



**Untersuchung der
Fahrzeugzusammensetzung der Autobahn
A22 und Berechnung der erzeugten
Emissionen**





INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung.....	3
1. Methodik und verwendete Datenbanken.....	4
1.1. Berechnungsmethodik COPERT V zur Ermittlung der Emissionen und Anwendung für die vorliegende Fallstudie.....	4
1.2. Datenbank des Gebührenermittlungssystems der A22.....	7
a. Klassifizierung der Fahrzeuge in Hauptklassen.....	7
b. Klassifizierung der Fahrzeuge nach Euroschadstoffklassen und Kraftstoffverwendung.....	9
c. Zusätzliche Untersuchungen Herkunft/Ziel der Verkehrsflüsse.....	13
1.3. Datenbank der Messpunkte der A22 (Induktionsschleifen).....	14
a. Klassifizierung der Fahrzeuge in Hauptklassen.....	14
b. Verteilung der Geschwindigkeiten.....	15
c. Zusätzliche Untersuchungen: Überprüfung der Datenkonsistenz.....	16
2. Emissionsberechnung.....	18
3. Beurteilung der Auswirkungen der dynamischen Tempolimits für verkehrstechnische Zwecke (Ansatz).....	28



Zusammenfassung

Dieses Dokument gibt die Hinweise und Ergebnisse zu den Tätigkeiten der ersten zwei Jahre des LIFE Projektes "BrennerLEC" wieder. Auf der Brennerautobahn A22 wird ein fortschrittliches Verwaltungskonzept zur Steuerung der Verkehrsflüsse unter Anwendung von dynamischen Tempolimits angewandt. Ziel ist die Verringerung der Schadstoffemissionen.

Dieses Dokument erläutert insbesondere die durchgeführten Untersuchungen in Bezug auf die Fahrzeugzusammensetzung des Verkehrs der Brennerautobahn und die für die Berechnung der verkehrsbedingten Emissionen verwendeten Aktionen und Vorgehensweisen. Diese Tätigkeiten wurden durch die Erhebung von Messdaten auf der betroffenen Autobahn durchgeführt, dazu wurde eine Datenbank, die auf dem System für die Gebührenermittlung des Autobahnbetreibers basiert (welches Kennzeichen, Gebührenklassen, Nationalität, Eingangs- und Ausfahrtmautstellen des Fahrzeuges aufzeichnet) und einer Datenbank mit den an den Induktionsschleifen gesammelten Daten (Momentangeschwindigkeit und Fahrzeugkategorie) verwendet.

Das fachgerechte Zusammenführung dieser Daten erlaubte es, speziell für diesen Zweck ein System für die Berechnung der Schadstoffbelastungen der betroffenen Straßenabschnitte laut der Berechnungsmethodik COPERT V zu entwickeln. Dieses System bewertet die Variation der Schadstoffbelastung aufgrund der Veränderung der Fahrgeschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer, welche auf der vom Projekt vorgesehene Anwendung von Tempolimits beruht.

Die angewandte Untersuchungsmethodik und der vorliegende Bericht wurden vom Unternehmen CISMA ausgearbeitet, dieses erhielt wertvolle Unterstützung von Seiten des Autobahnbetreibers durch die Bereitstellung der Datenbanken und den anderen BrennerLEC Projektpartnern für die Verbesserung der angewandten Methodik.



1. Methodik und verwendete Datenbanken

Das in diesem Bericht beschriebene Ziel der Untersuchung ist eine genaue Beurteilung der auf den experimentellen Straßenabschnitten des Projektes BrennerLEC erzeugten CO₂ - und NO_x -Emissionen. Diese Berechnung beruht auf gemessenen verkehrstechnischen Parametern (Anzahl, Art und Geschwindigkeit der Fahrzeuge).

1.1. Berechnungsmethodik COPERT V zur Ermittlung der Emissionen und Anwendung für die vorliegende Fallstudie

Die Emissionen werden mithilfe des Algorithmus COPERT V hinsichtlich der Art der Fahrzeuge und der zeitlichen Variationen für jeden einzelnen Straßenabschnitt berechnet. Der Algorithmus befolgt die Methodik COPERT, welche derzeit ein europäischer Standard zur Ermittlung der Emissionen des Straßenverkehrs darstellt (^{1,2}). Dieser Algorithmus ermöglicht die Berechnung der Emissionen anhand der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Art des Motors und der Fahrzeugklasse (Fahrzeugkategorie, verwendeter Kraftstoff, Dimensionen des Motors, Euroschadstoffklasse). Die Methodik COPERT wird auch in den europäischen Richtlinien "EMEP" für die Berechnung der Emissionen vorgeschlagen (³).

Die Emissionsfaktoren werden für jeden einzelnen Schadstoff und jede einzelne Fahrzeugklasse laut folgender Formel berechnet:

$$EF = [A \cdot v^2 + B \cdot v + C + D/v] / [E \cdot v + F]$$

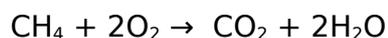
wo:

- v ist die Geschwindigkeit des Fahrzeuges [ausgedrückt in km / h]
- A..F sind die Koeffizienten bezüglich jeder Klasse und Schadstoff
- EF ist der Emissionsfaktor [ausgedrückt in g / km]

Die Emissionsfaktoren können also für alle geregelten Schadstoffe berechnet werden, einschließlich der NO_x -Belastungen, welche für das vorliegende Projekt

-
- 1 COPERT 4: Computer programme to calculate emissions from road transport, Gkatzoflias et al., EEA, 2009
 - 2 COPERT: a European road transport emission inventory model, Ntziachristos et al, Information technologies in environmental engineering, 491-504, 2009
 - 3 EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook, 2016

von besonderen Interesse sind. Die Berechnung der CO₂-Emissionen bezieht sich auf den Kraftstoffverbrauch, in Funktion der Molekülmasse von Benzin, Diesel, Flüssiggas (LPG) und Methan und dem Verhältnis der fast stöchiometrischen Verbrennung. Beispielsweise, für den einfachsten Fall von Methan ist die Formel die folgende:



Da die Molekülmasse von Methan 16 und jene für Kohlendioxid 44 beträgt, wird für jedes Gramm verbranntes Methan $44/16 = 2,75$ g CO₂ erzeugt. Für Benzin und Diesel beträgt das Verhältnis ca. 44/15.

Die Abb. 1 stellt das zusammenfassende Flussdiagramm aller benötigten Eingangsparameter für die Berechnungsmethodik COPERT V zur Ermittlung der Emissionen dar.

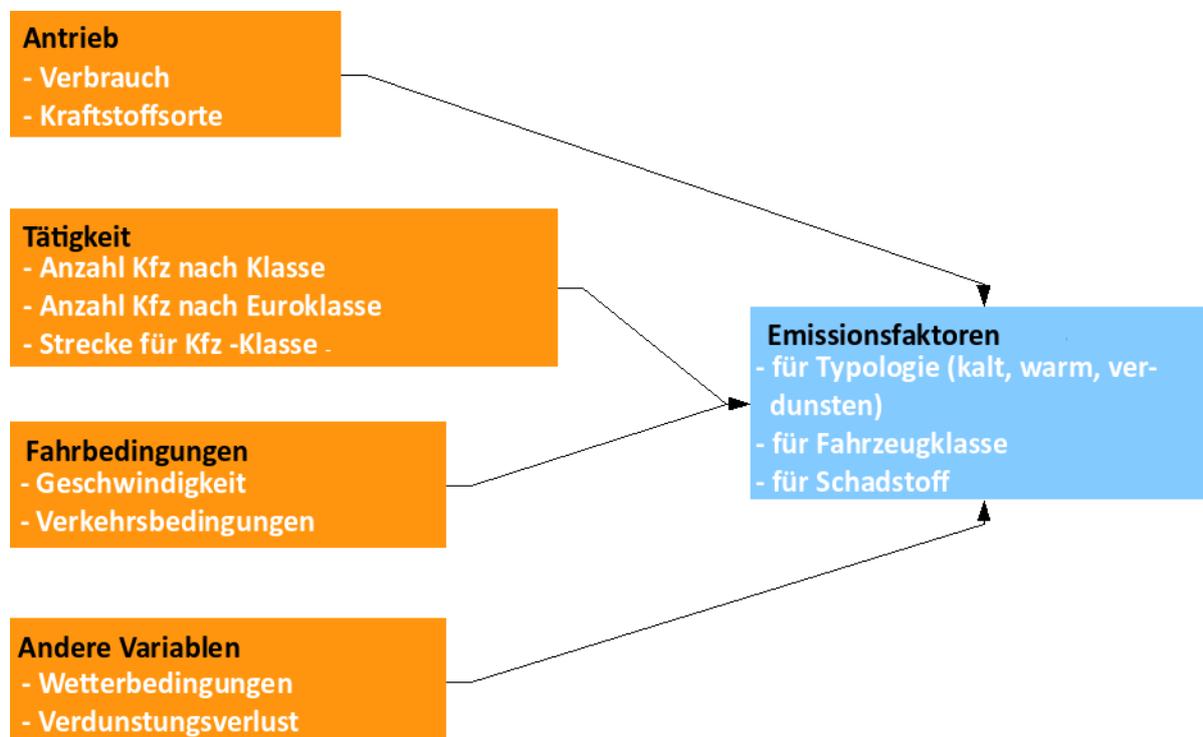


Abb. 1: Benötigte Informationen für die Anwendung der Berechnungsmethodik COPERT V zur Ermittlung der Emissionen.

Der Emissionsfaktor hängt daher eng von der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Euroschadstoffklasse und der Kraftstoffsorte ab. Um realistische Informationen in Zusammenhang mit diesen drei Charakteristiken des Autobahnverkehrs der A22



zu erhalten, wurden Daten aus zwei verschiedenen Datenbanken zum Durchgangsverkehr verwendet:

1. Das **System für die Gebührenermittlung** des Autobahnbetreibers sammelt folgende Daten: Kennzeichen, Gebührenklasse, Nationalität, Eingangs- und Ausfahrtmautstellen; diese Daten wurden für vier für das Verkehrsaufkommen repräsentative Tage bei verschiedenen Konditionen und Verkehrsteilnehmer ausgewertet.
 - Freitag, 21. Juli 2017: Werktag mit Touristen
 - Donnerstag, 12. Oktober 2017: Werktag ohne Touristen
 - Samstag, 15. Juli 2017: Feiertag mit Touristen
 - Sonntag, 07. Mai 2017: Feiertag ohne Touristen
2. Gesammelte Daten bei 5 **Verkehrszählstationen zur Verkehrsklassifikation** (magnetische Induktionsschleifen) innerhalb der Projektstrecken an den Standorten km 103, 107, 138, 156 und 164 der Brennerautobahn. Die Daten beziehen sich auf eine Durchfahrt auf einen der 4 Fahrstreifen (2 Fahrstreifen und 2 Überholspuren) und enthalten Parameter wie Momentangeschwindigkeit und Fahrzeugtypologie (Leicht- u. Schwerfahrzeug). Die vom Betreiber in Echtzeit gemessenen Rohdaten, werden täglich ausgewertet und in Verkehrsflüsse umgerechnet (Fahrzeuge pro Stunde).

