

Auftraggeber
Client
Client

Bundesanstalt für Straßenwesen

Objekt- oder Projektname
Object or Project Name
Nom d' Objet ou de Projet

Forschungsprojekt BAST

Berichtstitel
Report Titel
Titre de Rapport

Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von Straßen- tunneln FE 15.0497/2010/FRB

Verfasser
Author
Auteur

Judith Pöhlmann, Dr. Ingo Rieß

Datum / Version
Date / Version
Date / Version

2011-04-11 / Ver. 2.1

HBI-Auftragsnummer
HBI Project Number
HBI Numéro de Projet

30.10002.01.00.00

HBI-Berichtsnummer
HBI Report Number
HBI Numéro de Rapport

10-002-01

HBI Haerter Beratende Ingenieure • HBI Haerter Consulting Engineers • HBI Haerter Ingénieurs Conseils



HBI Haerter AG
Stockerstrasse 12
CH-8002 Zürich
Tel. +41 (0)44 289 39 00
Fax +41 (0)44 289 39 99
info.zh@hbi.ch

HBI Haerter AG
Thunstrasse 32
CH-3005 Bern
Tel. +41 (0)31 357 24 24
Fax +41 (0)31 357 24 25
info.be@hbi.ch

HBI Haerter GmbH
Friedrich-Ebert-Straße 25
D-89522 Heidenheim
Tel. +49 (0)7321 98 23 10
Fax +49 (0)7321 98 23 29
info.hdh@hbi.eu



www.hbi.eu
www.hbi.ch

Impressum

<i>Volltitel</i>	Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von Straßentunneln FE 15.0497/2010/FRB
<i>Kurztitel</i>	Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von Straßentunneln
<i>Auftraggeber</i>	Bundesanstalt für Straßenwesen
<i>Verfasser</i>	Judith Pöhlmann, Dr. Ingo Rieß
<i>Projekt- / Objektname</i>	Forschungsprojekt BAST
<i>Auftragsnummer</i>	30.10002.01.00.00
<i>Berichtnummer</i>	10-002-01
<i>Berichtdatum</i>	2011-04-11
<i>Version</i>	Ver. 2.1
<i>Verteiler</i>	1x BAST 1x HBI

	<i>Autor</i>	<i>Prüfer</i>	<i>Freigabe</i>	<i>Vers.</i>	<i>Änderungen</i>
<i>Unterschrift oder Kürzel</i>	JPO, IRI	MWE	-	1.0	Erst-Fassung
<i>Name</i>	Pöhlmann Rieß	Wehner	-		
<i>Datum</i>	2010-09-29	2010-09-29	-		
<i>Unterschrift oder Kürzel</i>	JPO, IRI	MWE	-	2.0	Überarbeitung nach Prüfung durch den Auftraggeber (Schreiben vom 11.11.2010)
<i>Name</i>	Pöhlmann Rieß	Wehner	-		
<i>Datum</i>	2010-12-07	2010-12-07	-		
<i>Unterschrift oder Kürzel</i>	JPO, IRI	MWE	-	2.1	Schlussfassung
<i>Name</i>	Pöhlmann Rieß	Wehner	-		
<i>Datum</i>	2011-04-11	2011-04-11	-		

Überprüfung der Bemessungsgrundlage für die Be- und Entlüftung von Straßentunneln aufgrund neuer EU-Vorgaben

Judith Pöhlmann, Ingo Rieß

Kurzfassung

Die letzte Aktualisierung der Berechnung des Frischluftbedarfs der Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln erfolgte im Jahr 2000. Die neuen Europäischen Emissionsnormen EURO5 und EURO6 wurden daher bislang nicht berücksichtigt.

In dieser Studie wird die Berechnungsmethodik der Emissionsfaktoren anhand neuer Daten aus dem elektronischen Handbuch Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes angepasst. Das Handbuch wurde 2010 in der Version 3.1 veröffentlicht. Zusätzlich werden neue Untersuchungen zu nicht-motorischen Partikelemissionen einbezogen.

Für die Tunnellüftung waren bis jetzt die beiden Leitschadstoffe Kohlenmonoxid und Partikel (als Sichttrübung) aufgrund ihrer Wirkung auf die Gesundheit bzw. die Sicherheit der Tunnelbenutzer maßgebend. Die Untersuchung der Emissionsentwicklung der Stickoxide hat gezeigt, dass diese nicht vernachlässigt werden können. Die Entwicklung der motorischen Partikelemissionen nähert sich gegenüber früheren Jahren weiterhin sehr geringen Werten. Daher sind die Trübe-Emissionen aus anderen Quellen (Aufwirbelung und Reifenabrieb) ausschlaggebend. Die Emissionen der nicht-motorischen Partikelemissionen unterliegen weiterhin einer größeren Unsicherheit als die motorischen Emissionen.

Es wird empfohlen, zur Auslegung der Tunnellüftung die beiden Leitschadstoffe Stickoxide und Partikel (als Sichttrübung) zu verwenden.

Durch die Neufassung der Fahrzeugemissionen ergibt sich ein erhöhter Frischluftbedarf für den Normalbetrieb von neu auszurüstenden oder nachzurüstenden Tunneln.

Abstract

The last update of the calculation of fresh-air demand of the guidelines for the equipment and the utilisation of road tunnels took place in 2000. The European emission standards EURO5 and EURO6 were therefore not included in the data set.

In this study, the calculation methodology for the emission factors has been adjusted based on data given in the electronic manual for emission factors, which was published in 2010 (HBEFA 3.1) by the Umweltbundesamt. Furthermore, current investigations on non-exhaust particulate emission have been included.

Until now, the design of tunnel ventilation systems for normal operation was driven by the two guiding pollutants carbon monoxide and particles (the visibility). However, according to the investigation of the development of emissions of nitrogen oxide, this pollutant should be included as a design parameter.

Exhaust emissions reached very low values, but the turbidity emissions originating from other sources (re-suspension and tire wear) have become more and more relevant. Although further data is available by now, there remains a significant uncertainty about non-exhaust particulate emissions.

It is recommended that the design of tunnel ventilation systems for normal operation should be based on the two guiding pollutants nitrogen oxides and particles (as turbidity).

The new emission data result in an increased fresh-air demand for normal operation conditions in most planned tunnels.

Inhalt

Impressum	1
1 Einleitung und Zielsetzung	5
2 Grundlagen	5
2.1 Bemessungswerte der Luftqualität in Straßentunneln	5
2.2 Künftige Fahrzeugkonzepte	6
2.3 Verkehrssituation im Tunnel	7
2.4 Zusammensetzung des Fahrzeugparks	8
3 Kohlenmonoxid-Emissionen	10
3.1 Grundlagen	10
3.2 Personenwagen mit Benzinmotor	10
3.3 Personenwagen mit Dieselmotor	11
3.4 Lastwagen	12
4 Stickoxid-Emissionen	13
4.1 Grundlagen	13
4.2 Personenwagen mit Benzinmotor	13
4.3 Personenwagen mit Dieselmotor	14
4.4 Lastwagen	14
5 Trübe-Emissionen	15
5.1 Grundlagen	15
5.2 Personenwagen mit Benzinmotor	16
5.3 Personenwagen mit Dieselmotor	16
5.4 Lastwagen	16
6 Beitrag aus Reifenabrieb und Resuspension	18
6.1 Reifenabrieb	18
6.2 Resuspension	18
6.3 Zusammenfassung: Sichttrübung	19
7 Unsicherheiten	19
8 Vergleich der Basisemission unterschiedlicher Quellen	19
9 Dimensionierung der Tunnellüftung	21
9.1 Frischluftbedarf CO	21
9.2 Frischluftbedarf NOx	22
9.3 Frischluftbedarf Trübe	23
10 Ausblick	23

1 Einleitung und Zielsetzung

Die „Version 3.1“ des Handbuchs für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs ist seit Februar 2010 veröffentlicht. Sie löst die Version 2.1 (vom Februar 2004) ab. In der neuen Version des Handbuchs für Emissionsfaktoren wurde die Berechnungsmethodik aller Faktoren grundlegend überarbeitet. So sind zum einen die Faktoren für die Emissionsstufen Euro 5 und 6 verfügbar und zum anderen werden einzelne Fahrzeuggruppen weiter differenziert. Weiterhin wurden die Verkehrssituationen neu definiert.

Das Handbuch für Emissionsfaktoren enthält aktualisierte länderspezifische Angaben für Deutschland, Österreich und die Schweiz, sowie neue Angaben für Schweden und Norwegen. Daten für Frankreich sind in Vorbereitung und sollen später integriert werden. Zudem werden die Emissionsfaktoren für NO_2 und PN (Anzahl Partikel, particle numbers) zur Verfügung gestellt.

Für die Tunnellüftung sind jetzt die beiden Leitschadstoffe Stickoxide und Partikel (als Sichttrübung) maßgebend. Durch die Neufassung der Fahrzeugemissionen ergeben sich höhere Frischluftmengen für den Normalbetrieb der Tunnellüftung. Dies ist zum einen auf die Berücksichtigung der Stickoxid-Emissionen und zum anderen auf neue Erkenntnisse bezüglich Reifenabrieb und Aufwirbelung zurückzuführen. Dadurch gewinnt der Normalbetrieb bei der Auslegung der Lüftung durch den Lüftungsplaner an Bedeutung. Die Brandlüftung ist bei der Festlegung des Lüftungskonzepts weiterhin der bestimmende Faktor.

Als Ergebnis der Studie wird eine Neufassung der Berechnung der Emissionsfaktoren von Kohlenmonoxid CO , Stickoxide NO_x und von Sichttrübung für Bezugsjahre bis 2030 vorgelegt. Die Systematik der Berechnung entspricht dem heutigen Verfahren, damit die Neufassung in den bestehenden Berechnungswerkzeugen der Planer eingearbeitet werden kann.

2 Grundlagen

2.1 Bemessungswerte der Luftqualität in Straßentunneln

Die Frischluftmenge, die im Normalbetrieb in den Tunnel zu fördern ist, berechnet sich für eine gegebene Verkehrssituation aus den Fahrzeugemissionen und aus vorgegebenen Höchstkonzentrationen der maßgeblichen Schadstoffe. Der Schadstoffgehalt in der Tunnelluft wird bislang mit dem Leitgas Kohlenmonoxid CO und die Sichttrübung

mit der Leitsubstanzen Dieselrauch und Reifenabrieb erfasst.

Die Auslegung von Tunnellüftungen erfolgt heute praktisch ausschließlich nach dem Kriterium der Sichttrübung. Nur bei Tunneln in besonderen Höhenlagen (ab 800 Metern über Meereshöhe) kann die Konzentration von Kohlenmonoxid den Frischluftbedarf bestimmen. Bei Tunneln in geringerer Höhenlage ist in jedem Fall die Sichttrübung für den Frischluftbedarf bestimmend. Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob und wie die Stickoxid-Emissionen der Kraftfahrzeuge zukünftig bei der Auslegung von Tunnellüftungen in Deutschland berücksichtigt werden sollen.

Das Komitee für Straßentunnel der PIARC (PIARC 2000) empfiehlt einen Bemessungswert von 1 ppm für die Beschränkung der Konzentration von Stickstoffdioxid (NO_2). Im Gegensatz zu den Bemessungswerten für CO und Sichttrübung wird dieser Wert als Mittelwert über die Länge eines Lüftungsabschnitts bzw. des Tunnels definiert.

Die Vorgabe eines Bemessungswertes in Form eines Mittelwertes über einen Lüftungsabschnitt ist für die Auslegung und vor allem für den Betrieb eines Straßentunnels sehr ungünstig. Anstelle der Auswertung einer lokalen Messung müsste für jeden Zeitpunkt eine Annahme über die Schadstoffverteilung im Abschnitt getroffen werden.

Es wird daher vorgeschlagen, für die Auslegung der Lüftung einen Bemessungswert für die Maximalkonzentration in Abhängigkeit des Lüftungssystems vorzugeben. Bei Halbquer-/Querlüftungen kann stationär von einer konstanten Schadstoffkonzentration über den Lüftungsabschnitt ausgegangen werden. Bei Längslüftungssystemen steigt die Schadstoffkonzentration in Strömungsrichtung an.

