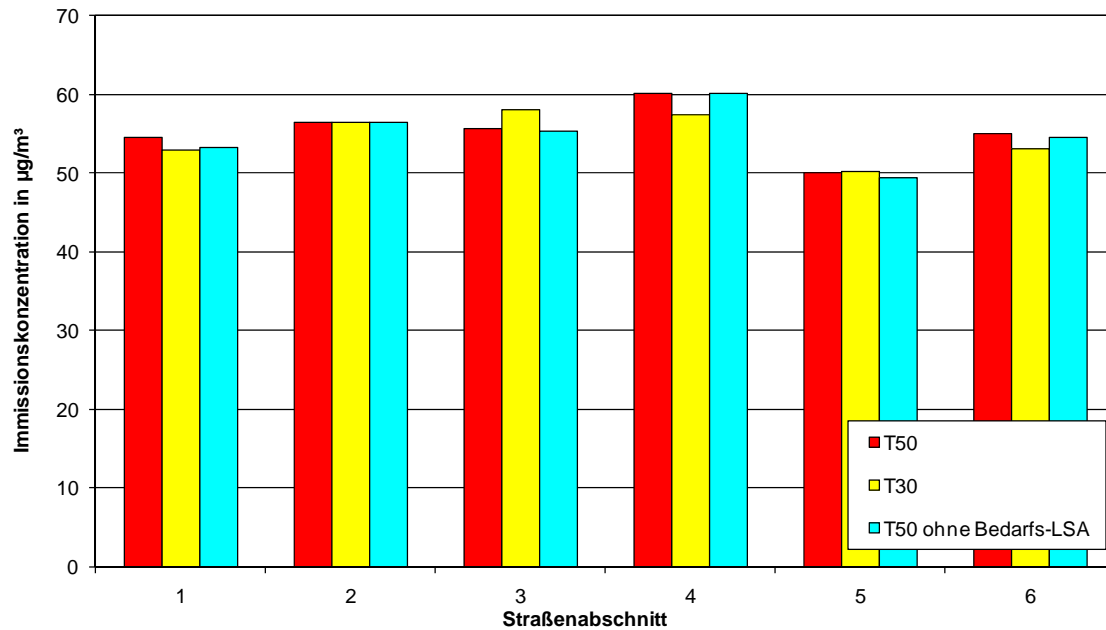


Bild 7.1: Zusammenstellung der für die betrachteten Straßenabschnitte und Szenarien berechneten maximal zu erwartenden Jahresmittelwerte für NO₂ in µg/m³ sowie Änderungen gegenüber dem Basisfall T50 in [%]

8 Zusammenfassung

Im neuen Emissionsfaktoren-Handbuch HBEFA3.1 gibt es noch keine Emissionsfaktoren für T30 auf Hauptverkehrsstraßen. Daher wurden zur Ermittlung der Auswirkungen eines Tempolimits von 30 km/h in den Ortsdurchfahrten von Freiberg (West-Ost-Richtung: L 1138: Mühlstraße, Benninger Straße, sowie Nord-Süd-Richtung: L 1129: Ludwigsburger Straße) am 29.9.2010 mit einem Pkw Messfahrten zur Aufnahme von Fahrprofilen ($v=f(t)$) mit Tempo 50 und Tempo 30 „fiktiv“ sowie Lkw-Verfolgungsfahrten durchgeführt. Zusätzlich wurden manuelle Kurzzeitmessungen mit Differenzierung nach Fahrzeugarten vorgenommen und die Strecke mit Video und Digitalkamera erfasst und dokumentiert.

Basierend auf den erhobenen Fahrprofilen wurden mit dem Modell PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model) der TU Graz die Abgasemissionen sekundlich berechnet. Unter Berücksichtigung der lokalen dynamischen Fahrzeugbestände und der bei den Messungen erhobenen Verkehrsstärken wurden „warme“ Abgas-Emissionsfaktoren sowie jährliche Emissionen (unter Einbeziehung von Kaltstarts) für NO_x und PM10 (einschließlich Aufwirbelung und Abrieb) berechnet.

Die Auswertung der Fahrparameter „mittlere Geschwindigkeit“ und „RPA“ (*relative positive acceleration*) für T50 und T30 zeigt für beide Parameter deutliche Reduzierungen beim Übergang von T50 zu T30. Die Einführung von T30 würde also zu einer Verstetigung des Verkehrsflusses führen. Diese Verstetigung führt jedoch nicht zwangsläufig zu einer Reduktion der Emissionen, da neben dem Störungsgrad auch die Gangwahl und bei Abgasnachbehandlungsanlagen schwerer Nutzfahrzeuge die Abgastemperatur entscheidend sind. Bei den gegebenen Randbedingungen der Strecke zeigt PHEM für T30 zum Teil eine ungünstigere Gangwahl mit einer Erhöhung der Drehzahl.