Die Informationen aus beiden Datenbanken wurden untersucht, ausgewertet und zusammengestellt, um die notwendigen Daten für die Verwendung der COPERT V Methodik und somit für die Berechnung der Emissionen zu erhalten. Die aus der ersten Datenbank stammenden Informationen wurden dazu verwendet, die auf der A22 fahrenden Fahrzeugen hinsichtlich ihrer Euroschadstoffklasse und ihren verwendeten Kraftstoffs zu unterteilen. Die Informationen aus der zweiten Datenbank wurden dazu verwendet um die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge zu erhalten. Um die beiden Datenbanken zu verwalten und um die aus ihnen abgeleiteten Informationen zu verwenden wurden die Fahrzeuge anhand der verschiedenen Informationen der Datenbanken in drei Hauptkategorien unterteilt (Leichtfahrzeuge, Schwerfahrzeuge und Busse). In Abb. 2 wird der Informationsfluss schematisch abgebildet, dieser wird anschließend in den

weiteren Abschnitten des vorliegenden Berichtes kommentiert, diese beschäftigen sich eingehend mit den durchgeführten Untersuchungen der einzelnen Datenbanken und am Ende werden die Schlussfolgerungen angeführt.

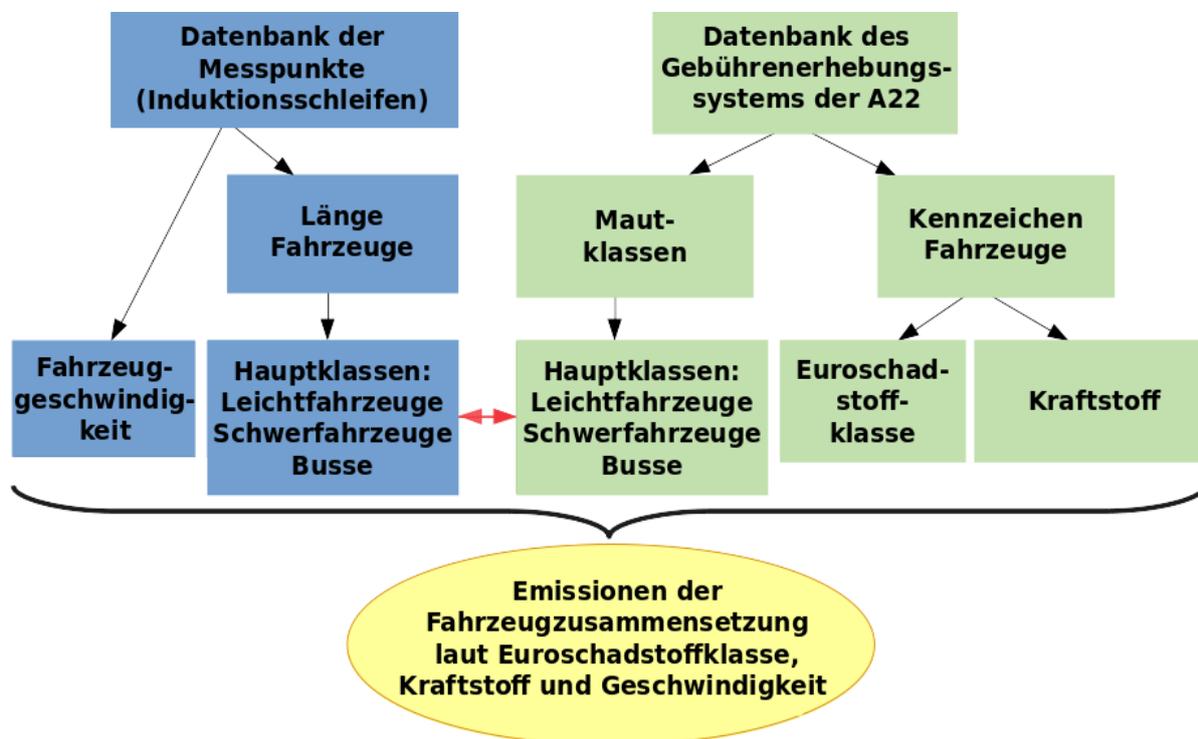


Abb. 2: Flussdiagramm der zwei Datenbanken mit den gemessenen Daten für die Berechnung der Schadstoff-Emissionen.

1.2. Datenbank des Gebührenermittlungssystems der A22

a. Klassifizierung der Fahrzeuge in Hauptklassen

Um die Informationen der Datenbank des Gebührenermittlungssystem der A22 verwenden zu können musste zuallererst eine Vorgehensweise festgelegt werden, die die Fahrzeuge an eine der drei Hauptklassen zuweist: Leichtfahrzeuge, Schwerfahrzeuge und Busse. Diese Klassifikation ist notwendig um diese Daten mit jenen aus der Datenbank der Induktionsschleifen vergleichen zu können.

Die für die Klassifizierung verwendeten Information wurde von den Mautgebührenklassen abgeleitet. Die Datenbank der Fahrzeuge registriert 5 verschiedenen Gebührenklassen (A, B, 3, 4 e 5) unter Berücksichtigung der



Anzahl der Fahrzeugachsen und deren Dimensionen. In dieser Untersuchung wurden die angeführten Klassen zusammengefügt und in Tabelle 1 wiedergegeben.

Mautklassen					
	A	B	3	4	5
Hauptklasse	Leichtfahr- zeuge	Leichtfahr- zeuge	^{1/2} Schwerfahrze uge ^{1/2} Busse	Schwerfahrze uge	Schwerfa hr-zeuge

Tabelle 1: Zusammenfassung der Mautklassen in Hauptklassen nach gewünschter Fahrzeugkategorie.

Als Fallbeispiel für das gegenwärtige Projekt werden in Abb. 3 die Unterteilung der schweren und leichten Klassen (in diesem Fall wurden auch die Busse miteinbezogen) an 4 untersuchten Tagen und weiterer Unterteilung in italienische und ausländische Fahrzeuge, für den Abschnitt Neumarkt - San Michele angeführt.

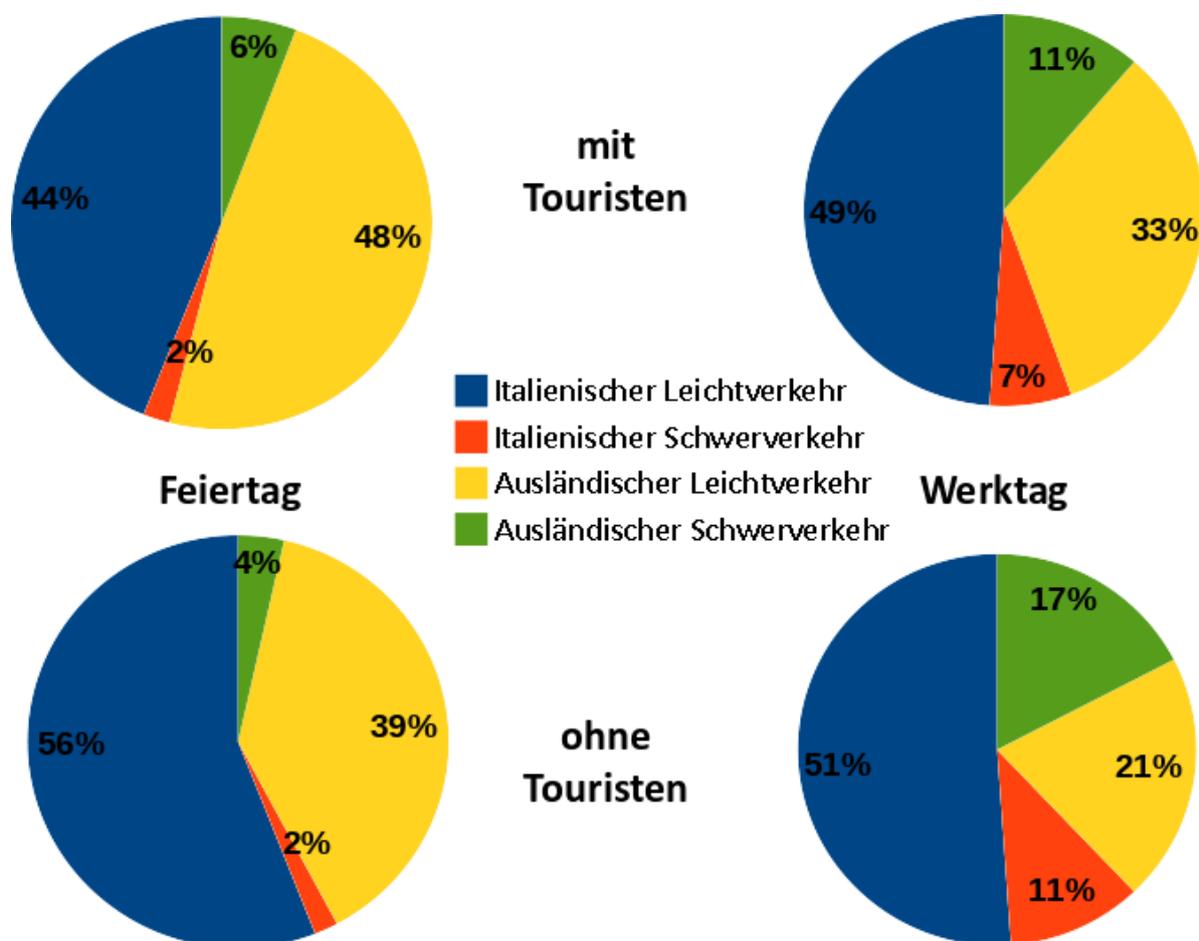


Abb. 3: Unterteilung der Hauptklassen in Leicht-/Schwerverkehr und italienischen/ausländischen Verkehrsteilnehmern auf der A22 für die zu Verfügung stehende Tage im Abschnitt Neumarkt - San Michele.

b. Klassifizierung der Fahrzeuge nach Euroschadstoffklassen und Kraftstoffverwendung

Die Informationen für die Verteilung der Euroklassen und Kraftstoffverwendung der Fahrzeuge wurden aus der ersten Datenbank hergeleitet: diese beinhaltet die Kennzeichen der Fahrzeuge, dadurch konnte auf die Euroklasse und Kraftstoffverwendung direkt bestimmt werden. Dieser Ansatz ermöglichte einen Vergleich mit einer höheren Präzision, als in den herkömmlich verwendeten Methodiken.