Aufgrund der verfügbaren Messtechnik für den Betrieb im Tunnel wird die Überwachung der Luftqualität bezüglich Stickoxide auf NO_x abgestützt. Es wird ein Anteil von 10% Stickstoffdioxid an den Stickoxiden angenommen.

Aus diesem Ansatz ergeben sich zulässige Bemessungswerte von 10 ppm NO_x für Systeme mit Halbquer-/Querlüftung (HQ) und 15 ppm NO_x für Längslüftung (LL).

Die Berechnungen haben gezeigt, dass mit den neuen Emissionsdaten die Stickoxide und Partikel als Leitsubstanzen zur Beurteilung der Schadstoffbelastung herangezogen werden sollen. Tabelle 2.1 zeigt die Bemessungskonzentrationen der RABT 2006 erweitert um die der Stickoxide.

Tabelle 2.1: Bemessungskonzentrationen

Leitsubstanz	CO	NO _x		Trübe
	ppm	ppm		1/m
Verkehrszustand	Lüftungssystem			
	HQ/LL	HQ	LL	HQ/LL
Flüssiger Spitzenverkehr	70	10	15	0,005
Regelmäßig stockender Verkehr, Stau	70	10	15	0,005
Ausnahmefall stockender Verkehr, Stau	100	10	15	0,007
Länger andauernde Wartungsarbeiten in einem Tunnel unter Verkehr	30	0,56	0,56	0,001

Die Bemessungskonzentrationen NO_x für länger andauernde Wartungsarbeiten unter Verkehr (Tabelle 2.1) werden von den MAK-Werten für Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid abgeleitet. Maßgebend ist dabei der MAK-Wert von 0,5 ppm Stickstoffmonoxid.

Tabelle 2.2 zeigt die Grenzwerte für die Tunnel-sperrung für die Leitstoffe Kohlenstoffmonoxid und Sichttrübe.

Tabelle 2.2: Grenzwertkonzentrationen

Leitsubstanz	CO	Trübe
	ppm	1/m
Tunnelsperrung	200	0,012

2.2 Künftige Fahrzeugkonzepte

Die folgende Zusammenstellung der Grenzwerte der Emissionsnormen soll einen knappen Überblick über deren zeitliche Entwicklung bieten.

2.2.1 Personenwagen mit Benzinmotor

Die Emissionsgrenzwerte, die im Fahrzyklus eingehalten werden müssen, sind in Tabelle 2.3 angegeben.

Tabelle 2.3: Emissionsstandards für Benzin-Pkw

	CO g/km	NO _x g/km
EURO1 (91/441/EWG)	3,16	-
EURO2 (94/12/EG)	2,20	-
EURO3 ab 2000	2,30	0,15
EURO4 ab 2005	1,00	0,08
EURO5 ab 2011	1,00	0,06
EURO6 ab 2014	1,00	0,06

In Bezug auf ihre Masse können die Partikelemissionen der Benzinmotoren vernachlässigt werden. Die Normen EURO5 und EURO6 sind in der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 definiert.

2.2.2 Personenwagen mit Dieselmotor

Die Emissionsgrenzwerte, die im Fahrzyklus eingehalten werden müssen, sind in Tabelle 2.4 angegeben.

Tabelle 2.4: Emissionsstandards für Diesel-Pkw

	CO g/km	Partikel g/km	NO _x g/km
EURO1 (91/441/EWG)	3,16	0,180	-
EURO2 (94/12/EG)	1,00	0,080	-
EURO3 ab 2000	0,64	0,050	0,50
EURO4 ab 2005	0,50	0,025	0,25
EURO5 ab 2011	0,50	0,005	0,08
EURO6 ab 2014	0,50	0,005	0,08

Die Normen EURO5 und EURO6 sind in der Verordnung (EG) Nr. 715/2007 definiert.

2.2.3 Lastwagen

Die Emissionsgrenzwerte, die im Fahrzyklus eingehalten werden müssen, sind in Tabelle 2.5 angegeben.

Tabelle 2.5: Emissionsstandards für Lastwagen

	CO g/kWh	Partikel g/kWh	NO _x g/kWh
88/77/EWG	12,3	-	-
EURO1 (91/542/EWG)	4,9	0,40	-
EURO2 (91/542/EWG)	4,0	0,15	-
EURO3 ab 2000	2,1	0,10	5,0
EURO4 ab 2005	1,5	0,02	3,5
EURO5 ab 2008	1,5	0,02	2,0
EURO6 ab 2013	1,5	0,01	0,4

Die Emissionsgrenzwerte werden auf die eingesetzte Energie bezogen. Daher ist neben der Beschränkung der Emissionen die Entwicklung des Fahrzeugparks zu betrachten.

Für diese Studie ist eine detaillierte Analyse des Fahrzeugparks auf den Straßen nicht möglich. Die Annahme der Entwicklung der motorischen Fahrzeugemissionen beruht weitgehend auf den Prognosen des Handbuchs Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (HBEFA V3.1). Für die Erstellung des Handbuchs wurden entsprechende Studien der Verkehrsentwicklung einbezogen.

Die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit in einzelnen Verkehrssituationen (flüssig) insbesondere auf Steigungstrecken sowie die Erhöhung des mittleren Lastwagengewichts deutet darauf hin, dass

sich die Fahrzeugflotte hin zu größeren Motorleistungen entwickelt. Damit ergeben sich höhere Emissionen pro Fahrzeug.

2.3 Verkehrssituation im Tunnel

2.3.1 Verkehrssituationen im Handbuch Emissionsfaktoren

Die Verkehrssituationen wurden zwischen den Ländern, die an der Entwicklung des HBEFA V3.1 beteiligt sind, harmonisiert. Sie wurden zudem mit anderen, international verwendeten Konventionen abgestimmt. Die Verkehrssituationen sind anhand von vier Dimensionen systematisiert: Gebietstyp (ländlicher/städtischer Raum), Straßentypen, signalisierte Geschwindigkeit und Verkehrszustand.

Die Zahl der ausgegebenen Emissionsfaktoren wird damit deutlich größer. Für diese Version des Handbuchs mussten alle Emissionsfaktoren neu berechnet werden. Da die Verkehrssituationen und die Berechnung von früheren HBEFA-Versionen abweichen, können sich Differenzen bei den Emissionsfaktoren ergeben.

Als Grundlage dieser Studie für die Bestimmung der Basisemissionen aus den Emissionen des elektronischen Handbuchs wurde die Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig gewählt. Die Bezeichnung steht für eine städtische Fern- bzw. Bundesstraße mit einer signalisierten Geschwindigkeit 60 km/h und flüssigem Verkehr. Die mittlere Fahrgeschwindigkeit in der Ebene beträgt für Personwagen 57,3 km/h und für Lastwagen 53,9 km/h. Im HBEFA sind für Strecken innerhalb und außerhalb von Ortschaften unterschiedliche Fahrmuster und unterschiedliche Verkehrszusammensetzungen berücksichtigt.

Ein entscheidender Parameter für die Emissionen eines Fahrzeugs ist die im Fahrbetrieb eingesetzte Leistung. Die Längsneigung einer Straße erhöht oder erniedrigt den Fahrwiderstand. Für die Bestimmung der Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktoren für die einzelnen Fahrzeugklassen werden ebenfalls Verkehrssituationen aus dem Handbuch Emissionsfaktoren herangezogen. Eine mittlere Geschwindigkeit von 60 km/h kann aufgrund einer Geschwindigkeitsbeschränkung oder aufgrund von zufälligen Störungen des Verkehrsflusses zurückzuführen sein, die im HBEFA berücksichtigt werden. Die Situationen unterscheiden sich in Bezug auf das Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer und damit auf die Emissionen der Einzelfahrzeuge.

Für Geschwindigkeiten im Tunnel zwischen 0 und 60 km/h werden Verkehrssituationen innerhalb einer Ortschaft angesetzt, bei Geschwindigkeiten

zwischen 80 und 120 km/h kann man von fließendem Verkehr Außerorts mit geringen Störungen ausgehen. Die dazwischen liegenden Geschwindigkeiten werden durch unterschiedliche Verkehrssituationen mit einer signalisierten Geschwindigkeit von 60 bis 80 km/h abgebildet.

Eine Übersicht über die Verkehrssituationen aus dem Handbuch Emissionsfaktoren mit der resultierenden mittleren Geschwindigkeit für Personwagen und Schwerverkehr ist in Tabelle 2.6 dargestellt. Diese Verkehrssituationen wurden für die vorliegende Studie verwendet.

Tabelle 2.6: Verkehrssituationen zur Ermittlung der Geschwindigkeitsfaktoren mit zugehöriger Geschwindigkeit (ohne Längsneigung)

Verkehrssituation		Geschwindigkeit [km/h]	
		Pkw	Lkw
Agglo/HVS/50	flüssig	45,1	39,8
	dicht	37,1	30,2
	gesättigt	30,8	28,7
	stop+go	12,7	11,8
Agglo/HVS/60	flüssig	52,0	49,4
	dicht	43,1	40,0
	gesättigt	34,3	29,3
Agglo/FernStr-City/50	stop+go	12,7	11,8
	flüssig	48,9	46,5
	dicht	41,4	37,7
Agglo/FernStr-City/60	gesättigt	35,7	29,2
	stop+go	12,7	11,8
	flüssig	57,3	54,0
Agglo/FernStr-City/70	dicht	47,2	44,7
	gesättigt	39,4	35,2
	stop+go	12,7	11,8
Agglo/HVS/70	flüssig	65,8	59,1
	dicht	54,8	48,7
	gesättigt	45,2	38,6
Agglo/HVS/80	stop+go	12,7	11,8
	flüssig	66,3	57,0
	dicht	50,3	46,3
Land/AB/80	gesättigt	40,6	34,4
	stop+go	12,7	11,8
	flüssig	70,1	65,0
Land/AB/80	dicht	56,4	54,6
	gesättigt	46,7	42,1
	stop+go	12,7	11,8
Land/AB/80	flüssig	82,8	81,3
	dicht	75,5	72,8
	gesättigt	66,1	64,0
Land/AB/80	stop+go	12,7	11,8

Verkehrssituation		Geschwindigkeit [km/h]	
		Pkw	Lkw
Land/FernStr/60	flüssig	62,1	59,0
	dicht	51,8	50,1
	gesättigt	43,9	39,8
	stop+go	12,7	11,8
Land/FernStr/80	flüssig	80,0	77,0
	dicht	68,0	65,5
	gesättigt	56,1	51,7
	stop+go	12,7	11,8
Land/HVS/60	flüssig	57,9	53,1
	dicht	47,3	41,7
	gesättigt	37,9	34,7
	stop+go	12,7	11,8
Land/HVS-kurv./60	flüssig	44,0	37,6
	dicht	36,9	28,3
	gesättigt	30,0	24,4
	stop+go	12,7	11,8
Land/FernStr/100	flüssig	97,8	81,0
	dicht	83,2	68,9
	gesättigt	68,7	54,7
	stop+go	16,0	13,5
Land/HVS/100	flüssig	94,0	77,9
	dicht	77,2	64,0
	gesättigt	61,8	51,5
	stop+go	16,0	13,5
Land/AB/100	flüssig	102,0	86,3
	dicht	92,8	78,5
	gesättigt	74,4	66,3
	stop+go	16,0	13,5
Land/AB/120	flüssig	122,0	86,3
	dicht	111,0	78,5
	gesättigt	74,4	66,3
	stop+go	18,9	16,6

2.3.2 Grenzgeschwindigkeit der Lastwagen

Die Fahrgeschwindigkeit V_F der Lastwagen, die in der Emissionsberechnung eingesetzt werden muss, ist durch die Grenzgeschwindigkeit der Lastwagen in Steigungen und Gefälle V_{grenz} und die signalisierte Fahrgeschwindigkeit V_{zul} gegeben. Die Fahrgeschwindigkeit ist durch den Zusammenhang $V_F = V_{grenz}$ oder $V_F = 1.1 \cdot V_{zul}$ zu bestimmen. Dabei ist der kleinere Wert maßgebend. V_{grenz} ist durch Tabelle 2.7 gegeben.