Für die Ortsdurchfahrten Freiberg ergeben sich bei den Gesamtemissionen inklusive Kaltstartzuschlägen sowie Aufwirbelung und Abrieb (in Anlehnung an /BAST 2009/) in den Fahrrichtungen Westen und Süden für NO_x und PM10 Abnahmen, die zwischen -4% und -6% liegen. In Fahrtrichtung Osten (Norden) treten bei NO_x Zunahmen von 2% (9%) und bei PM10 Abnahmen von -6% (-4%) auf. Über beide Fahrtrichtungen gemittelt überwiegen die Abnahmen: Auf der Ost-West-Strecke (Nord-Süd-Strecke) ergeben sich Abnahmen von ca. -1% (-4%) bei NO_x und ca. -6% (-4%) bei PM10.

Zur Abschätzung der Auswirkungen zusätzlicher verkehrsverflüssigender Maßnahmen wurde als Maximalfall ein Abschalten aller Fußgängerbedarfs-LSA entlang der Messstrecken angenommen. Dies führt auf beiden Messstrecken zu Reduktionen der Emissionen von ca. -2% sowohl bei NO_x wie auch bei PM10. Diese Emissionsminderungen finden sich vornehmlich im Bereich der Fußgängerbedarfs-LSA „Mühlstraße“ in Abschnitt 1. Dort betragen die durch ein Abschalten dieser LSA erreichbaren Emissionsminderungen für NO_x ca. -8% und für PM10 ca. -3%.

Aufgrund von Linksabbiegeverboten sind nur geringe emissionsmindernde Wirkungen von weniger als -1% zu erwarten, da die Störungen räumlich verlagert werden.

Mit dem Screening-Modell ISIS wurden auf Basis der so bestimmten Emissionen Immissionskonzentrationen der einzelnen Streckenabschnitte berechnet. Die modellierten Konzentrationen für 2010 stimmen gut mit den Messwerten überein.

Aufgrund der Beiträge der Hintergrundbelastung führt die Einführung von T30 selbst unter Annahme eines Befolgungsgrads von 100% bei den Immissionskonzentrationen zu geringeren Änderungen als bei den Emissionen. Die Auswirkungen von Tempo 30 auf die Immissionen sind wie bei den Emissionen auf den einzelnen Streckenabschnitten unterschiedlich. Bei NO_2 liegen bei T30 die Änderungen zwischen -4,3% und +4,5%, bei PM_{10} zwischen -0,5% und -1,9%. Die höchsten Zuwächse bei NO_2 sind dabei im Bereich der Messstelle in der Benninger Straße feststellbar.

In keinem Streckenabschnitt führt die Einführung von T30 dazu, dass der Grenzwert für die Jahresmittlere NO_2 Konzentration eingehalten werden kann. Bei PM_{10} wird der Grenzwert für das Jahresmittel deutlich unterschritten, auch der Kurzzeitwert wird überall sicher eingehalten.

Ein Abschalten der Fußgängerbedarfs-LSA würde allenfalls zu leichten Abnahmen führen: Die Verflüssigung bringt gegenüber dem Basisfall T50 bei NO_2 im Jahresmittel Reduktionen zwischen 0% und -2,6% und bei PM_{10} zwischen 0% und -0,2%. Insgesamt ist die Wirkung einer Verflüssigung sehr gering.

Literaturverzeichnis

AVISO 2009

Erstellung eines zukunftsfähigen Emissionskatasters Straßenverkehr für Baden-Württemberg, AVISO GmbH, im Auftrag der LUBW; Aachen, 2009

BANGERT ET AL. 1996

EDV-gestütztes Screening-Modell für unterschiedliche Verkehrsstandorte in Sachsen. Abschlußbericht. I. A. des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Radebeul.

BAST 2009

Einfluss von verkehrsberuhigenden Maßnahmen auf die PM10-Belastung an Straßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 189, Januar 2010

39. BIMSCHV 2010

Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen). In: BGBl. I S. 1065 (Nr. 40) vom 02.08.2010

DÜRING 2009

Tendenzen der NO₂-Belastung in Brandenburg von 1997 bis 2020. Immissionsschutz 3-10.

EICHHORN 1989

Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen mikroskaligen Stadtklima-Modells. Diss. Meteorol. Inst. Univ. Mainz

HBEFA 2010

www.hbefa.net

LENSING 2003

Programm DMTG für Windows zum Auswerten, Hochrechnen und Visualisieren von Verkehrsdaten aus Kurz- und Langzeitmessungen, Büro für angewandte Statistik, Aachen, 2003

LUBW 2011

Leitfaden: Modellierung verkehrsbedingter Immissionen – Anforderungen an die Eingangsdaten. LUBW Baden-Württemberg (Hrsg.)

LUTZ 2010

NO₂-Belastung in deutschen Kommunen: Situation, Maßnahmen, Fortschritte, Probleme am Beispiel Berlin, Lutz M., Vortrag auf der Tagung des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg: Herausforderung NO₂-Immissionen, Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen, Heidelberg, 3./4. März 2010

TRAFFGO 1992

A cellular automaton model for freeway traffic, K. Nagel, M. Schreckenberg *J. Phys. I France* 2 2221–2229 (1992).