Mit Hilfe des Kennzeichens wird ein Zusammenhang mit den von ACI (italienischer Automobilverband) jährlich veröffentlichen Daten hergestellt, diese Daten sind im Wesentlichen eine Weiterverarbeitung des öffentlichen Automobilregisters, das auf die Provinzen aufgeteilt wird. Die gegenwärtig aktuellsten Daten sind aus dem Jahre 2016. Da sich die Anzahl der zugelassenen Fahrzeug konstant verändert und diese die Faktoren zwischen den einzelnen Fahrzeugklassen bedeutend beeinflusst, ist es wichtig, dass die statistische Zusammensetzung des Fahrzeugbestandes fortlaufend aktualisiert wird. Die herkömmlich verwendete Methodik weist folgende Problematiken auf:

- Die auf der Autobahn fahrende Fahrzeuge können nicht mit den zugelassenen Fahrzeugbestand der durchquerten Zone gleichgestellt werden, da nur ein geringer Anteil dem lokalen Verkehr angehört.
- Die auf der Autobahn fahrende Fahrzeuge sind tendenziell neuer als jene des Fahrzeugregisters.
- Bei Berücksichtigung des verwendeten Kraftstoffs (Diesel/Benzin) wird angenommen, dass die Abweichung zwischen effektiven und zugelassenen Fahrzeugen weiter ansteigen.
- Die Mehrheit der Schwerfahrzeuge sind als Lastzüge zugelassen, während auf der Autobahn hauptsächlich Sattelschlepper zirkulieren.

Durch die Bereitstellung der Datenbank von Seiten des Autobahnbetreibers wurden diese Probleme vollständig überwunden und die Informationen genauer dargestellt.

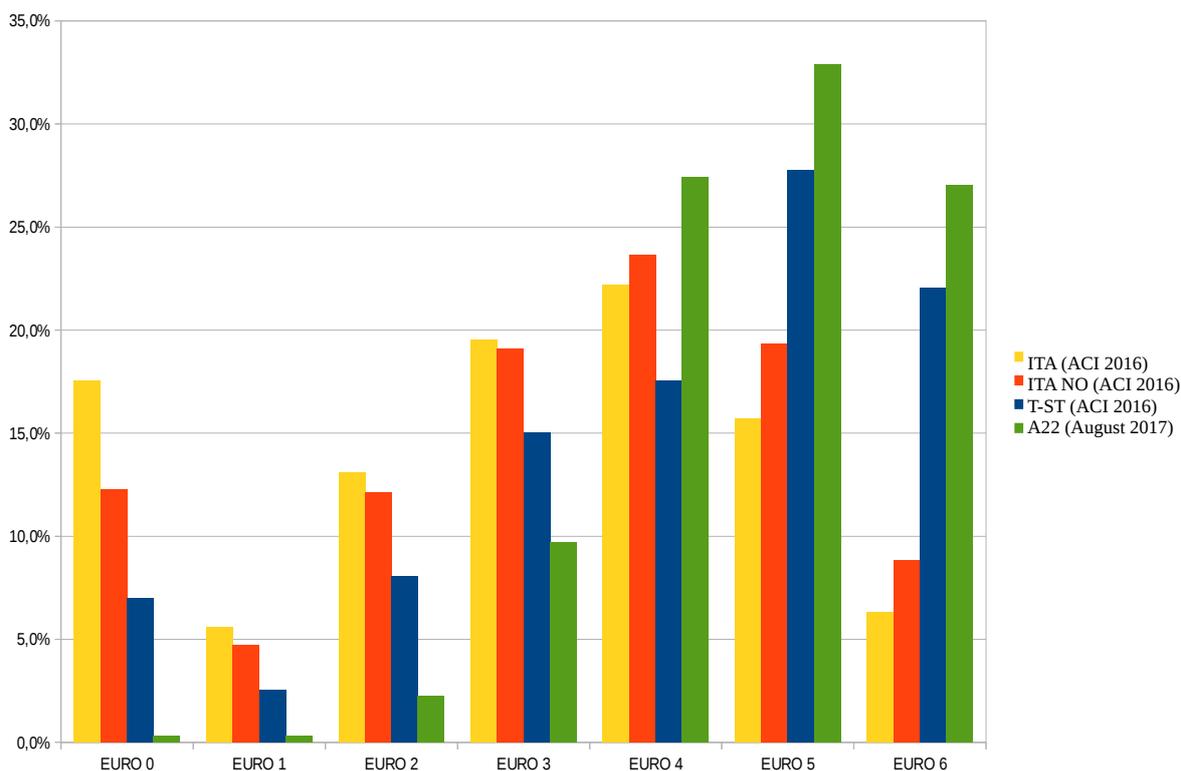


Abb. 4: Verteilung der Euroschadstoffklasse der Fahrzeuge aus den verschiedenen Datenbanken: ACI Italien 2016, ACI Nord-Ost Italien 2016, ACI Italien Trentino Südtirol 2016, A22 2017.

In der Abb. 4 wird die Verteilung der Euroschadstoffklasse laut Angaben der verschiedenen Datenquellen dargestellt und deren Unterschiede verdeutlicht. Das Diagramm vergleicht die Daten aus den ACI Daten von 2016 (Italien, Nord-Ost, Trentino - Südtirol) und den Fahrzeugen aus der Datenbank der A22, welche zu Verfügung gestellt wurden (für 4 Tage). Dieser Vergleich bestätigt die Theorie, dass die Fahrzeuge, die auf der Autobahn zirkulieren um ca. 4 Jahre jünger sind als die zugelassenen Fahrzeuge. Somit wirken sich auch die tatsächlich vorhandenen Euroschadstoffklassen vorteilhafter auf eine Verminderung der Schadstoffemissionen aus. Insbesondere verkehren keine Euroschadstoffklassen 0/1 auf der A22.

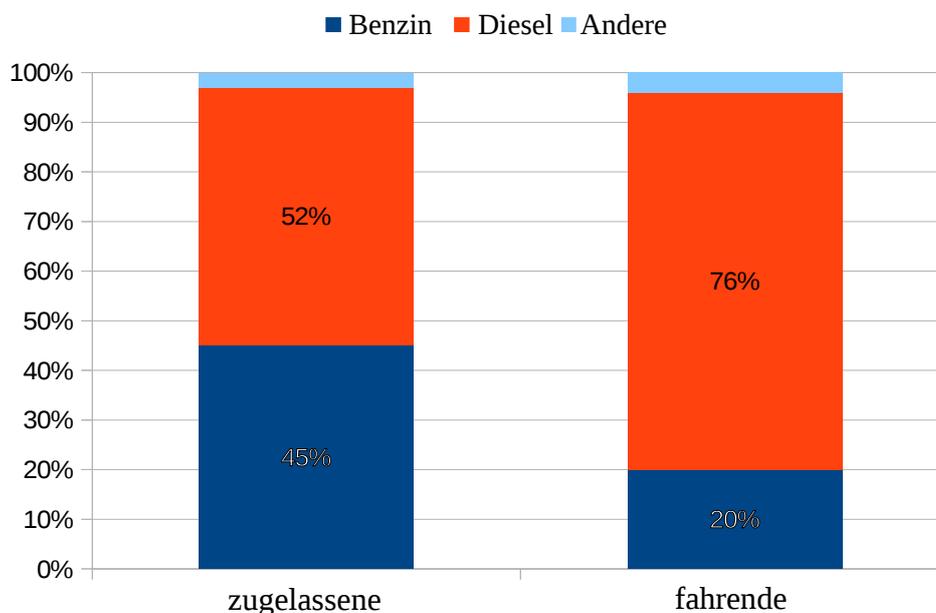


Abb. 5: Verteilung des verwendeten Kraftstoffes der Fahrzeuge aus den Datenbanken ACI Italien 2016 (“zugelassene”) und der Datenbank der A22 2017 (“fahrende”).

Die Bedeutung der Verteilung der Fahrzeuge aufgrund des verwendeten Kraftstoffes ist gleichwertig zur Vorherigen. In der Datenbank der ACI Webseite wird seit kurzem auch der verwendete Kraftstoff angegeben, dadurch konnte auch dieser Faktor mit den Ergebnissen der A22 verglichen werden. Aus Abb. 5 ist ersichtlich, dass der Anteil der Dieselfahrzeuge auf der A22 höher ist als jener der zugelassenen Fahrzeuge: diese Tatsache hat negative Auswirkungen auf die NO_x- Emissionen und wirkt dem zuvor aufgezeigten Vorteil der jüngeren Fahrzeuge entgegen.

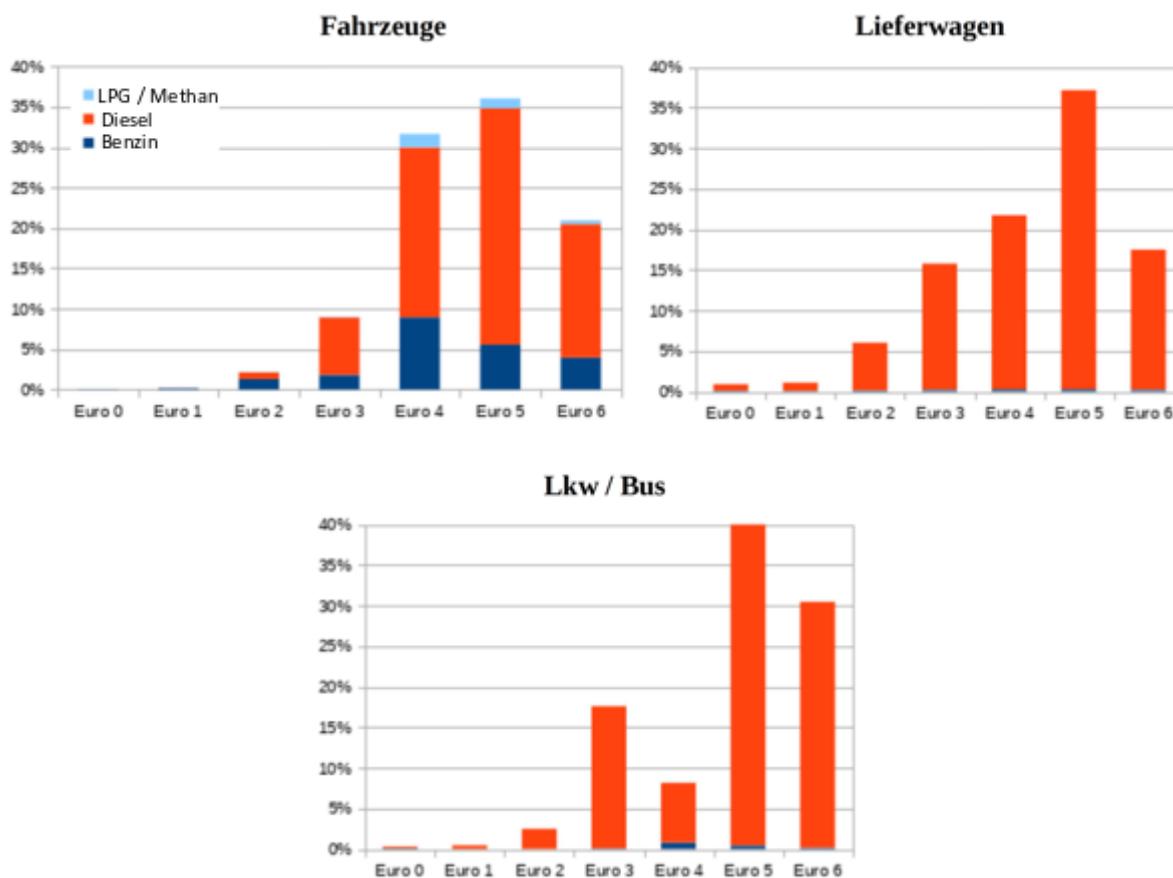


Abb. 6: Verteilung der verwendeten Kraftstoffe für die Euroklassen von Pkw (Mautklasse A, Leichtfahrzeuge), Lieferwagen (Mautklasse B, Leichtfahrzeuge) und Lkw und Busse (Mautklassen 3, 4, 5).