Tabelle 2.7: Grenzgeschwindigkeit der Lastwagen in Steigungen und Gefälle

Neigung %	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
V_{grenz} [km/h]	86	86	86	86	86	86	86
Neigung %	1	2	3	4	5	6	
V_{grenz} [km/h]	86	85	80	74	69	63	

Für Werte zwischen den angegebenen Längsneigungen soll linear interpoliert werden.

Der Vergleich mit den Daten aus der RABT 2006 zeigt, dass die Tabelle der Grenzgeschwindigkeit angepasst werden muss. Dies deutet darauf hin, dass sich die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte (Lastwagen) zu höheren Motor- und Bremsleistungen hin verschiebt.

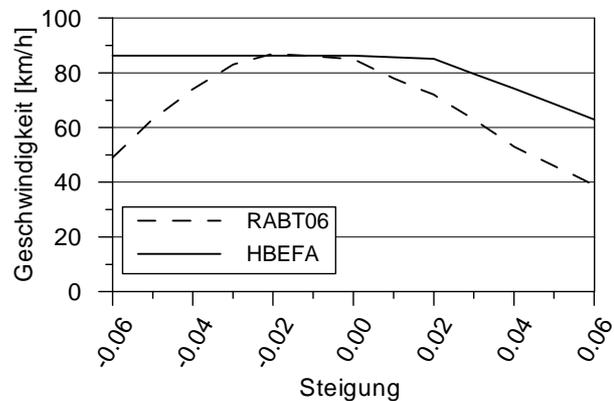


Bild 2.1: Grenzgeschwindigkeit der Lastwagen

2.4 Zusammensetzung des Fahrzeugparks

Mit den Daten für die Einführung der jeweiligen neuen Emissionsnormen und der Altersverteilung des Fahrzeugparks (Erneuerung der Fahrzeugflotte) ergeben sich die Anteile der unterschiedlichen Emissionsnormen am Fahrzeugpark. Die Berechnungsmethode der Fahrzeugemissionen, die in diesem Bericht beschrieben ist, geht von der Fahrzeugzusammensetzung aus, die im Handbuch Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes (HBEFA V3.1) beschrieben ist.

Die Anteile der einzelnen Emissionsnormen an den Personenkraftwagen mit Benzinmotor sind in Bild 2.2 dargestellt.

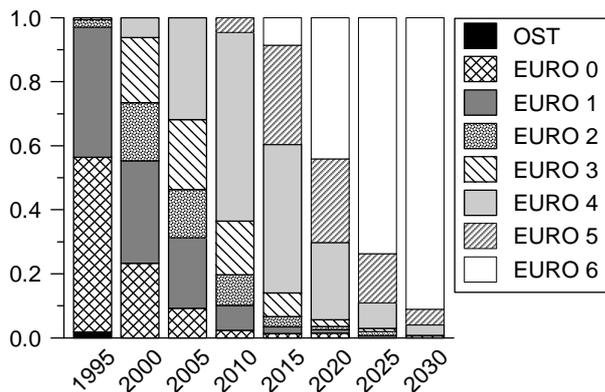


Bild 2.2: Anteile der Emissionsstandards an den Personenwagen mit Benzinmotor in Deutschland

Bild 2.3 zeigt die entsprechende Zusammensetzung des Fahrzeugparks für Personenwagen mit Dieselmotor.

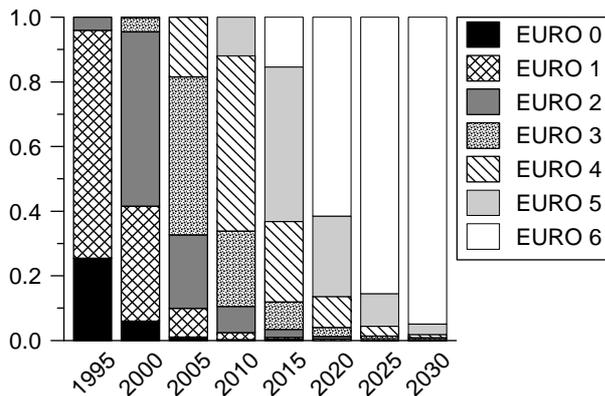


Bild 2.3: Anteile der Emissionsstandards an den Personenwagen mit Dieselmotor in Deutschland

Bild 2.4 zeigt die Verteilung der Emissionskonzepte bei den Lastwagen. Bei den Lastwagen sind die Unterschiede der Altersverteilung gegenüber der bisherigen Prognose besonders deutlich. Während die Emissionsberechnung der RABT 2006 zum Beispiel für das Jahr 2020 von einem Anteil von über 80 Prozent Lastwagen, welche die EURO5-Norm erfüllen, ausgeht, erfüllt dieser Anteil nach der neuen Prognose (HBEFA V3.1) bereits die EURO6-Norm.

Tatsächlich wird die Segmentierung der Fahrzeugflotte bei den Lastwagen detaillierter vorgenommen, z.B. in der Form „geschlossener Lastwagen mit zulässigem Gewicht 12 bis 14t, Dieselmotor, Emissionskonzept EURO4“. Für diese Studie wurden nur die Aufteilung nach Emissionskonzept und das mittlere zulässige Gesamtgewicht der Fahrzeugflotte untersucht.

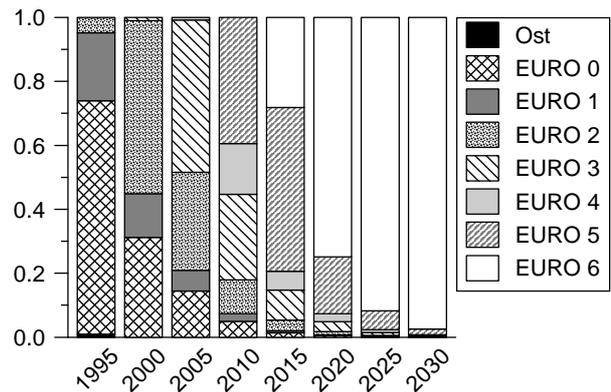


Bild 2.4: Anteile der Standards an den Lastwagen in Deutschland

Für die Zusammensetzung des Fahrzeugparks ist zusätzlich der Anteil der Personenwagen mit Dieselmotor an der Gesamtzahl der Personenwagen von Bedeutung.

Tabelle 2.8: Anteil der Dieselfahrzeuge an den Personenwagen

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
HBEFA x_D [%]	41,1	49,0	52,0	53,6	54,8

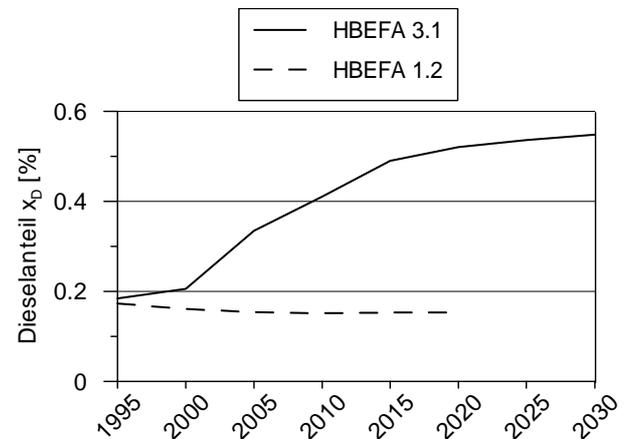


Bild 2.5: Entwicklung des Anteils der Dieselfahrzeuge an den Personenwagen

Das HBEFA berücksichtigt die aktuelle Verkehrszusammensetzung auf der Straße. Dies beinhaltet auch die Tatsache einer höheren Fahrleistung der Dieselfahrzeuge. Der Dieselanteil weicht daher von der Statistik beim Kraftfahrt-Bundesamt ab. Die Voraussage des Anteils der Dieselfahrzeuge gestaltet sich schwierig, da zum einen der Gesetzgeber mit steuerlichen Maßnahmen zum anderen die Hersteller mit neuen Entwicklungen die Kaufentscheidungen der Konsumenten sehr stark beeinflussen. Für die Dimensionierung von Tunnellüftungen ist der Dieselanteil vor allem wegen der motorischen Partikelemissionen (Sichttrübung) von Bedeutung. Bei der Dimensionierung der Lüftung sollten nach Möglichkeit projektbezogene Daten

zur Verkehrszusammensetzung verwendet werden. Wenn keine detaillierten Daten vorliegen, ist ein Anteil der Dieselfahrzeuge gemäß Tabelle 2.8 anzunehmen.

3 Kohlenmonoxid-Emissionen

3.1 Grundlagen

Die Berechnung der Emissionen eines mittleren Personenwagens erfolgt nach der Berechnungsmethode aus PIARC 2004 mit der Gleichung

$$e_{Pkw} = \left(1 - \frac{x_D}{100}\right) (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_B + \frac{x_D}{100} (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_D$$

mit:

- q zeitabhängige Basisemission in Kubikmeter pro Stunde und Fahrzeug
- f_{iv} Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor
- f_H Höhenfaktor
- x_D Anteil der Dieselfahrzeuge an den Personenwagen im Bezugsjahr in Prozent

Die Berechnung der Emissionen eines mittleren Lastwagens erfolgt mit der Gleichung

$$e_{Lkw} = q \cdot f_{iv} \cdot f_H \cdot f_M$$

Gegenüber der Berechnung für Personenwagen kommt der Massefaktor f_M hinzu.

Im Handbuch Emissionsfaktoren werden die Fahrzeugemissionen in Gramm pro Kilometer angegeben. Für Kohlenmonoxid benötigt man für die Umrechnung die Fahrgeschwindigkeit und die spezifische Dichte von Kohlenmonoxid

$$\rho = 1200 \text{ g} / \text{m}^3$$

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Faktoren der Gleichungen unter Berücksichtigung neuer Daten überprüft und gegebenenfalls angepasst.

3.2 Personenwagen mit Benzinmotor

3.2.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen wurden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 3.1: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_{iv} für CO der Pkw mit Benzinmotor

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
5	0,19	0,21	0,22	0,24	0,27	0,28	0,29
10	0,24	0,28	0,30	0,35	0,38	0,40	0,42
15	0,24	0,26	0,29	0,35	0,41	0,46	0,51
20	0,23	0,26	0,33	0,42	0,49	0,57	0,67
25	0,25	0,29	0,36	0,44	0,52	0,64	0,82
30	0,28	0,33	0,41	0,51	0,61	0,79	1,02
40	0,28	0,37	0,49	0,64	0,86	1,21	1,79
50	0,27	0,40	0,56	0,73	1,01	1,83	2,41
60	0,39	0,51	0,71	1,00	1,41	1,99	3,54
70	0,41	0,55	0,71	1,02	1,41	2,09	4,44
80	0,42	0,58	0,71	1,04	1,41	2,16	5,15
90	0,66	0,90	1,07	1,47	2,79	4,41	9,21
100	0,88	1,16	1,37	1,86	4,04	7,34	15,1
110	1,02	1,20	1,47	2,07	4,85	12,7	27,5
120	1,74	2,06	2,43	3,12	6,58	22,4	59,1

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden.

Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 3.1 sind die Geschwindigkeits- und Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhandenen Werten interpoliert sowie mit den ursprünglichen Angaben aus der RABT 2006 abgestützt.

3.2.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Wir gehen davon aus, dass die Emissionsfaktoren für typische Höhenlagen in Deutschland gültig sind (ca. 200 m). Für größere Höhen über Meer können die Höhenfaktoren des PIARC Berichts 2004 verwendet werden.

Tabelle 3.2: Höhenfaktor $f_{H,B}$ für CO-Emissionen der Personenwagen mit Benzinmotor

Höhe [m]	0	700	1000	2000	3000
f_H (Pkw, Benzin)	1,0	1,0	2,6	11,4	13,0

Für Werte zwischen den angegebenen Höhen soll linear interpoliert werden.