Dieser Zusammenhang ist aus den Abb. 6 und Abb. 7 ersichtlich: die Verteilung der verwendeten Kraftstoffsorten für die Euroklassen von Pkw (Mautklasse A, Leichtfahrzeuge), Lieferwagen (Mautklasse B, Leichtfahrzeuge) und Lkw und Busse (Mautklassen 3, 4, 5). Man beachte, dass die Mautklasse B fast ausschließlich aus Dieselfahrzeugen besteht.

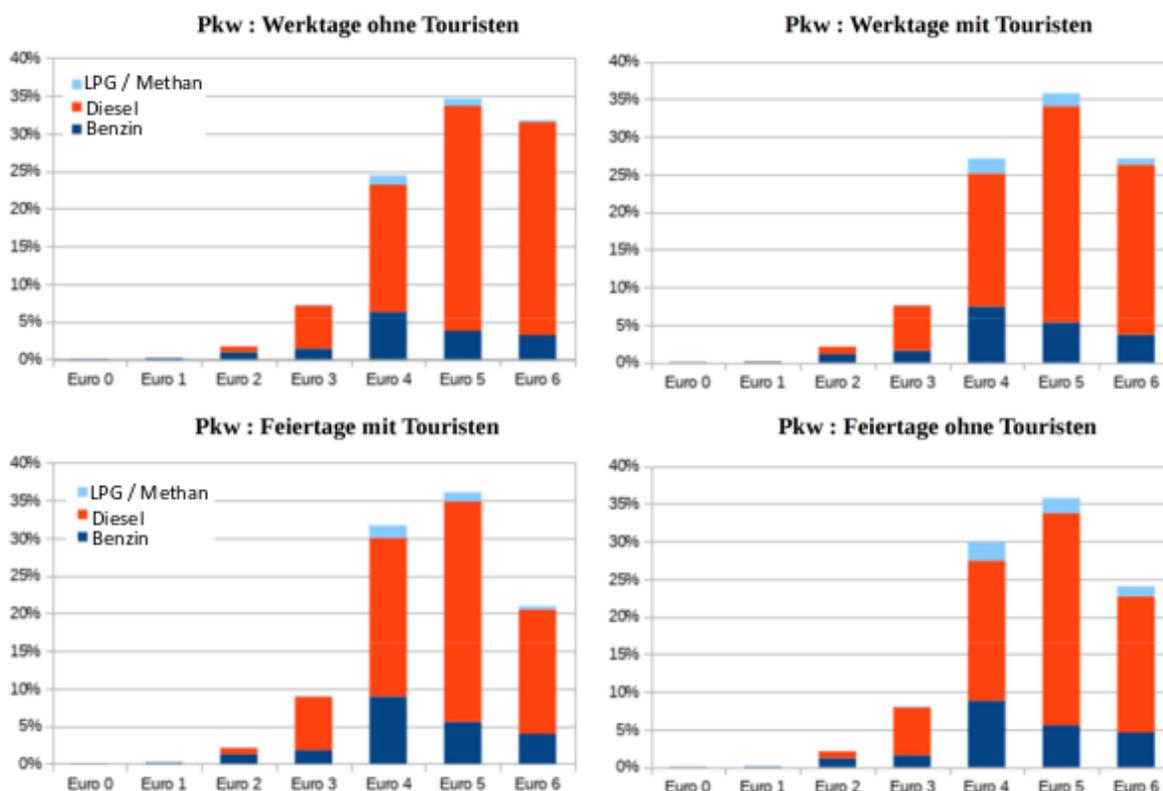


Abb. 7: Verteilung der Kraftstoffsorten nach Euroschadstoffklasse der Pkw in den verschiedenen Tagen der Datenbank.

c. Zusätzliche Untersuchungen Herkunft/Ziel der Verkehrsflüsse

Die in den Datenbanken der A22 enthaltenen Daten wurden auch für weitere Untersuchungen und Bewertungen verwendet, die nicht unbedingt mit der Berechnung Schadstoffemissionen zusammenhängen. Anhand der Daten der Mautgebühren werden Angaben über die Herkunft und das Ziel des Leichtverkehrs aller Mautstellen der Autobahn ermittelt und in 4 repräsentative Testtage unterteilt: Feiertage ohne Touristen, Werktage ohne Touristen, Feiertage mit Touristen und Werktage mit Touristen. Diese Untersuchungen waren für die Bestimmung der Streckenabschnitte mit dem höchsten Verkehrsaufkommen besonders wertvoll, hatten aber auch den Vorteil, den Einfluss der im Zuge des Projektes BrennerLEC umgesetzten Vorgehensweisen auf die Verkehrsflüsse besser zu verstehen.

In Bezug auf das Untersuchungsgebiet konnte beobachtet werden, dass an Werktagen ein hoher von Pendlern verursachter Verkehrsfluss in den Abschnitten



Bozen Süd – Neumarkt und Bozen Süd – Trient Nord vorhanden ist, dieser ist im Fall mit niedrigen Touristen besser bemerkbar. Im Bereich zwischen Bozen Süd und Rovereto Süd erreicht der Leichtverkehr einen Anteil von ca. 50% (bzw. der Anfang und das Ende des Verkehrsflusses befinden sich außerhalb dieses Abschnittes), während die andere Hälfte sich aus einer Überlappung mit den lokalen Fahrtwegen zusammensetzt. Im Fall von Feiertagen bemerkt man gesamtheitlich eine Verminderung des Verkehrs, welche auf die Verminderung der Verkehrsteilnehmer mit kurzen Verkehrswegen (und somit von Pendlern) zurückzuführen ist. Die Ausnahme dieser Gültigkeit betrifft die Wochenenden mit größeren Touristenströmen, an denen man eine Erhöhung der Eingänge und Ausfahrten an bestimmten Mautstellen innerhalb der Zonen des BrennerLEC Projektes verzeichnet. Diese Mautstellen beziehen sich auf die folgende Einflussbereiche: Meran (Mautstelle Bozen), Val di Fiemme (Mautstelle Neumarkt), Valle dei Laghi (Mautstelle Trient Nord) und Garda (Rovereto Sud). Im letzteren Fall kann nicht von einem “Durchgangsverkehr” im engeren Sinn gesprochen werden, da dieser als Ziel oder Herkunftsgebiet die Region hat, trotzdem nimmt man an, dass der Anteil der langen Fahrstrecken der Touristen am Wochenenden sich auf 75% des Gesamtverkehrsaufkommens beläuft.

1.3. Datenbank der Messpunkte der A22 (Induktionsschleifen)

a. Klassifizierung der Fahrzeuge in Hauptklassen

Um die Informationen der Datenbank der Induktionsschleifen für die Berechnung der Emissionen verwenden zu können, musste eine Vorgehensweise der Klassifizierung der Fahrzeuge in drei Hauptklassen festgelegt werden: Leichtfahrzeuge, Schwerfahrzeuge und Busse. Diese Hauptklassen waren notwendig um die Informationen der Induktionsschleifen mit jenen des Gebührenerhebungssystems der A22 vergleichen zu können.

Die für die Klassifizierung in Hauptklassen verwendete Information stützt sich auf Fahrzeugkategorien. In dieser Datenbank werden aufgrund des magnetischen Einflusses 9 verschiedene Kategorien an den Induktionsschleifen registriert: Motorräder, Pkw, Autoanhänger, Lieferwagen, Busse, Lkw (<12t), Lkw (>12t), Sattelschlepper und Lastzüge. Im Zuge dieser Untersuchung wurden diese in die in Tabelle 2 dargestellten Hauptklassen zusammengefügt.



Fahrzeugkategorie									
	Motor - rad	Pkw	Pkw+ Anhäng er	Klein- laster	Bus	Lkw (<12t)	Lkw (>12t)	Sattel- schlepp er	Last- zug
Haupt- klasse	Leichtfahrzeuge				Busse		Schwerfahrzeuge		

Tabelle 2: Zusammenfassung der Fahrzeugkategorien der Datenbank der Induktionsschleifen in die gewünschten Hauptklassen der Fahrzeuge.

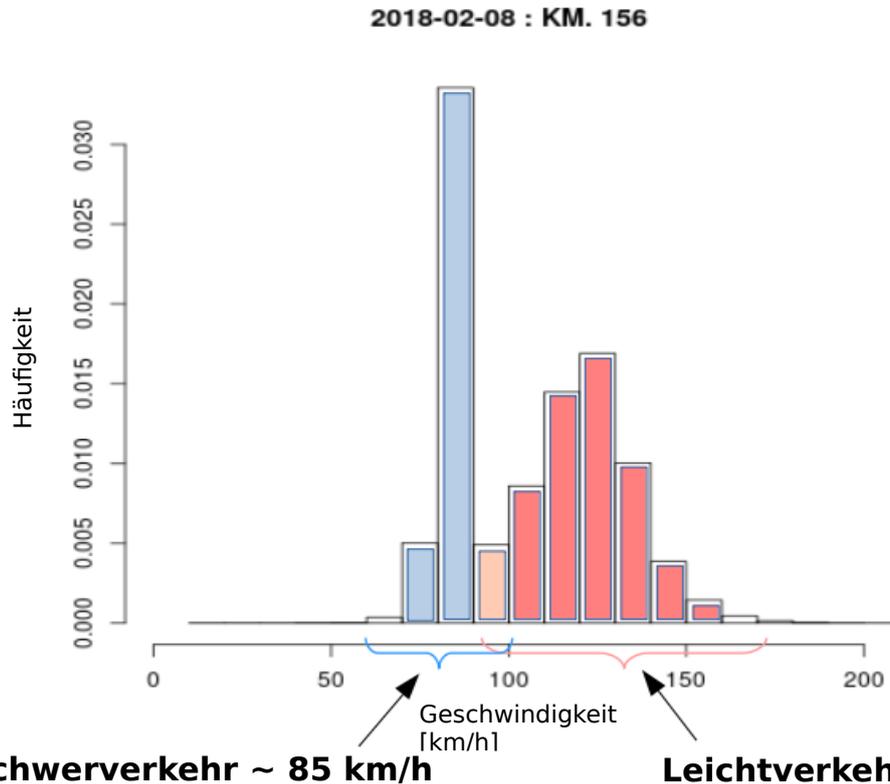


Abb. 8: Geschwindigkeitsverteilung aller Fahrzeuge der Datenbank der Induktionsschleifen.

b. Verteilung der Geschwindigkeiten

Die Verteilung der Informationen der Fahrzeuge aus der zweiten Datenbank der Induktionsschleifen erfolgt durch die direkte Messung der Fahrgeschwindigkeit, welche die Induktionsschleife passieren.

In Abb. 8 wird als Beispiel die Verteilungshäufigkeit der Geschwindigkeiten der Fahrzeuge über den Induktionsschleifen angeführt: die Verteilung stellt die Zusammensetzung der zwei Geschwindigkeiten von Leicht- und Schwerverkehr dar. Während die Verteilung der Geschwindigkeiten der Leichtfahrzeuge eine höhere Standardabweichung aufweist, ist die Verteilung der Geschwindigkeiten des Schwerverkehrs auf dem Mittelwert von ca. 85 km/h konzentriert.

c. Zusätzliche Untersuchungen: Überprüfung der Datenkonsistenz

Die enthaltenen Daten der Induktionsschleifendatenbanken wurden auch für anschließende Untersuchungen und Auswertungen verwendet, die nicht das Ziel hatten die Emissionen zu berechnen sondern die Konsistenz der Datenbank zu überprüfen.

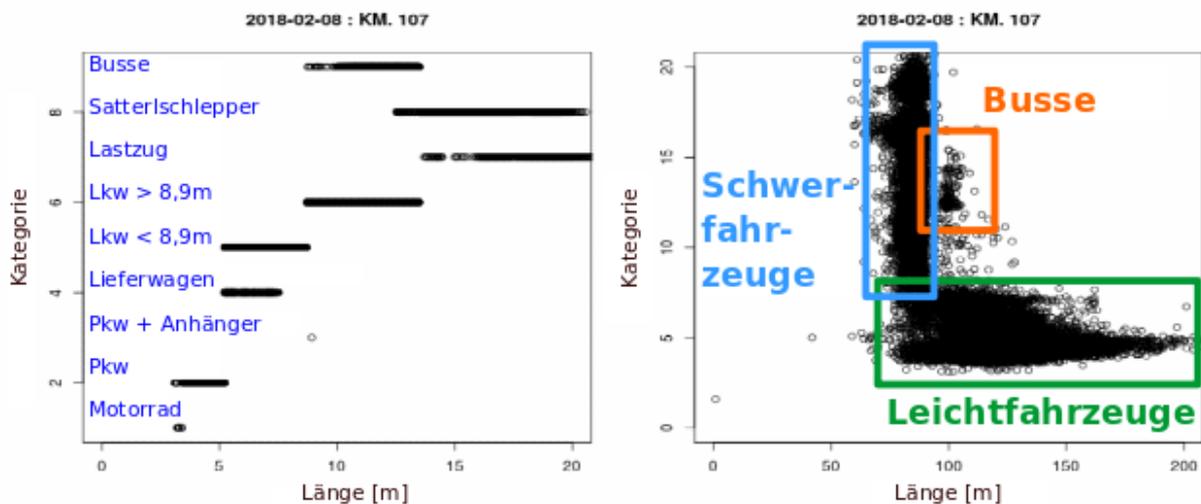


Abb. 9: Links: Fahrzeuglängen laut Kategorien der Datenbank der Induktionsschleifen; rechts: Fahrzeuglängen laut ihrer Geschwindigkeit.

In Abb. 9 werden zwei Datenuntersuchungsbeispiele wiedergegeben: im linken Abschnitt ist die Längen der Fahrzeuge laut Fahrzeugkategorie der Datenbank der Induktionsschleifen angegeben, im rechten Abschnitt laut ihrer Geschwindigkeit. Untersuchungen dieser Art lassen eine unmittelbare Bewertung der Zuverlässigkeit der klassifizierten Fahrzeugkategorien der Datenbank zu: beispielsweise wird ein als Motorrad klassifiziertes Fahrzeug mit einer Länge von mehr als 5 Meter als Fehlfunktion des Messinstrumentes erkannt und daher diese Informationen nicht berücksichtigt. Die gesammelten Daten wurden unter Berücksichtigung dieser Kriterien untersucht und dadurch die stabilsten und zuverlässigsten Daten für die Induktionsschleifen bei km 107, 138, 156 ermittelt.

Die durch Induktionsschleifen gesammelte Daten können dazu verwendet werden, um Untersuchungen zur temporäre Erhöhung der Geschwindigkeit und der Anzahl der Durchfahrten, gemessen für den linken Fahrstreifen und die

Überholspur, im „Normalzustand“ oder bei Messungen mit aktivierten Tempolimit, durchzuführen. Ein veranschaulichtes Beispiel wird in Abb. 10 dargestellt.

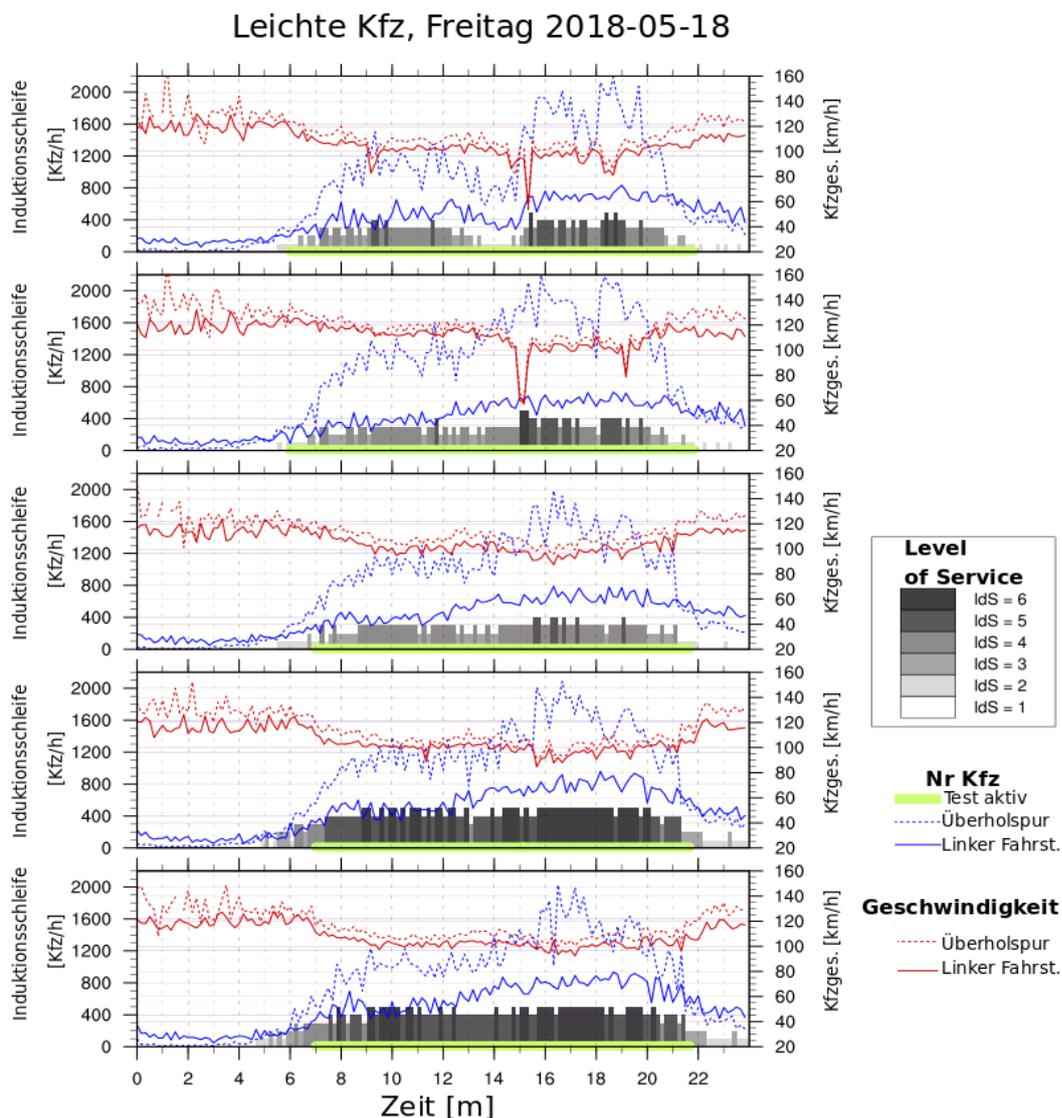


Abb. 10: Verlauf der Geschwindigkeit und Anzahl der Durchfahrten, gemessen an einzelnen Induktionsschleifen laut linken Fahrstreifen und Überholspur, für einen Beispieltag, mit Indikation des Standardverkehrsflusses der Straße und aktiviertem Tempolimit.

2. Emissionsberechnung

Unter Verwendung der oben dargestellten Methodik und durch die Kombination der beiden für die Projektziele zur Verfügung gestellten Datenbanken, war es möglich die Emissionen, der auf der Autobahn zirkulierenden Fahrzeuge mit einem hohen Genauigkeitsgrad zu bestimmen.

Die Emissionen können innerhalb von bestimmten Zeitabständen berechnet werden, diese reichen vom Jahresdurchschnitt bis zu 10 Minutenmittelwerten, und erlauben die Auswirkungen der aktivierten Tempolimits auf die Schadstoffemissionen zu beurteilen.