3.2.3 Basisemissionen

Die Emissionen der Personenwagen mit Benzinmotor in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 57,3 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von

Tabelle 3.1 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 3.3: CO-Basisemissionen q_{BCO} der Personewagen mit Benzinmotor in $[m^3/h]$

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
$q_B [m^3/h]$	0,044	0,028	0,020	0,016	0,014
<i>RABT 06</i>	<i>0,033</i>	<i>0,029</i>	<i>0,028</i>	-	-

Für Werte zwischen den angegebenen Jahren soll linear interpoliert werden.

Zum Vergleich sind die Basisemissionen der RABT 2006 kursiv angegeben. Für das Jahr 2010 ergeben sich aus dem neuen Datensatz höhere Fahrzeugemissionen. Für spätere Bezugsjahre (ab 2015) werden die neuen Emissionsnormen wirksam.

3.3 Personenwagen mit Dieselmotor

3.3.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen werden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 3.4: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_{iv} für CO der Pkw mit Dieselmotor

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
5	0,46	0,49	0,56	0,63	0,67	0,72	0,83
10	0,49	0,51	0,59	0,66	0,70	0,75	0,86
15	0,61	0,66	0,79	0,82	0,88	0,98	1,14
20	0,70	0,81	0,93	1,09	1,31	1,53	1,67
25	0,70	0,82	0,97	1,15	1,37	1,57	1,77
30	0,70	0,83	1,02	1,20	1,43	1,60	1,87
40	0,72	0,85	0,91	0,99	1,16	1,74	1,75
50	0,72	0,80	0,90	1,05	1,24	1,54	1,63
60	0,66	0,87	0,89	1,00	1,19	1,36	1,51
70	0,56	0,65	0,80	0,89	1,03	1,25	1,40
80	0,54	0,59	0,64	0,90	1,15	1,04	1,19
90	0,49	0,54	0,62	0,79	1,00	1,05	1,12
100	0,43	0,42	0,51	0,69	0,73	0,90	1,07
110	0,44	0,43	0,56	0,69	0,74	0,88	1,09
120	0,49	0,51	0,62	0,67	0,80	0,94	1,09

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden.

Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 3.4 sind die Geschwindigkeits- und

Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhandenen Werten interpoliert sowie mit den ursprünglichen Angaben aus der RABT 2006 abgestützt.

In den Fahrsituationen mit Fahrgeschwindigkeiten über 60 km/h ändert sich das Fahrverhalten. Bis 60 km/h treten in der gewählten Verkehrssituation Störungen auf. Ab 60 km/h treten keine stop+go Situationen auf. Da bei den Dieselmotoren die Störungen einen großen Einfluss auf die Emissionen haben, sinken bei Fahrt in der Ebene und im Gefälle die Emissionen zwischen 60 und 80 km/h ab.

3.3.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Wir gehen davon aus, dass die Emissionsfaktoren für typische Höhenlagen in Deutschland gültig sind (ca. 200 m). Für größere Höhen über Meer können die Höhenfaktoren des PIARC Berichts 2004 verwendet werden.

Tabelle 3.5: Höhenfaktor $f_{H,D}$ für CO-Emissionen der Personewagen mit Dieselmotor

Höhe [m]	0	700	1000	2000	3000
f_H (Pkw, Diesel)	1	1	1,2	1,5	1,8

Für Werte zwischen den angegebenen Höhen soll linear interpoliert werden.

3.3.3 Basisemissionen

Die Emissionen der Personewagen mit Dieselmotor in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 57,3 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 3.4 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 3.6: CO-Basisemissionen q_{DCO} der Personewagen mit Dieselmotor in $[m^3/h]$

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
$q_D [m^3/h]$	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
<i>RABT 06</i>	<i>0,009</i>	<i>0,009</i>	<i>0,008</i>		

Für Werte zwischen den angegebenen Jahren soll linear interpoliert werden.

Zum Vergleich sind die Basisemissionen der RABT 2006 kursiv angegeben. Die CO-Emissionen der Dieselfahrzeuge werden mit den neuen Daten für alle Bezugsjahre deutlich tiefer angenommen als in der RABT 2006.

3.4 Lastwagen

3.4.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen wurden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 3.7: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_V für CO der Lastwagen

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
5	0,22	0,26	0,34	0,69	0,67	0,72	0,82
10	0,30	0,36	0,47	0,74	0,78	0,89	1,02
15	0,37	0,46	0,60	0,79	0,89	1,06	1,22
20	0,33	0,42	0,56	0,80	0,96	1,20	1,40
25	0,24	0,32	0,46	0,73	0,97	1,26	1,47
30	0,17	0,29	0,46	0,75	1,10	1,40	1,66
40	0,07	0,11	0,45	0,91	1,23	1,71	1,93
50	0,09	0,19	0,46	0,92	1,36	2,08	2,19
60	0,14	0,25	0,55	1,00	1,65	1,84	2,70
70	0,02	0,07	0,37	1,31	2,17	2,85	3,15
80	0,01	0,05	0,39	1,41	2,19	3,26	3,60
90	0,01	0,05	0,44	1,58	2,46	3,66	4,05

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden.

Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 3.7 sind die Geschwindigkeits- und Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhanden Werten interpoliert sowie mit den ursprünglichen Angaben aus der RABT 2006 abgestützt.

In den Fahrsituationen mit Fahrgeschwindigkeiten über 60 km/h ändert sich das Fahrverhalten. Bis 60 km/h treten in der gewählten Verkehrssituation Störungen auf. Ab 60 km/h treten keine stop+go Situationen auf. Da bei den Dieselmotoren die Störungen einen großen Einfluss auf die Emissionen haben, sinken bei Fahrt in der Ebene und im Gefälle die Emissionen zwischen 60 und 80 km/h ab.

Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktoren müssen bei einigen Steigungen über die Grenzgeschwindigkeit der Lastwagen hinaus angegeben werden. Dies ist notwendig, damit ein Faktor für „ungerade“ Steigungen interpoliert werden kann. Diese Angaben wurden nicht dem Handbuch Emissionsfaktoren entnommen. Sie wurden aus den vorliegenden Werten extrapoliert.

3.4.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Wir gehen davon aus, dass die Emissionsfaktoren für typische Höhenlagen in Deutschland gültig sind (ca. 200 m). Für größere Höhen über Meer können wir die Höhenfaktoren des PIARC Berichts 2004 verwenden.

Tabelle 3.8: Höhenfaktor f_H für CO-Emissionen der Lastwagen

Höhe [m]	0	700	1000	2000	3000
f_H (Lkw)	1	1	1,4	2,8	4,0

Für Werte zwischen den angegebenen Höhen soll linear interpoliert werden.

3.4.3 Massefaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion des Fahrzeuggewichtes an. Die Massefaktoren des PIARC Berichts 2004 können verwendet werden.

Tabelle 3.9: Massefaktor f_M für CO-Emissionen der Lastwagen

v_F [km/h]	Masse		
	10t	20t	30t
0	1,0	1,4	1,4
5	1,0	1,4	1,7
10	1,0	1,4	2,1
15	1,0	1,4	2,6
20	1,0	1,4	2,6
25	1,0	1,4	2,7
30	1,0	1,4	2,7
40	1,0	1,4	2,7
50	1,0	1,3	2,7
60	1,0	1,3	2,7
70	1,0	1,3	2,7
80	1,0	1,3	2,8
90	1,0	1,3	2,8

Für Werte zwischen den angegebenen Massen soll linear interpoliert werden.

3.4.4 Basisemissionen

Die Emissionen der Lastwagen in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 53,9 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 3.7 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet. Die Zusammensetzung des Fahrzeugparks nach Gewichtsklassen im HBEFA ergibt ein mittleres zulässiges Gesamtgewicht von etwa 21 Tonnen. Bei

einer angenommenen Auslastung der Lastwagen mit 50 Prozent des zulässigen Gewichts ergibt sich ein mittleres Fahrzeuggewicht von 10.5 t. Die Emissionsfaktoren können somit ohne weitere Umrechnung für die Emissionsrechnung übernommen werden.

Tabelle 3.10: CO-Basisemissionen q_{LkwCO} der Lastwagen in $[m^3/h]$

Jahr	2010	2015	2020		
$q [m^3/h]$	0,052	0,046	0,035	0,032	0,031
<i>RABT 06</i>	<i>0,024</i>	<i>0,019</i>	<i>0,018</i>		

Zum Vergleich sind die Basisemissionen der RABT 2006 kursiv angegeben. Für Werte zwischen den angegebenen Jahren soll linear interpoliert werden.

Der Vergleich zeigt eine signifikante Erhöhung der CO-Emissionen der einzelnen Fahrzeuge gegenüber dem bisherigen Datensatz. Die Erhöhung kann sich daraus ergeben, dass die neuen Normen CO-Emissionen gegenüber dem Standard EURO4 nicht weiter beschränken. Zudem entwickelt sich die Zusammensetzung der Lastwagenflotte hin zu höheren Motorleistungen.

4 Stickoxid-Emissionen

4.1 Grundlagen

Die Berechnung der Emissionen eines mittleren Personenwagens geschieht nach der Berechnungsmethode aus PIARC 2004 mit der Gleichung

$$e_{pkw} = \left(1 - \frac{x_D}{100}\right) (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_B + \frac{x_D}{100} (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_D$$

mit:

- q zeitabhängige Basisemission in Kubikmeter pro Stunde und Fahrzeug
- f_{iv} Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor
- f_H Höhenfaktor
- x_D Anteil der Dieselfahrzeuge an den Personenwagen im Bezugsjahr in Prozent

Die Berechnung der Emissionen eines mittleren Lastwagens geschieht mit der Gleichung

$$e_{Lkw} = q \cdot f_{iv} \cdot f_H \cdot f_M$$

Gegenüber der Berechnung für Personenwagen kommt der Massefaktor f_M hinzu.

Im Handbuch Emissionsfaktoren werden die Fahrzeugemissionen in Gramm pro Kilometer angegeben. Für Stickoxid benötigt man für die Umrech-

nung die Fahrgeschwindigkeit und die spezifische Dichte von Stickstoffdioxid

$$\rho = 2000 \text{ g} / \text{m}^3$$

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Faktoren der Gleichungen unter Berücksichtigung neuer Daten ermittelt.

4.2 Personenwagen mit Benzinmotor

4.2.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen wurden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 4.1: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_{iv} für NO_x der Pkw mit Benzinmotor

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
5	0,30	0,34	0,32	0,33	0,29	0,26	0,29
10	0,30	0,34	0,33	0,40	0,35	0,41	0,58
15	0,30	0,34	0,39	0,45	0,52	0,61	0,71
20	0,32	0,38	0,46	0,57	0,67	0,78	0,91
25	0,33	0,41	0,51	0,65	0,80	0,95	1,15
30	0,34	0,43	0,56	0,72	0,93	1,13	1,39
40	0,35	0,46	0,61	0,77	0,96	1,25	1,64
50	0,33	0,44	0,60	0,81	1,12	1,56	2,03
60	0,37	0,51	0,70	1,00	1,36	1,86	2,35
70	0,33	0,50	0,76	1,14	1,63	2,25	2,94
80	0,36	0,53	0,79	1,21	1,88	2,80	3,87
90	0,40	0,61	0,92	1,45	2,24	3,24	4,30
100	0,42	0,65	0,97	1,65	2,72	3,80	5,02
110	0,44	0,71	1,02	1,88	3,32	4,44	5,89
120	0,53	0,79	1,24	2,34	3,77	5,24	7,14

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden.

Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 4.1 sind die Geschwindigkeits- und Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhandenen Werten interpoliert.

4.2.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Gemäß dem PIARC Bericht 2004 kann für alle Höhen über Meer ein Höhenfaktor von 1 verwendet werden.