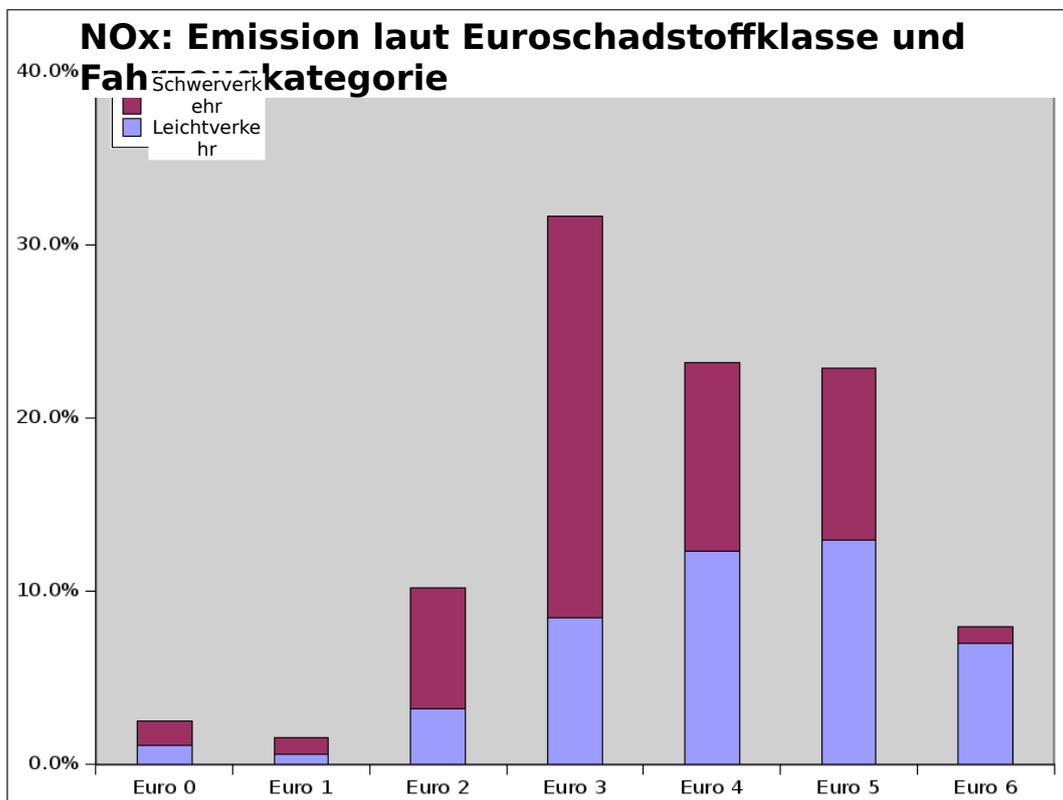


Abb. 11: NO_x -Emissionsanteil laut Euroschadstoffklasse und Fahrzeugkategorie unter Verwendung aller gesammelten Daten der Induktionsschleife bei km 107 über einen Zeitraum von fast einem Jahr, dem Jahr 2017

Abb. 11 gibt das Ergebnis der NO_x -Emissionen nach Euroschadstoffklasse und Fahrzeugkategorie unter Verwendung aller gesammelten Daten der

Induktionsschleife bei km 107 über einen Zeitraum von fast einem Jahr (2017) an. Diese Abbildung gibt die Emissionen laut Euroschadstoffklassen für Schwerfahrzeuge und Leichtfahrzeuge wieder. Insgesamt können die NOx-Emissionen zu 55% den Schwerfahrzeugen und zu 45% den Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (davon 2% der Benziner und 43% Dieselfahrzeuge) angerechnet werden.

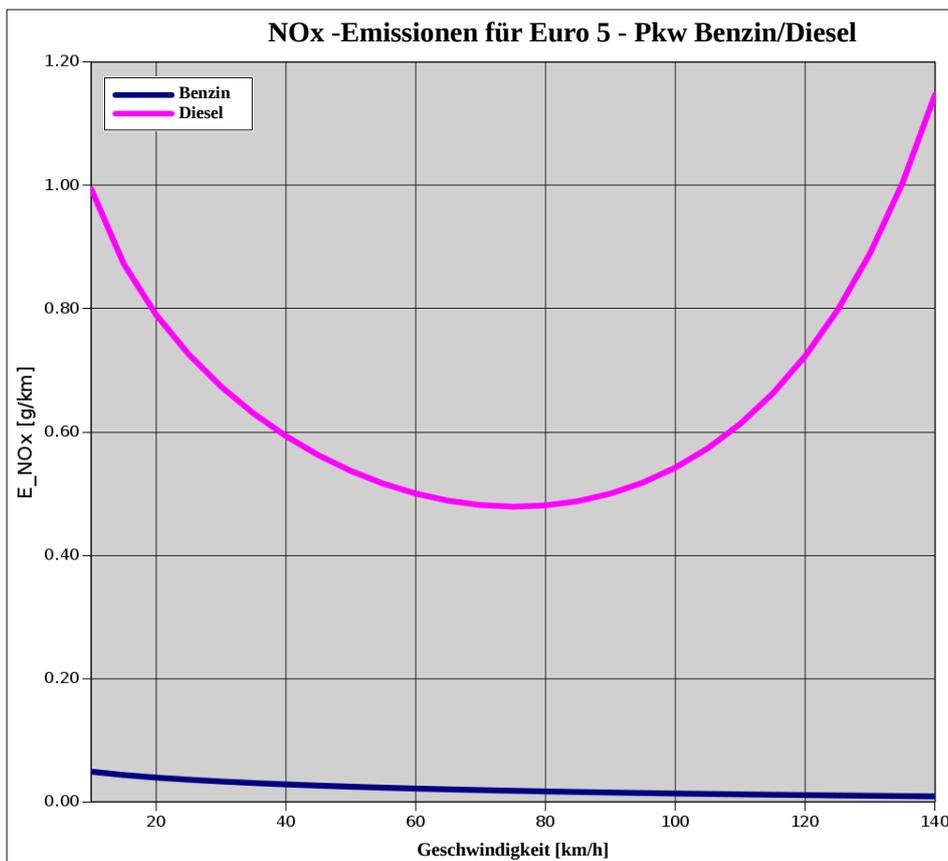


Abb. 12: Verlauf der NOx -Emissionen in Funktion der Geschwindigkeit für benzin- und dieseltreibene Euro 5 -Pkw (aus COPERT V Emissionsfunktionen).

Diese Ergebnisse haben eine große Bedeutung für die Beurteilung der Wirksamkeit der Geschwindigkeitsreduzierung, diese ist für Diesel-Pkw sehr hoch und sehr niedrig für Benzin-Pkw. Dieses Konzept wird in Abb. 12 durch die Emissionskurven dargestellt, welche unter Verwendung von COPERT V erstellt wurden. Beispielsweise ergibt eine Reduzierung der Geschwindigkeit von 130 auf



100 km/h bei Euro-5-Diesel-Pkw, welche derzeit am häufigsten auf der Autobahn verbreitet sind, eine Verminderung der NO_x Emissionen vom 30%, während die Emissionen bei Benzin-Pkw nur leicht abnehmen. Dieser so erhebliche Unterschied des Verlaufs der Emissionen zwischen Diesel- und Benzin-Pkw betrifft NO_x, für andere Schadstoffe wie z.B. CO₂ hat man eine bedeutende Reduzierung auch für Benzin-Pkw.

In den Tabellen 3 und 4 werden die Emissionsverminderungen in Prozentanteilen für Pkw mit verschiedenen Kraftstoffen und Euroklassen für Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide, Flüchtige organische Verbindungen, Feinstaub und Kohlendioxid dargestellt. Die unten angeführte Tabelle gibt die Emissionsfaktoren laut COPERT V bei Geschwindigkeiten von 130 km/h (Tempolimit auf der Autobahn) und 100 km/h (Tempolimit der ersten Projekt - Testphase im Streckenabschnitt Neumarkt - S. Michele) wieder. Für die Berechnung der Emissionen bei den zwei angegebenen Geschwindigkeiten werden optimale Konditionen angenommen. Von der Realität weichen diese Werte etwas ab, da die mittlere Fahrgeschwindigkeit der Pkw nicht exakt den beiden angegebenen Werten entspricht und sich die Form der Verteilungskurve je nach ausgeschildertem Tempolimit verändert. Auf jeden Fall zeigen die Tabellen ein hohes Reduktionspotential für NO_x und CO. Insbesondere für den Schadstoff NO_x gilt, dass die erhöhten Emissionsfaktoren hauptsächlich von Dieselfahrzeugen stammen. Für Benzinmotoren der neueren Generation wird das Gegenteil angenommen, der Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten 130 km/h und 100 km/h ist kaum bemerkbar. Dies beruht auf der Tatsache, dass die Funktionsweise der Motoren so optimiert wurde, dass die Geschwindigkeit bei der minimalen Emissionen erzeugt werden, gesteigert werden konnte. Des Weiteren sollte man sich vor Augen halten, dass bei maximal zugelassener Geschwindigkeit der Autobahn die Euro 5/6 -Benzin-Pkw etwa 50 Mal weniger Stickoxide erzeugen als Diesel-Pkw.

Neben den Schadstoffen welche typisch für Fahrzeugemissionen (NO_x, CO, PM, COV) sind, wurden auch die CO₂ - Emissionen pro Kilometer angegeben. Man weißt darauf hin, dass es sich dabei um ein Treibhausgas mit globalen Auswirkungen handelt und nicht um einen lokalen Schadstoff. Seine Emissionen werden in Proportion zum Kraftstoffverbrauch berechnet (aufgrund des



stöchiometrischen Verhältnisses Brennstoff / Sauerstoff). Die Annahme, dass bei einer geringeren Geschwindigkeit weniger Emissionen erzeugt werden ist auch für den Schadstoff Kohlendioxid gültig.

	Euro -Kl.	CO			NOx			COV		
		[g/km]		[%]	[g/km]		[%]	[g/km]		[%]
		v130	v100	Δ	v130	v100	Δ	v130	v100	Δ
Benzin	0	19.376	16.207	-16%	3.51	3.13	-11%	1.041	1.247	20%
	1	5.449	1.767	-68%	0.81	0.46	-43%	0.176	0.110	-37%
	2	2.581	0.749	-71%	0.20	0.18	-10%	0.053	0.042	-20%
	3	3.826	1.148	-70%	0.11	0.05	-54%	0.048	0.026	-47%
	4	1.980	0.530	-73%	0.02	0.02	0%	0.022	0.017	-23%
	5	1.426	0.439	-69%	0.01	0.01	0%	0.016	0.007	-58%
	6	1.240	0.374	-70%	0.01	0.01	0%	0.017	0.008	-50%
Diesel	0	0.331	0.384	16%	0.80	0.53	-34%	0.048	0.062	28%
	1	0.394	0.206	-48%	0.87	0.66	-24%	0.030	0.026	-16%
	2	0.120	0.037	-69%	1.16	0.66	-43%	0.013	0.015	16%
	3	0.009	0.013	44%	1.42	0.75	-47%	0.007	0.009	17%
	4	0.019	0.022	16%	1.00	0.58	-42%	0.006	0.006	1%
	5	0.015	0.009	-38%	0.89	0.54	-39%	0.001	0.001	8%
	6	0.073	0.045	-38%	0.56	0.34	-39%	0.001	0.001	8%

Tabelle 3: Veränderung der Emissionen von Pkw für die Schadstoffe CO, NOx und COV durch Erhöhung des Tempolimits von 100 auf 130 km/h, unterteilt nach verwendetem Kraftstoff (Benzin/Diesel) und Euroklasse.

	Euro - Kl.	PM			CO ₂		
		[g/km]		[%]	[g/km]		[%]
		v130	v100	Δ	v130	v100	Δ
Benzin	0	0.002	0.002	0%	286.5	243.8	-15%
	1	0.002	0.002	0%	222.5	164.5	-26%
	2	0.002	0.002	0%	178.9	155.6	-13%



	3	0.001	0.001	0%	207.0	169.1	-18%
	4	0.001	0.001	0%	205.2	176.4	-14%
	5	0.004	0.001	-68%	205.2	176.4	-14%
	6	0.003	0.002	-53%	205.2	176.4	-14%
Diesel	0	0.312	0.170	-46%	266.1	158.4	-40%
	1	0.193	0.107	-45%	201.8	153.0	-24%
	2	0.081	0.051	-38%	192.2	154.2	-20%
	3	0.074	0.045	-40%	187.4	144.1	-23%
	4	0.034	0.026	-23%	187.4	144.1	-23%
	5	0.001	0.002	10%	187.4	144.1	-23%
	6	0.001	0.001	15%	187.4	144.1	-23%

Tabelle 4: Veränderung der Emissionen von Pkw erzeugten Schadstoffe PM und CO₂ aufgrund einer Erhöhung des Tempolimits von 100 auf 130 km/h, unterteilt nach verwendeten Kraftstoff (Benzin/Diesel) und Euroklasse.

Dieselbe Vorgehensweise für die Berechnung der Emissionsunterschiede kann auch für die Messdaten verwendet werden, dabei wird nicht Bezug auf eine mittlere Fahrgeschwindigkeit aber auf die effektive Verteilung der Häufigkeit der Geschwindigkeiten genommen. In Abb. 13 werden die Verteilungen der der Geschwindigkeitshäufigkeiten von Pkw mit den dazugehörenden Emissionen verglichen. In der oberen Abbildung wird eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 125 km/h (nicht aktiver Test) dargestellt. Die untere Abbildung bezieht sich auf 105 km/h (aktivierte Testphase).

Es lässt sich feststellen, dass die Geschwindigkeitsverteilung unter normalen Verkehrsbedingungen einen symmetrischen Verlauf aufweist, die Emissionen hingegen nicht symmetrisch verlaufen: das bedeutet, dass bei gleichbleibender Anzahl von Fahrzeugen, jene mit höheren Geschwindigkeiten einen stärkeren Einfluss ausüben, als jene Fahrzeuge mit Geschwindigkeiten unterhalb des Mittelwertes. In der Testphase mit aktivierten Tempolimit verringert sich die mittlere Fahrgeschwindigkeit und ihre Veränderung, was eine gesamtheitliche Verminderung der Emissionen zur Folge hat.

Vergleicht man zwei Geschwindigkeitsverteilungen um die Mittelwerte von 130 und 110 km/h (Abb. 14) unter Annahme eines idealen Verkehrsflusses, sei es bei



nicht aktiven und aktivierten Testphasen, so erhält man einen Unterschied der Emissionen von 35%.

In den Abb. 15 und 16 werden vier synthetische Darstellungen der angewandten Methodiken aufgezeigt. Die entsprechende Durchfahrten und die jeweiligen Geschwindigkeiten der Abb. 15 sind anhand der für verkehrstechnische Untersuchungen typischen Definitionen der äquivalenten Kraftfahrzeuge (Kfz_{eq}) berechnet worden.

$$N_{Kfz_{eq}} = N_{Kfz_{leicht}} + 2.5N_{Kfz_{schwer}}$$

$$V_{eq} = (V_{Kfz_{leicht}} * N_{Kfz_{leicht}} + V_{Kfz_{schwer}} * 2.5N_{Kfz_{schwer}}) / N_{Kfz_{eq}}$$

Nach Bestimmung dieser Definitionen war es möglich, zusätzlich zu den gesamten Emissionen (oberer Abschnitt der Abb. 16) auch einen standardisierenden Indikator zu beurteilen, bzw. die spezifische Emissionen (unterer Abschnitt Abb. 16) dieser Einheit erweist sich als sehr praktisch um unterschiedliche Tage mit verschiedenen Verkehrsaufkommen miteinander zu vergleichen.

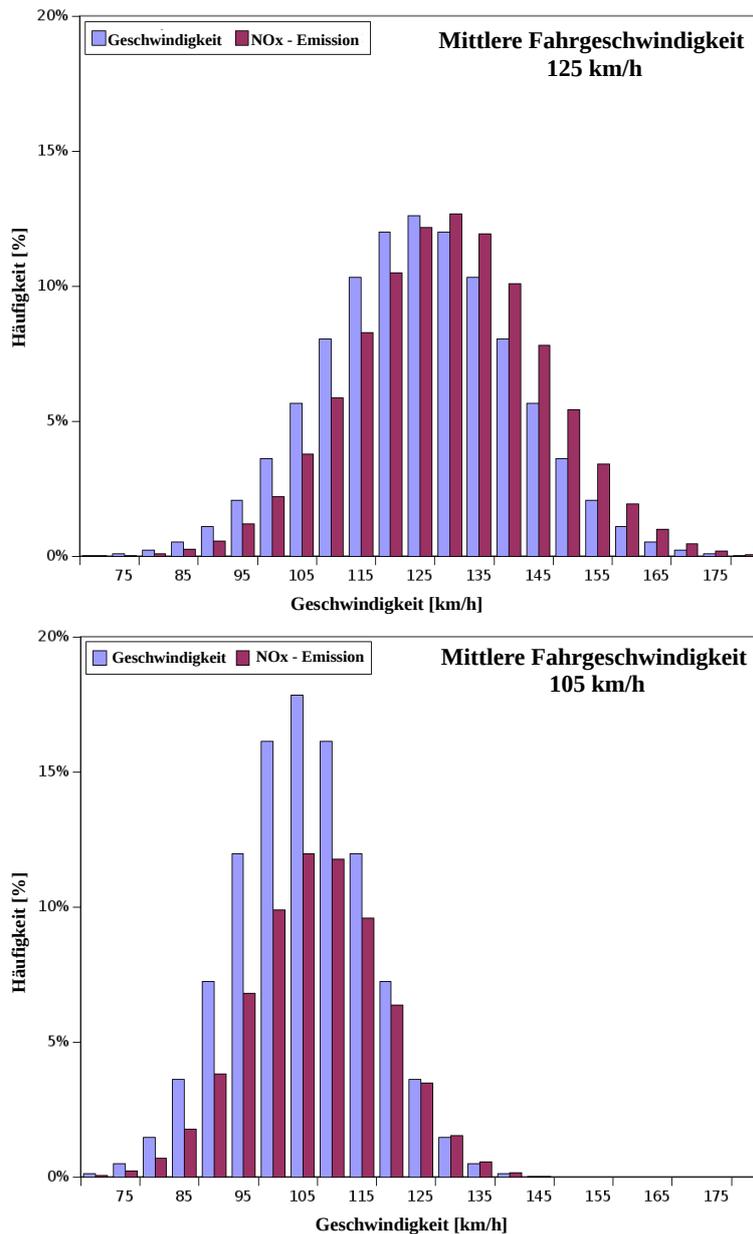


Abb. 13: Verteilung der Häufigkeit der Geschwindigkeiten für Pkw und deren erzeugten Emissionen. Der obere Abschnitt bezieht sich auf eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 125 km/h (Testphase nicht aktiviert); der untere auf eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 105 km/h (aktive Testphase)

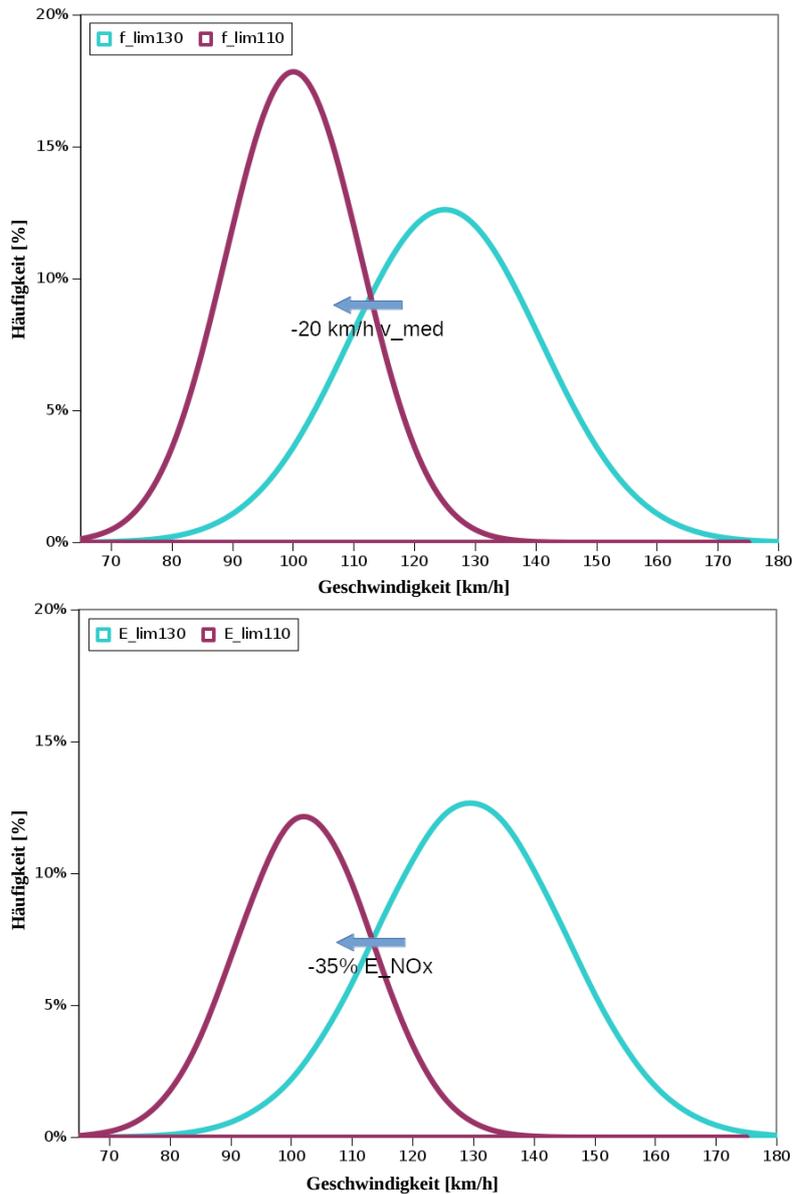


Abb. 14: Verteilung der Häufigkeit der Geschwindigkeit von Pkw für zwei hypothetische Fälle mit Geschwindigkeiten von 130km/h und 110km/h und den entsprechenden Emissionen. Der obere Abschnitt bezieht sich auf die Geschwindigkeit, der untere auf die Konzentrationen.