4.2.3 Basisemissionen

Die Emissionen der Personenwagen mit Benzinmotor in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 57,3 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 4.1 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 4.2: NO_x-Basisemissionen q_{BNO_x} der Personenwagen mit Benzinmotor in [m³/h]

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
q_B [m ³ /h]	0,004	0,002	0,002	0,002	0,001

4.3 Personenwagen mit Dieselmotor

4.3.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen werden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 4.3: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_{iv} für NO_x der Pkw mit Dieselmotor

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
5	0,35	0,39	0,30	0,29	0,33	0,36	0,37
10	0,35	0,39	0,34	0,42	0,48	0,51	0,57
15	0,35	0,39	0,44	0,53	0,60	0,70	0,81
20	0,35	0,40	0,47	0,57	0,67	0,81	0,97
25	0,35	0,42	0,50	0,61	0,75	0,92	1,13
30	0,35	0,43	0,52	0,64	0,82	1,03	1,30
40	0,36	0,46	0,58	0,77	1,10	1,31	1,81
50	0,36	0,48	0,65	0,86	1,23	1,66	2,29
60	0,37	0,51	0,72	1,00	1,36	1,82	2,56
70	0,32	0,47	0,71	1,11	1,68	2,32	3,13
80	0,33	0,50	0,81	1,24	1,91	3,02	3,94
90	0,35	0,58	0,96	1,53	2,31	3,37	4,83
100	0,38	0,63	1,06	1,76	2,78	3,89	5,60
110	0,43	0,69	1,16	1,99	3,37	4,52	6,24
120	0,60	0,98	1,49	2,31	4,06	5,70	7,34

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden. Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 4.3 sind die Geschwindigkeits- und

Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhandenen Werten interpoliert.

4.3.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Gemäß dem PIARC Bericht 2004 kann für alle Höhen über Meer ein Höhenfaktor von 1 verwendet werden.

4.3.3 Basisemissionen

Die Emissionen der Personenwagen mit Dieselmotor in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 57,3 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 4.3 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 4.4: NO_x-Basisemissionen q_{DNO_x} der Personenwagen mit Dieselmotor in [m³/h]

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
q_D [m ³ /h]	0,015	0,013	0,008	0,006	0,005

4.4 Lastwagen

4.4.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen wurden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 4.5: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_{iv} für NO_x der Lastwagen

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
5	0,80	1,12	1,35	1,10	0,87	0,82	0,90
10	0,89	1,25	1,50	1,23	0,97	0,91	1,00
15	0,98	1,38	1,66	1,37	1,08	1,01	1,11
20	0,86	1,25	1,62	1,35	0,99	1,03	1,26
25	0,60	0,92	1,48	1,38	1,00	1,08	1,35
30	0,47	0,91	1,57	1,36	1,02	1,21	1,56
40	0,32	0,66	1,48	1,28	1,05	1,40	1,92
50	0,20	0,58	1,60	1,14	1,17	1,95	2,54
60	0,45	0,98	1,59	1,00	1,38	1,97	3,26
70	0,06	0,22	1,21	0,95	1,63	3,04	3,80
80	0,02	0,14	1,14	0,97	1,87	3,48	4,34
90	0,02	0,16	1,28	1,09	2,11	3,91	4,89

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden. Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 4.5 sind die Geschwindigkeits- und Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhandenen Werten interpoliert.

In den Fahrsituationen mit Fahrgeschwindigkeiten über 60 km/h ändert sich das Fahrverhalten. Bis 60 km/h treten in der gewählten Verkehrssituation Störungen auf. Ab 60 km/h treten keine stop+go Situationen auf. Da bei den Dieselmotoren die Störungen einen großen Einfluss auf die Emissionen haben, sinken bei Fahrt in der Ebene und im Gefälle die Emissionen zwischen 60 und 80 km/h ab.

Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktoren müssen bei einigen Steigungen über die Grenzggeschwindigkeit der Lastwagen hinaus angegeben werden. Dies ist notwendig, damit bei Zwischenwerten interpoliert werden kann. Diese Angaben stammen daher nicht aus dem Handbuch Emissionsfaktoren, sondern wurden aus den vorliegenden Zahlen extrapoliert.

4.4.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Gemäß dem PIARC Bericht 2004 kann für alle Höhen über Meer ein Höhenfaktor von 1 verwendet werden.

4.4.3 Massefaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion des Fahrzeuggewichtes an. Die Massenfaktoren des PIARC Berichts 2004 können verwendet werden.

Tabelle 4.6: Massenfaktor f_M für NO_x -Emissionen der Lastwagen

v_F [km/h]	Masse		
	10t	20t	30t
0	1,0	2,0	2,5
5	1,0	2,0	2,5
10	1,0	2,0	2,5
15	1,0	2,0	2,5
20	1,0	2,0	2,5
25	1,0	2,0	2,5
30	1,0	2,0	2,5
40	1,0	2,0	2,5
50	1,0	2,0	2,5
60	1,0	2,1	2,7
70	1,0	2,1	2,7
80	1,0	2,1	2,7
90	1,0	2,1	2,7

Für Werte zwischen den angegebenen Massen soll linear interpoliert werden.

4.4.4 Basisemissionen

Die Emissionen der Lastwagen in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 53,9 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 4.5 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 4.7: NO_x -Basisemissionen $q_{Lkw\text{NO}_x}$ der Lastwagen in [m^3/h]

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
q [m^3/h]	0,105	0,060	0,024	0,012	0,008

5 Trübe-Emissionen

5.1 Grundlagen

Die Berechnung der motorischen Trübe-Emissionen eines mittleren Personenwagens geschieht nach der Berechnungsmethode aus PIARC 2004 mit der Gleichung

$$e_{pkw} = \left(1 - \frac{x_D}{100}\right) (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_B + \frac{x_D}{100} (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_D$$

mit:

- q zeitabhängige Basisemission in Quadratmeter pro Stunde und Fahrzeug
- f_{iv} Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor
- f_H Höhenfaktor
- x_D Anteil der Dieselfahrzeuge am Fahrzeugpark im Bezugsjahr in Prozent

Die Berechnung der Emissionen eines mittleren Lastwagens geschieht mit der Gleichung

$$e_{Lkw} = q \cdot f_{iv} \cdot f_H \cdot f_M$$

Gegenüber der Berechnung für Personenwagen kommt der Massefaktor f_M hinzu.

Im Handbuch Emissionsfaktoren werden die Fahrzeugemissionen in Gramm pro Kilometer angegeben. Die Umrechnung der Partikelemissionen, die in Gramm pro Kilometer angegeben werden, in die Trübungswirkung, welche in Quadratmeter pro Stunde angegeben wird, erfolgt durch den Zusammenhang

$$1 \text{ g} = 4,7 \text{ m}^2$$

aus (PIARC 2004).

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Faktoren der Gleichungen unter Berücksichti-

gung neuer Daten überprüft und gegebenenfalls angepasst.

5.2 Personenwagen mit Benzinmotor

Die Trübe-Emission q_B am Auspuff von Personenwagen mit Benzinmotor kann vernachlässigt werden.

$$e_{Pkw,B} = q_B = 0$$

5.3 Personenwagen mit Dieselmotor

5.3.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen wurden die Emissionen berechnet. Die Werte der folgenden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 5.1: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_{IV} für die Trübe-Emission der Pkw mit Dieselmotor

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
5	0,42	0,47	0,53	0,58	0,57	0,60	0,63
10	0,44	0,49	0,55	0,60	0,62	0,64	0,75
15	0,50	0,59	0,63	0,75	0,81	0,85	0,89
20	0,49	0,54	0,58	0,62	0,66	0,73	0,89
25	0,49	0,55	0,62	0,69	0,75	0,82	0,95
30	0,49	0,56	0,66	0,76	0,83	0,92	1,00
40	0,52	0,61	0,73	0,89	1,07	1,22	1,34
50	0,53	0,65	0,79	0,97	1,14	1,37	1,80
60	0,53	0,65	0,79	1,00	1,23	1,56	1,76
70	0,53	0,68	0,90	1,16	1,37	1,54	1,84
80	0,59	0,77	1,01	1,28	1,58	2,07	2,62
90	0,65	0,87	1,18	1,52	1,97	2,52	4,36
100	0,79	1,02	1,32	1,69	2,05	2,64	4,85
110	0,84	1,05	1,32	1,52	2,07	2,66	6,88
120	1,00	1,28	1,57	1,74	2,79	5,50	13,6

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden. Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 5.1 sind die Geschwindigkeits- und Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhanden Werten interpoliert sowie mit den ursprünglichen Angaben aus der RABT 2006 abgestützt.

5.3.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Wir gehen davon aus, dass die Emissionsfaktoren für typische Höhenlagen in Deutschland gültig sind (ca. 200 m). Für größere Höhen über Meer können die Höhenfaktoren des PIARC Berichts 2004 verwendet werden.

Tabelle 5.2: Höhenfaktor $f_{H,D}$ für Trübe-Emissionen der Personenwagen mit Dieselmotor

Höhe [m]	0	700	1000	2000	3000
f_H (Pkw, Diesel)	1	1	1	1,25	1,5

Für Werte zwischen den angegebenen Höhen soll linear interpoliert werden.

5.3.3 Basisemissionen

Die Emissionen der Personenwagen mit Dieselmotor in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60 flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 57,3 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 5.1 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 5.3: Trübe-Basisemissionen q_{DT} der Personenwagen mit Dieselmotor in [m²/h]

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
q_D [m ² /h]	5,72	2,28	1,04	0,60	0,50
<i>RABT 06</i>	<i>9,53</i>	<i>7,30</i>	<i>6,49</i>		

Für Werte zwischen den angegebenen Jahren soll linear interpoliert werden.

Zum Vergleich sind die Basisemissionen der RABT 2006 kursiv angegeben. Der Vergleich zeigt für die neuen Daten eine signifikante Verringerung der Emissionen. Diese ist in erster Linie auf die Einführung der neuen Emissionsnormen zurückzuführen. Für die Berechnung des Frischluftbedarfs wird dieser Effekt durch die Erhöhung des Anteils der Dieselfahrzeuge an den Personenwagen teilweise kompensiert.

5.4 Lastwagen

5.4.1 Geschwindigkeits- und Steigungsfaktor

Für die Bestimmung der Geschwindigkeits- und Steigungsabhängigkeit der Fahrzeugemissionen kann man von den Verkehrssituationen in Tabelle 2.6 ausgehen. Für diese Verkehrssituationen wurden die Emissionen berechnet. Die Werte der fol-

genden Tabelle wurden anschließend aus den berechneten Werten interpoliert.

Tabelle 5.4: Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktor f_v für die Trübe-Emission der Lastwagen

V_f [km/h]	Steigung [%]						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
0	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31
5	0,17	0,20	0,25	0,48	0,65	0,70	0,79
10	0,23	0,27	0,34	0,51	0,74	0,86	0,97
15	0,29	0,35	0,43	0,54	0,84	1,02	1,15
20	0,26	0,32	0,43	0,59	0,93	1,18	1,32
25	0,27	0,34	0,47	0,68	0,94	1,23	1,37
30	0,27	0,37	0,53	0,79	1,09	1,37	1,54
40	0,25	0,33	0,50	0,82	1,20	1,48	1,66
50	0,22	0,30	0,50	0,92	1,41	1,72	1,86
60	0,24	0,34	0,58	1,00	1,48	1,71	1,98
70	0,14	0,17	0,33	0,99	1,72	1,74	2,31
80	0,11	0,15	0,38	1,18	1,77	1,99	2,64
90	0,13	0,17	0,43	1,33	1,99	2,24	2,97

Zwischenwerte sollen linear interpoliert werden.

Das HBEFA 3.1 gibt keine Emissionsfaktoren für den Geschwindigkeitsbereich kleiner 15 km/h an. In der Tabelle 5.4 sind die Geschwindigkeits- und Steigungsfaktoren dieses Bereiches aus den vorhandenen Werten interpoliert sowie mit den ursprünglichen Angaben aus der RABT 2006 abgestützt.

Steigungs- und Geschwindigkeitsfaktoren müssen bei einigen Steigungen über die Grenzgeschwindigkeit der Lastwagen hinaus angegeben werden. Dies ist notwendig, damit bei Zwischenwerten interpoliert werden kann. Diese Angaben stammen daher nicht aus dem Handbuch Emissionsfaktoren, sondern wurden aus den vorliegenden Zahlen extrapoliert.

5.4.2 Höhenfaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion der Höhe über Meer an. Wir gehen davon aus, dass die Emissionsfaktoren für typische Höhenlagen in Deutschland gültig sind (ca. 200 m). Für größere Höhen über Meer können die Höhenfaktoren des PIARC Berichts 2004 verwendet werden.

Tabelle 5.5: Höhenfaktor f_H für Trübe-Emissionen der Lastwagen

Höhe [m]	0	700	1000	2000	3000
f_H (Lkw)	1	1	1,1	1,7	2,3

Für Werte zwischen den angegebenen Höhen soll linear interpoliert werden.

5.4.3 Massefaktor

Das Handbuch Emissionsfaktoren gibt die Emissionen der Einzelfahrzeuge nicht als Funktion des Fahrzeuggewichtes an. Die Massefaktoren des PIARC Berichts 2004 können verwendet werden.

Tabelle 5.6: Massefaktor f_M für Trübe-Emissionen der Lastwagen

v_F [km/h]	Masse		
	10t	20t	30t
0	1,0	1,9	2,3
5	1,0	1,9	2,3
10	1,0	1,9	2,3
15	1,0	1,9	2,3
20	1,0	1,9	2,3
25	1,0	1,9	2,3
30	1,0	1,9	2,3
40	1,0	1,9	2,3
50	1,0	1,9	2,3
60	1,0	1,9	2,6
70	1,0	1,9	2,6
80	1,0	1,9	2,6
90	1,0	1,9	2,6

Für Werte zwischen den angegebenen Massen soll linear interpoliert werden.

5.4.4 Basisemissionen

Die Emissionen der Lastwagen in der Verkehrssituation Agglo/FernStr-City/60/flüssig sind im HBEFA für eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 53,9 km/h angegeben. Die Emissionsdaten werden unter Verwendung von Tabelle 5.4 auf die Basisgeschwindigkeit 60 km/h umgerechnet.

Tabelle 5.7: Trübe-Basisemissionen q_{LkwT} der Lastwagen in [m²/h]

Jahr	2010	2015	2020	2025	2030
q [m ² /h]	17,5	8,25	3,29	1,47	1,00
<i>RABT 06</i>	16,9	8,88	6,91		

Für Werte zwischen den angegebenen Jahren soll linear interpoliert werden.

Zum Vergleich sind die Basisemissionen der RABT 2006 kursiv angegeben. Für die Jahre 2010 bis 2015 liegen die angegebenen Trübe-Emissionen nahe beieinander (im Gegensatz zu den CO-Emissionen, vgl. Tabelle 3.10). Bei Lastwagen wurden die motorischen Partikelemissionen beim Übergang ab EURO4 nochmals stark beschränkt.

6 Beitrag aus Reifenabrieb und Resuspension

Quellen für Sichttrübung im Tunnel sind die motorischen Emissionen, Abrieb von Reifen, Straße und Bremsbelägen, aber auch Wassertropfen von der nassen Straßenoberfläche und aufgewirbelter Staub (Resuspension). Unter den zusätzlichen Quellen für Sichttrübung scheint der Reifenabrieb den größten Anteil zu haben. Die größten Kräfte auf die Reifen treten einerseits durch Änderung der Geschwindigkeit oder der Fahrtrichtung auf, andererseits durch Beschleunigungen und Verzögerungen im Verkehrsfluss.

Emissionsmessungen in Straßentunneln bieten sich an, da die Umgebungsbedingungen einfacher zu erfassen sind und eine große Anzahl an Fahrzeugen erfasst werden können.

6.1 Reifenabrieb

Aus dem Vergleich von Messung und Berechnung am Plabutschunnel lassen sich die nicht-motorischen Trübe-Emissionen pro Personenwagen (mit Benzin- und Dieselmotor) und pro Lastwagen herleiten. (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Trübe-Emission q_{RT} aus dem Reifenabrieb plus Resuspension von Partikeln in $[m^2/km]$ pro Fahrzeug

Pkw		Lkw	
g/km	m^2/km	g/km	m^2/km
0,028	0,1316	0,104	0,4888

Tabelle 6.2: Trübe-Emission q_{RT} aus dem Reifenabrieb und aus Resuspension von Partikeln in $[m^2/h]$ pro Fahrzeug

V_f [km/h]	Pkw [m^2/h]	Lkw [m^2/h]
0	0,00	0,00
5	0,66	2,44
10	1,32	4,89
15	1,97	7,33
20	2,63	9,78
30	3,95	14,66
40	5,26	19,55
50	6,58	24,44
60	7,90	29,33
70	9,21	34,22
80	10,53	39,10
90	11,84	43,99
100	13,16	
110	14,48	
120	15,79	

Die Umrechnung von Tabelle 6.1 auf Tabelle 6.2 (vgl. auch Bild 6.1) erfolgt über die Geschwindigkeit. Der Beitrag des Reifenabriebs bleibt mit der Zeit konstant.

Für Werte zwischen den angegebenen Geschwindigkeiten soll linear interpoliert werden.

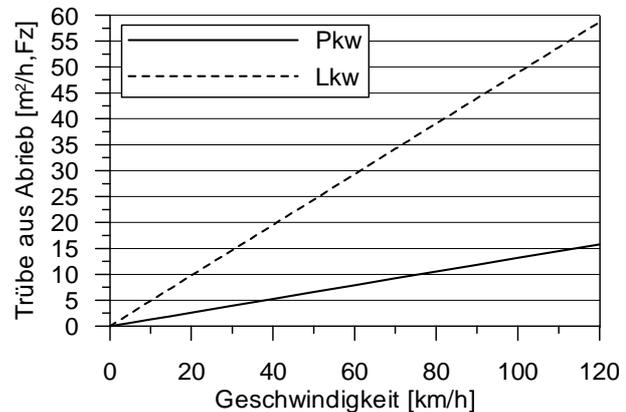


Bild 6.1: Trübe-Emission pro Fahrzeug aus dem Reifenabrieb als Funktion der Geschwindigkeit

6.2 Resuspension

Auf der Straßenoberfläche abgelagerte Partikel können durch die Rollbewegung der Reifen aufgewirbelt werden. Die Emission von Abriebpartikeln aus der Reifenoberfläche ist mit der Aufwirbelung von Partikeln von der Straßenoberfläche vergleichbar. Faktoren, die den Reifenabrieb beeinflussen, wirken sich daher auch auf die Resuspension von Partikeln aus.

Die Resuspensionsrate steigt in etwa proportional zum Quadrat der Fahrzeuggeschwindigkeit. Da die Emissionsfaktoren durch Reifenabrieb nach Tabelle 6.1 aus Konzentrationsmessungen in einem Tunnel bestimmt wurden, ist der Beitrag der Resuspension in den Werten der Tabelle 6.2 und des Bild 6.1 bereits enthalten.

Die hier angegebenen Emissionen aus Reifenabrieb und Resuspension sind deutlich höher als in der RABT 2006. Dies ist ein Ausdruck der Unsicherheiten, mit denen nicht-motorische Emissionsfaktoren nach wie vor versehen sind. Einige Messreihen deuten darauf hin, dass nicht-motorische Partikelemissionen bei starkem Verkehr nicht mehr proportional zur Anzahl Fahrzeuge sind. Einfach ausgedrückt: Bei hohem Verkehrsaufkommen können zusätzliche Fahrzeuge nicht immer neuen Staub aufwirbeln.

Da detailliertere Daten und Modelle derzeit nicht vorliegen, wird in dieser Studie empfohlen, weiterhin die Gesamtemissionen proportional zum Verkehrsaufkommen anzunehmen.

6.3 Zusammenfassung: Sichttrübung

Die Sichttrübung berechnet sich aus der Addition der Beiträge aus den motorischen Emissionen und aus dem Beitrag des Reifenabriebs.

Für einen Personenwagen ergibt sich die Trübe-Emission mit Reifenabrieb und Resuspension aus

$$e_{Pkw} = q_{R,Pkw} + \frac{x_D}{100} (q \cdot f_{iv} \cdot f_H)_D$$

mit:

$q_{R,Pkw}$ Trübe-Emission aus Reifenabrieb und Resuspension von Personenwagen in Quadratmeter pro Stunde und Fahrzeug

Für einen Lastwagen ergibt sich die Trübe-Emission mit Reifenabrieb und Resuspension aus

$$e_{Lkw} = q_{R,Lkw} + q \cdot f_{iv} \cdot f_H \cdot f_M$$

mit:

$q_{R,Lkw}$ Trübe-Emission aus Reifenabrieb und Resuspension von Lastwagen in Quadratmeter pro Stunde und Fahrzeug

Die weiteren Parameter sind in Abschnitt 5.1 beschrieben.

7 Unsicherheiten

Die Basisemissionen wurden von Messungen an Einzelfahrzeugen abgeleitet. Von dieser Stichprobe wird auf die mittleren Emissionen der Fahrzeuge hochgerechnet. Eine solche Hochrechnung ist mit entsprechenden Unsicherheiten versehen. Die Emissionsrechnung, die in dieser Studie dargestellt ist, kann keine höhere Genauigkeit erreichen, als die Emissionsprognose des HBEFA, auf der sie basiert.

Die Emissionswerte aus dem Reifenabrieb wurden von Messungen eines Tunnels abgeleitet. Weitere Feldmessungen bei unterschiedlichen Fahrzuständen im Tunnel wären äußerst nützlich für eine genauere Bestimmung der Wirkung von Reifenabrieb auf die Tunnellüftung.

Die Emissionswerte aus diesem Berechnungsverfahren sollten daher nach Möglichkeit regelmäßig mit den Ergebnissen von Feldmessungen und mit Betriebsdaten von Straßentunneln verglichen werden. Gegebenenfalls ist das Berechnungsverfahren anzupassen.

8 Vergleich der Basisemission unterschiedlicher Quellen

In diesem Abschnitt werden die Basisemissionen nach vier unterschiedlichen Berechnungsvorschriften verglichen. Diese Berechnungsvorschriften sind nationalen Richtlinien entnommen:

Mit „RABT06“ ist die Berechnungsvorschrift bezeichnet, die im allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 10/2006 veröffentlicht wurde und seitdem in Deutschland angewandt wird.

Mit „RVS“ ist die österreichische Projektierungsrichtlinie RVS 9.262 Lüftungsanlagen, Teil Luftbedarfsrechnung bezeichnet. Die Richtlinie wurde 2005 veröffentlicht.

Mit „ASTRA“ wird die Schweizer Richtlinie „Lüftung der Straßentunnel: Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung“ bezeichnet, die im Jahr 2008 veröffentlicht wurde.

Mit „RABTneu“ ist das Berechnungsverfahren bezeichnet, das in der vorliegenden Studie dokumentiert ist.

Den Basisemissionen dieser vergleichenden Betrachtung liegen die folgenden Randbedingungen zugrunde:

- Geschwindigkeit 60 km/h
- Keine Steigung
- Emission auf Meereshöhe
- Mittlere Masse der Lastwagen 10 Tonnen
- 40 Prozent der Personenwagen mit Dieselmotor (zum Teil in Abweichung zu den Dieselanteilen der Berechnungsvorschriften).

Bild 8.1 und Bild 8.2 zeigen die Entwicklung der CO-Emissionen für die vier Berechnungsverfahren.

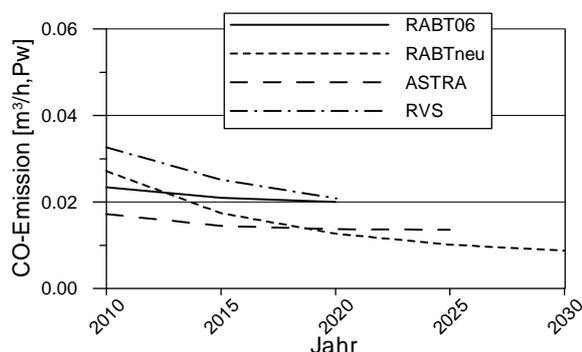


Bild 8.1: CO-Basisemission eines Pkw nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Bei den Personenwagen liegen die neuen Basisemissionen im Jahr 2015 deutlich unter den Emissionsfaktoren der RABT 2006. Die Emissionsfaktoren der RVS 9.262 liegen ab dem Jahr 2010 am höchsten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Berechnungsvorschrift die europäischen Emis-

sionsnormen EURO5 und EURO6 nicht berücksichtigt sind.

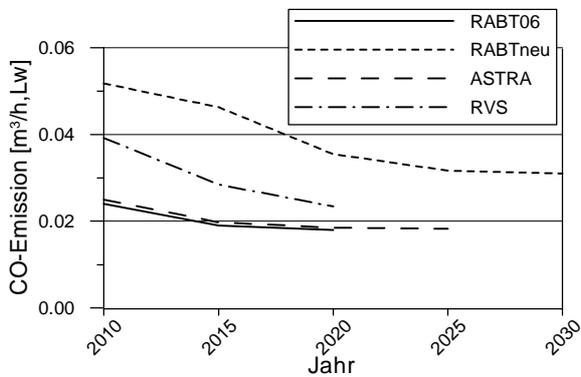


Bild 8.2: CO-Basisemission eines Lkw nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Der Vergleich zeigt eine signifikante Erhöhung der CO-Emissionen der einzelnen Fahrzeuge gegenüber der RABT 2006. Die Erhöhung kann sich daraus ergeben, dass die neuen Normen CO-Emissionen gegenüber dem Standard EURO4 nicht weiter beschränken. Zudem entwickelt sich die Zusammensetzung der Lastwagenflotte hin zu höheren Motorleistungen.

Bild 8.3 und Bild 8.4 zeigen die Entwicklung der NO_x-Emissionen für die Berechnungsverfahren „RABTneu“ und „RVS“.

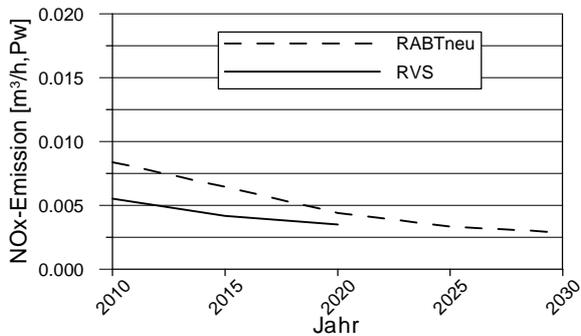


Bild 8.3: NO_x-Basisemission eines Pkw nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Bei den Personenwagen liegen die neuen Basisemissionen bis zum Jahr 2020 oberhalb der Emissionsfaktoren der RVS 9.262. Für Bezugsjahre ab 2020 deutet sich die Annäherung der beiden Kurven an. Die Fahrzeugflotte besteht dann praktisch ausschließlich aus Fahrzeugen, welche die Normen EURO5 und EURO6 erfüllen.

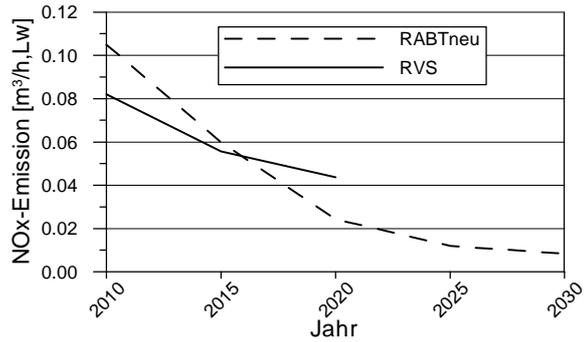


Bild 8.4: NO_x-Basisemission eines Lkw nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Die neuen Basisemissionen liegen bei den Lastwagen ca. ab dem Jahr 2017 unterhalb der Emissionsfaktoren der RVS 9.262.

Bild 8.5 und Bild 8.6 zeigen die Entwicklung der Trübe-Emissionen für die vier Berechnungsverfahren.

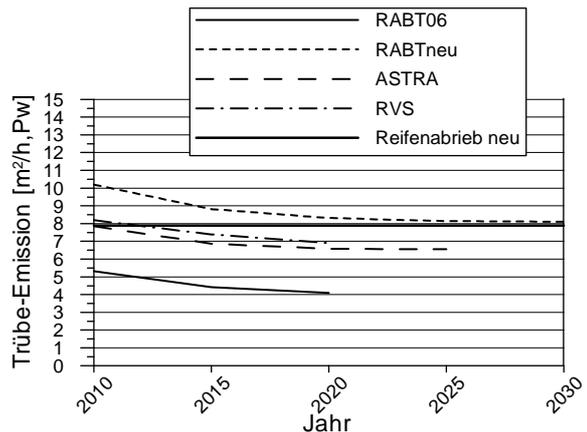


Bild 8.5: Trübe-Basisemission eines Pkw nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren

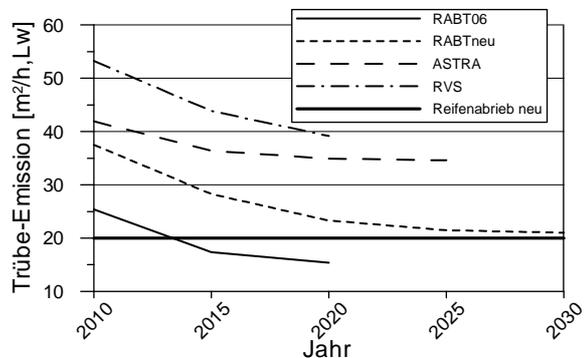


Bild 8.6: Trübe-Basisemission eines Lkw nach unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Ohne Berücksichtigung des Reifenabriebs wäre die Partikelemission der Personenwagen gegenüber den heute angewandten Werten stark vermindert. Mit den neuen Werten für Reifenabrieb ist sie

hingegen höher als die Werte der RABT 2006. Der Reifenabrieb macht ab dem Jahr 2025 etwa 90% der Trübe-Emissionen aus.

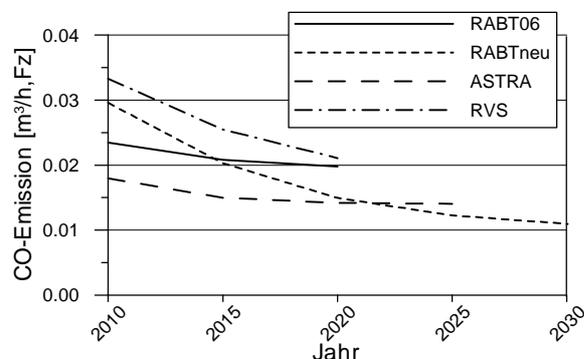


Bild 8.7: CO-Basisemission für einen Verkehrsmix mit 10 Prozent Lastwagen

Bild 8.7 bis Bild 8.9 zeigen die Emissionsentwicklung für ein mittleres Fahrzeug, das einen Anteil des Schwerververkehrs von 10 Prozent am Gesamtverkehr einschließt.

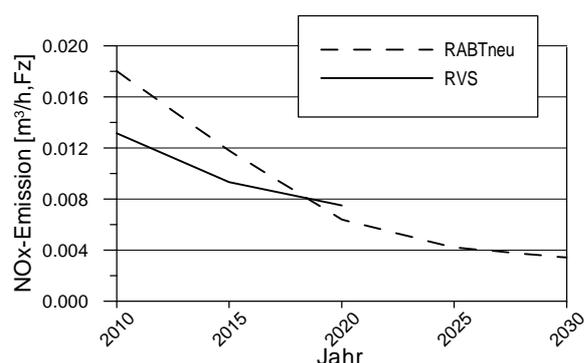


Bild 8.8: NO_x-Basisemission für einen Verkehrsmix mit 10 Prozent Lastwagen

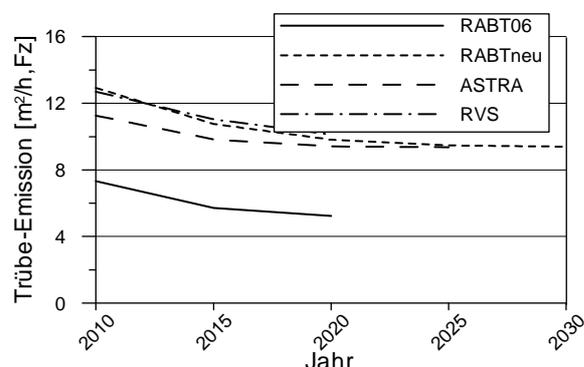


Bild 8.9: Trübe-Basisemission für einen Verkehrsmix mit 10 Prozent Lastwagen

Bei den CO-Emissionen liegen die Faktoren nach RABTneu, die in dieser Studie hergeleitet wurden, ab dem Jahr 2015 unter den Faktoren der RABT 2006 und der RVS 9.262. Die Werte liegen noch

etwas höher als jene der neuen Schweizer Richtlinie und sinken ca. ab dem Jahr 2022 unter die Faktoren des ASTRA. Bei den NO_x-Emissionen liegen die Werte der RABTneu ca. ab dem Jahr 2019 unterhalb der RVS. Bei der Trübe-Emission sind die RABTneu, die RVS und die ASTRA ungefähr auf gleicher Höhe. Der Unterschied zur RABT 2006 entspricht den unterschiedlichen Daten für den Reifenabrieb der Lastwagen.

9 Dimensionierung der Tunnel-lüftung

In diesem Abschnitt ist ein Beispiel einer Frischluftberechnung dargestellt. In diesem Beispiel gehen wir von den folgenden Randbedingungen aus:

- Tunnellänge 2 km
- Anzahl Spuren 2 (Gegenverkehr)
- Steigung 0%
- Verkehrsdichte Tabelle 6 (RABT 2006)
- Geschwindigkeit 0, 10 und 60 km/h
- Bezugsjahr 2020
- Höhe über Meer 200 m
- Lastwagenanteil 10%
- Masse der Lkw 20t

9.1 Frischluftbedarf CO

Der Frischluftbedarf für die Einhaltung der maximalen CO-Konzentration im Tunnel wird mit der Formel

$$Q_{ZL} = \frac{N \cdot L \cdot 10^6}{3600 \cdot CO_{zul}} \left[\left(1 - \frac{x_{Lkw}}{100} \right) \cdot e_{Pkw} + \frac{x_{Lkw}}{100} \cdot e_{Lkw} \right]$$

berechnet, dabei sind:

- Q_{ZL} minimale Frischluftmenge in Kubikmeter pro Sekunde
- N Anzahl Fahrzeuge pro Kilometer
- L Tunnellänge in Kilometer
- x_{Lkw} Anteil der Lastwagen am Gesamtverkehr in Prozent
- CO_{zul} zulässige CO-Konzentration in ppm

Die Faktoren 3600 und 10^6 sind für die Umrechnung von Stunden auf Sekunden und der Konzentration von eins in ppm notwendig. Die Emissionswerte e_{Pkw} und e_{Lkw} werden anhand der Daten in Abschnitt 3 berechnet.

Tabelle 9.1: CO-Emission der Pkw in [m³/h,Fz]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
f _{iv} (CO,B)	[-]	0,15	0,35	1,00
f _H (CO,B)	[-]	1,00	1,00	1,00
q _B (CO,B)	[m ³ /h,Fz]	0,02	0,02	0,02
f _{iv} (CO,D)	[-]	0,18	0,66	1,00
f _H (CO,D)	[-]	1,00	1,00	1,00
q _D (CO,D)	[m ³ /h,Fz]	0,001	0,001	0,001
e _{PKW} (CO)	[m ³ /h,Fz]	0,0019	0,0045	0,012

In die Berechnung der mittleren Emissionen pro Fahrzeug geht der Anteil der Dieselmotoren an den Personenwagen ein, der – ohne nähere Informationen – mit 52 Prozent angenommen wird.

Tabelle 9.2: CO-Emission der Lkw in [m³/h,Fz]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
f _{iv} (CO)	[-]	0,48	0,74	1,00
f _H (CO)	[-]	1,00	1,00	1,00
f _M (CO)	[-]	1,40	1,40	1,30
q (CO)	[m ³ /h,Fz]	0,035	0,035	0,035
e _{Lkw} (CO)	[m ³ /h,Fz]	0,024	0,037	0,046

Die Fahrzeugdichte aus Tabelle 6 der RABT ist in PWE (Personenwageneinheiten) je Fahrstreifen angegeben. Ein Lastwagen entspricht zwei Personenwageneinheiten. Mit dem Lastwagenanteil von 10 Prozent und der Anzahl Fahrspuren ergibt sich die Anzahl Fahrzeuge pro Tunnelkilometer *N* für beide Fahrspuren.

Tabelle 9.3: CO-Emission *E* in [m³/h] und Frischluftbedarf in [m³/s]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
e _{PKW} (CO)	[m ³ /h]	0,002	0,004	0,010
e _{Lkw} (CO)	[m ³ /h]	0,024	0,037	0,046
<i>N</i>	[Fz/km]	300	155	45
<i>L</i>	[km]	2	2	2
<i>E</i> (CO)	[m ³ /h,Fz]	0,0038	0,007	0,014
CO _{zul}	[ppm]	70	70	70
Q _{ZL}	[m ³ /s]	8,96	8,60	4,95

Von den drei betrachteten Verkehrssituationen hat der Stau mit 0 km/h den höchsten Frischluftbedarf für die Einhaltung des Grenzwerts der CO-Konzentration.

9.2 Frischluftbedarf NO_x

Der Frischluftbedarf für die Einhaltung der maximalen NO_x-Konzentration im Tunnel wird mit der Formel

$$Q_{ZL} = \frac{N \cdot L \cdot 10^6}{3600 \cdot NO_{x,zul}} \left[\left(1 - \frac{x_{Lkw}}{100} \right) \cdot e_{PKW} + \frac{x_{Lkw}}{100} \cdot e_{Lkw} \right]$$

berechnet, dabei sind:

Q_{ZL} minimale Frischluftmenge in Kubikmeter pro Sekunde

N Anzahl Fahrzeuge pro Kilometer

L Tunnellänge in Kilometer

*x*_{Lkw} Anteil der Lastwagen am Gesamtverkehr in Prozent

NO_{x,zul} zulässige NO_x-Konzentration in ppm

Die Faktoren 3600 und 10⁶ sind für die Umrechnung von Stunden auf Sekunden und der Konzentration von eins in ppm notwendig. Die Emissionswerte *e*_{PKW} und *e*_{Lkw} werden anhand der Daten in Abschnitt 4 berechnet.

Tabelle 9.4: NO_x-Emission der Pkw in [m³/h,Fz]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
f _{iv} (NO _x ,B)	[-]	0,12	0,40	1,00
f _H (NO _x ,B)	[-]	1,00	1,00	1,00
q _B (NO _x ,B)	[m ³ /h,Fz]	0,002	0,002	0,002
f _{iv} (NO _x ,D)	[-]	0,16	0,42	1,00
f _H (NO _x ,D)	[-]	1,00	1,00	1,00
q _D (NO _x ,D)	[m ³ /h,Fz]	0,008	0,008	0,008
e _{PKW} (NO _x)	[m ³ /h,Fz]	0,0008	0,0021	0,0051

In die Berechnung der mittleren Emissionen pro Fahrzeug geht der Anteil der Dieselmotoren an den Personenwagen ein, der – ohne nähere Informationen – mit 52 Prozent angenommen wird.

Tabelle 9.5: NO_x-Emission der Lkw in [m³/h,Fz]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
f _{iv} (NO _x)	[-]	0,08	1,23	1,00
f _H (NO _x)	[-]	1,00	1,00	1,00
f _M (NO _x)	[-]	2,00	2,00	2,10
q (NO _x)	[m ³ /h,Fz]	0,02	0,02	0,02
e _{Lkw} (NO _x)	[m ³ /h,Fz]	0,004	0,059	0,050

Die Fahrzeugdichte aus Tabelle 6 der RABT ist in PWE (Personenwageneinheiten) je Fahrstreifen angegeben. Ein Lastwagen entspricht zwei Personenwageneinheiten. Mit dem Lastwagenanteil von 10 Prozent und der Anzahl Fahrspuren ergibt sich die Anzahl Fahrzeuge pro Tunnelkilometer *N* für beide Fahrspuren.

Tabelle 9.6: NO_x-Emission E in [m³/h] und Frischluftbedarf in [m³/s]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
e_{Pkw} (NO _x)	[m ³ /h]	0,0008	0,0021	0,0051
e_{Lkw} (NO _x)	[m ³ /h]	0,0038	0,0590	0,0504
N	[Fz/km]	300	155	45
L	[km]	2	2	2
E (NO _x)	[m ³ /h,Fz]	0,0011	0,0078	0,0096
NO _{x,zul}	[ppm]	15	15	15
Q _{ZL}	[m ³ /s]	12,07	44,77	16,24

Von den drei betrachteten Verkehrssituationen hat der stockende Verkehr mit 10 km/h den höchsten Frischluftbedarf für die Einhaltung des Grenzwerts der NO_x-Konzentration.

9.3 Frischluftbedarf Trübe

Die Berechnung des Frischluftbedarfs für die Einhaltung der Sichttrübung wird mit der Formel

$$Q_{ZL} = \frac{N \cdot L}{3600 \cdot ST_{zul}} \left[\left(1 - \frac{x_{Lkw}}{100} \right) \cdot e_{Pkw} + \frac{x_{Lkw}}{100} \cdot e_{Lkw} \right]$$

berechnet, dabei sind:

- Q_{ZL} minimale Frischluftmenge in Kubikmeter pro Sekunde
- N Anzahl Fahrzeuge pro Kilometer
- L Tunnellänge in Kilometer
- x_{Lkw} Anteil der Lastwagen am Gesamtverkehr in Prozent
- ST_{zul} zulässige Sichttrübung in [1/m]

Der Faktor 3600 ist für die Umrechnung von Stunden auf Sekunden notwendig. Die Emissionswerte e_{Pkw} und e_{Lkw} werden anhand der Daten in den Abschnitten 0 und 6 berechnet.

Tabelle 9.7: Trübe-Emission der Pkw in [m²/h,Fz]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
q _B (ST,B)	[m ² /h,Fz]	0,00	0,00	0,00
f _{iv} (ST,D)	[-]	0,06	0,60	1,00
f _H (ST,D)	[-]	1,00	1,00	1,00
q _D (ST,D)	[m ² /h,Fz]	1,04	1,04	1,04
q _R (ST)	[m ² /h,Fz]	0,00	1,32	7,90
e_{Pkw} (ST)	[m ² /h,Fz]	0,03	1,48	7,60

In die Berechnung der mittleren Emissionen pro Fahrzeug geht der Anteil der Dieselmotoren an den Personenwagen ein, der – ohne nähere Informationen – mit 52 Prozent angenommen wird.

Tabelle 9.8: Trübe-Emission der Lkw in [m²/h,Fz]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
f _{iv} (ST)	[-]	0,28	0,51	1,00
f _H (ST)	[-]	1,00	1,00	1,00
f _M (ST)	[-]	1,90	1,90	1,90
q (ST)	[m ² /h,Fz]	3,29	3,29	3,29
q _R (ST)	[m ² /h,Fz]	0,00	4,89	29,33
e_{Lkw} (ST)	[m ² /h,Fz]	0,18	0,81	3,56

Die Fahrzeugdichte aus Tabelle 6 der RABT ist in PWE (Personenwageneinheiten) je Fahrstreifen angegeben. Ein Lastwagen entspricht zwei Personenwageneinheiten. Mit dem Lastwagenanteil von 10 Prozent und der Anzahl Fahrspuren ergibt sich die Anzahl Fahrzeuge pro Tunnelkilometer N für beide Fahrspuren.

Tabelle 9.9: Trübe-Emission E in [m²/h] und Frischluftbedarf in [m³/s]

Faktor		0km/h	10km/h	60km/h
e_{Pkw} (ST)	[m ² /h,Fz]	0,03	1,48	7,60
e_{Lkw} (ST)	[m ² /h,Fz]	0,18	0,81	3,56
N	[Fz/km]	300	155	45
L	[km]	2	2	2
E (ST)	[m ² /h,Fz]	0,20	2,29	11,15
CO _{zul}	[1/m]	0,005	0,005	0,005
Q _{ZL}	[m ³ /s]	6,81	39,29	56,33

Von den drei betrachteten Verkehrssituationen hat der flüssige Verkehr mit 60 km/h den höchsten Frischluftbedarf für die Einhaltung des Grenzwerts der Sichttrübung.

Mit den Randbedingungen dieses Tunnels wird die Einhaltung des Grenzwertes der Stickoxide und der Sichttrübung für den Frischluftbedarf maßgebend sein.

10 Ausblick

Aus den neuen, höheren Emissionswerten für Auslegung der Lüftung im Normalbetrieb ergibt sich, dass die starke Abnahme der Fahrzeugemissionen innerhalb der letzten Jahre sich nicht auf die Dimensionierung von Tunnellüftungen auswirkt. Die Bedeutung des Normalbetriebs bei der Lüftungsdimensionierung nimmt zu, die Wahl des Lüftungssystems und die Festlegung der Luftmengen werden dennoch weiterhin vorwiegend von den Anforderungen der Sicherheit im Brandfall bestimmt. Die Auswertung von Betriebsdaten und von speziellen Messreihen aus bestehenden Tunneln, kann sowohl für die Prüfung der aktuellen Emissionsdaten als auch für die Auslegung der Tunnellüftung bedeutsam werden.

Obwohl das Handbuch Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes eine umfangreiche Datenbasis darstellt, sind die Informationen für Höhen- und Massenfaktoren kaum ausreichend. Daher wurden in dieser Studie z.B. Höhenfaktoren aus einer anderen Berechnungsmethodik übernommen.

Die derzeit gültigen Bemessungswerte der Luftqualität könnten ebenfalls einer grundsätzlichen Überprüfung unterzogen werden.

Ausgehend von dieser Untersuchung wird empfohlen, die Auslegung von Lüftungsanlagen in Straßentunneln anhand der Leitstoffe Trübe und NO_x vorzunehmen.

Die Ausrüstung neuer Tunnel bzw. die Nachrüstung von Tunneln mit Messeinrichtungen zur Erfassung der NO_x -Konzentration muss aufgrund von Unsicherheiten hinsichtlich der Grenzwerte weiter untersucht werden. Es empfiehlt sich, detailliertere Kenntnisse zur Festlegung der Grenzwerte der NO_x -Konzentration (z.B. für Tunnelsperrung) zu gewinnen, z.B. durch Sammeln von Erfahrungen beim Betrieb von NO_x -Messungen in Tunneln. Werden die Tunnel mit Messeinrichtungen zur Erfassung der NO_x -Konzentration ausgerüstet, könnte auf die Installation von CO-Messgeräten verzichtet werden.

Literatur

World Road Association PIARC: Pollution by Nitrogen Dioxide in Road Tunnels, 2000

Bundesamt für Straßen ASTRA, Bern: Lüftung der Straßentunnel; Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung, Ausgabe 2008 2.00

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln RABT, Ausgabe 2006

Deutsche Forschungsgemeinschaft: Liste aller Änderungen und Neuaufnahmen in der MAK und BAT-Werte-Liste 2009

Staatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe: Jahresbericht 2009

Directive 2005/55/EC of the European parliament and the of the council, 28 September 2005

INFRAS (im Auftrag des Deutschen Umweltbundesamts): Elektronisches Handbuch Emissionsfaktoren HBEFA, Version 3.1, Januar 2010

Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics: Emission Factors from the Model PHEM fort he HBEFA Version 3, TU Graz, Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679, Dezember 2009

I. Rieß, M. Bettelini: Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von Straßentunneln im Hinblick auf die Verringerung der Schadstoffemissionen bei Kraftfahrzeugen, FE 89.080/2000/B3, HBI Bericht 00-202-01, August 2000

Kraftfahrt-Bundesamt (www.kba.de): Bestand an Personenkraftwagen in den Jahren 2006 bis 2010 nach Kraftstoffarten (Teil 2), aufgerufen am 06.12.2010

Österreichische Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr, Wien: Projektierungsrichtlinien Lüftungsanlagen, RVS 9.262 Luftbedarfsrechnung, März 2005

Regulation (EC) No 595/2009 of the European parliament and of the council, 18 June 2009

Sturm P.J., Henn M., Bachler G.: Emission Factors for paved and unpaved Roads - Validation by Tunnel and Field Measurements, 2010

Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des europäischen Parlaments und des Rates, 20. Juni 2007

World Road Association PIARC: Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation, Report 05.14.B, 2004