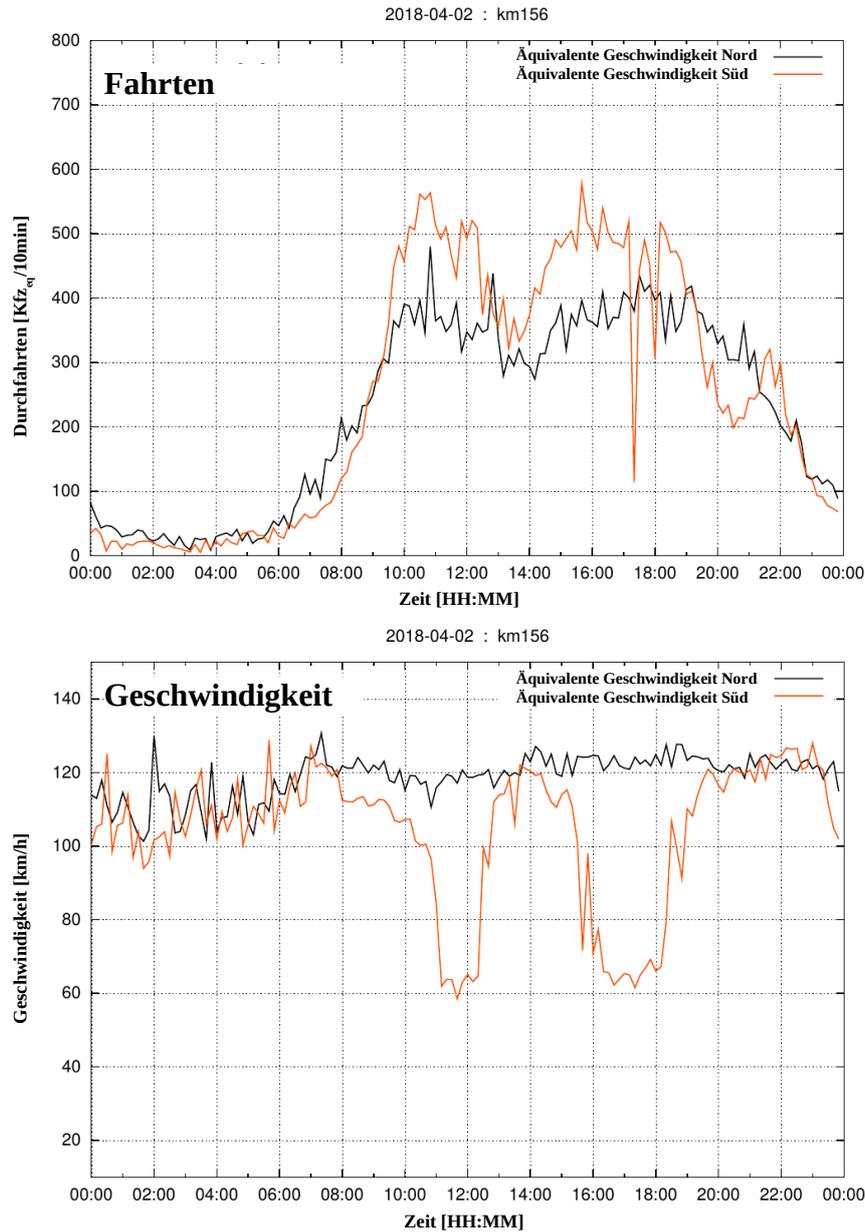


Abb. 15: Zeitliche Entwicklung der äquivalenten Fahrzeuge (oberer Abschnitt) und der standardisierten Geschwindigkeit (unterer Abschnitt) an einem Tag, gemessen an der Induktionsschleife bei km 156.

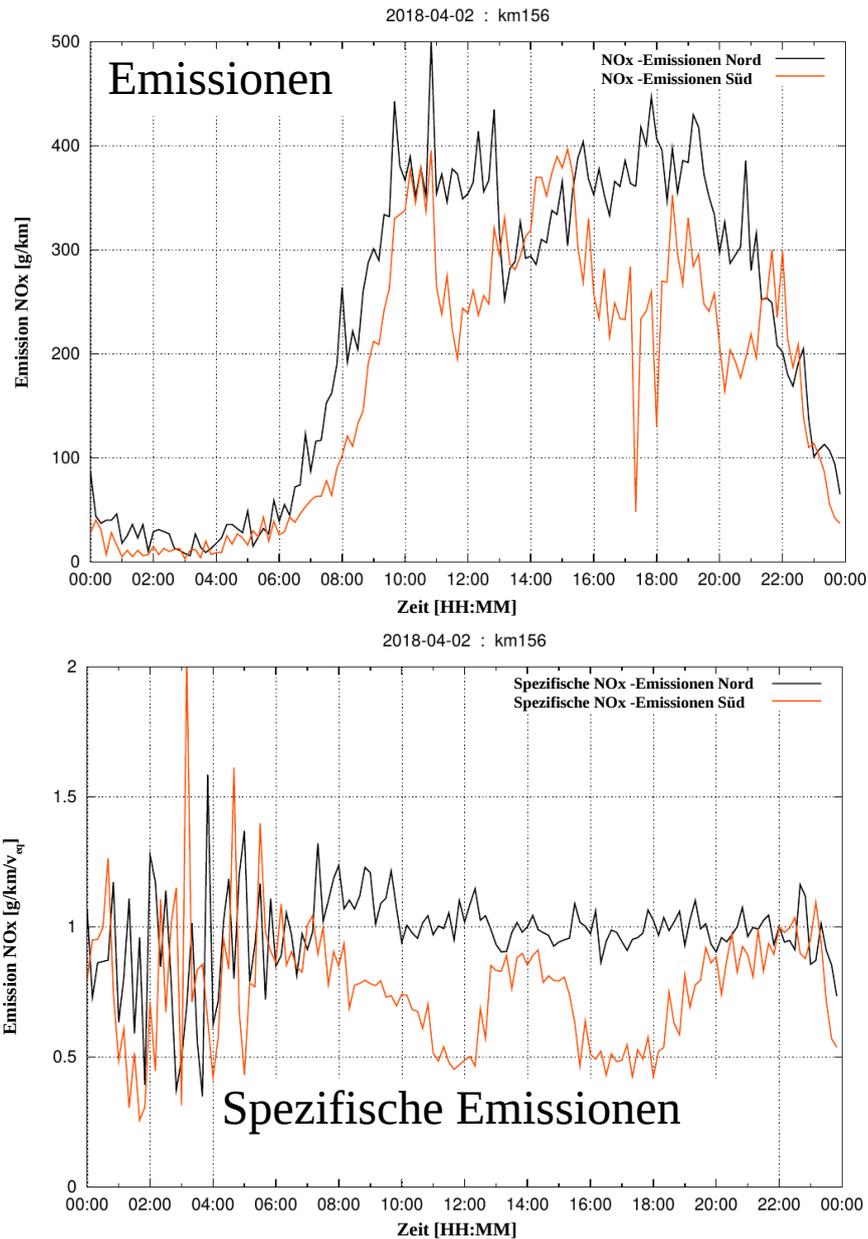


Abb. 16: Zeitliche Entwicklung der gesamten Emissionen (oberer Abschnitt) und der spezifischen Emissionen (unterer Abschnitt) an einem Tag, von Messdaten ausgehend berechnet.



3. Beurteilung der Auswirkungen der dynamischen Tempolimits für verkehrstechnische Zwecke (Ansatz)

Die zur Verfügung gestellten Daten erlauben es interessante verkehrstechnische Beurteilungen der Autobahn anzustellen. Die Kapazität der Straße hängt von drei Hauptfaktoren ab: der Fahrgeschwindigkeit, der Verkehrsdichte und der Verkehrsstärke. Diese drei Messgrößen können paarweise miteinander verglichen werden und sind in den Abb. 17, 18 und 19 dargestellt. Diese Kurven sind charakteristisch für den untersuchten Straßenabschnitt und hängen von der Geometrie der Straße und der Art des Durchgangsverkehr ab. Der synthetische Indikator der diese Informationen zusammenfasst wird als „Level of Service“ bezeichnet: dieser Indikator kann den Wert A annehmen, welcher sich durch einen freien Durchgangsverkehr charakterisiert und sich bis F fortsetzen, welcher sich auf einen Verkehrsfluss mit Stop&go - Bedingungen bezieht.

Die Untersuchung der Kurve Verkehrsstärke – Geschwindigkeit (Q-v), erlaubt es insbesondere folgendes zu schlussfolgern:

- es gibt eine optimale Fahrgeschwindigkeit, bei der die Straße eine maximale Verkehrsstärke/Kapazität aufweist;
- für die Abschnitte der A22 ist die optimale Geschwindigkeit bei 80 km/h mit einer Verkehrsstärke von 3.400 Fahrzeugen/h und Fahrstreifen;
- der optimale Anteil auf der Ebene Q-v, für die Funktionsfähigkeit aus verkehrstechnischer Sicht, ist jener oben rechts bezogen auf das Maximum der Kurve, in welchen man hohe Geschwindigkeiten und Kapazitäten verzeichnet
- die Optimierung des Verkehrs erfolgt durch eine nach rechts, oder gegen höhere Geschwindigkeiten gerichtete Verschiebung der Kurve der Verkehrsstärke in Funktion der Geschwindigkeit.

In der Abbildung 20 sind die interpolierten Kurven anhand der Messdaten der aktivierten Tempolimits im Abschnitt BLEC-ENV (Trient Süd – Rovereto Süd) in Verkehrskonditionen mit „Plaketten“ dargestellt: in rot die Testkurven mit Q_{\max} unter 2500 [Kfz_{eq}/h], in gelb die Testkurven mit Q_{\max} zwischen 2500 und 3000 [Kfz_{eq}/h] und in grün Q_{\max} höher als 3000 [Kfz_{eq}/h]. Die Punkte der Abb. 20 stellen die gemessenen Daten dar, welche sich entlang der Kurven anordnen und sich



bei aktiven Testphasen nach rechts verschoben, dadurch wird das Wirkungspotential dieser Maßnahme bewiesen.

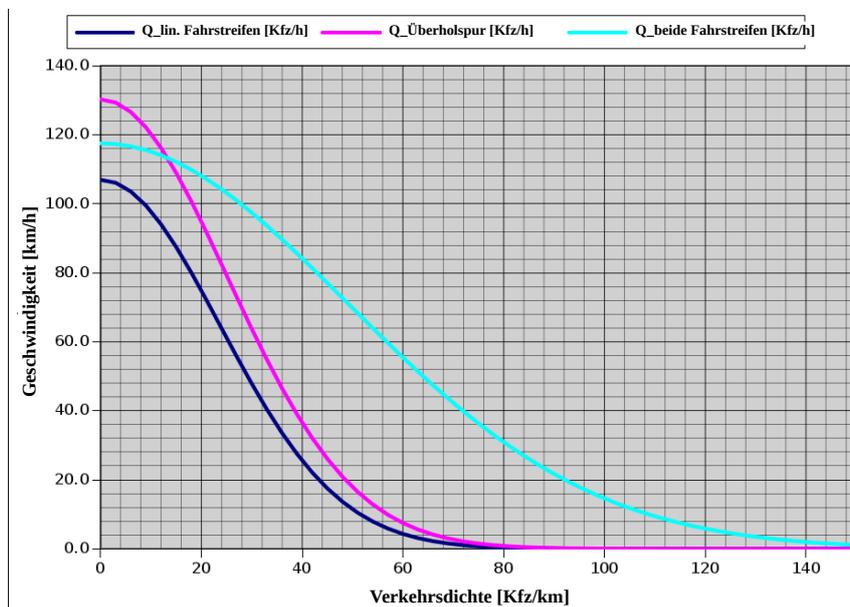


Abb. 17: Charakteristische Kurve der untersuchten Querschnitte auf der A22.

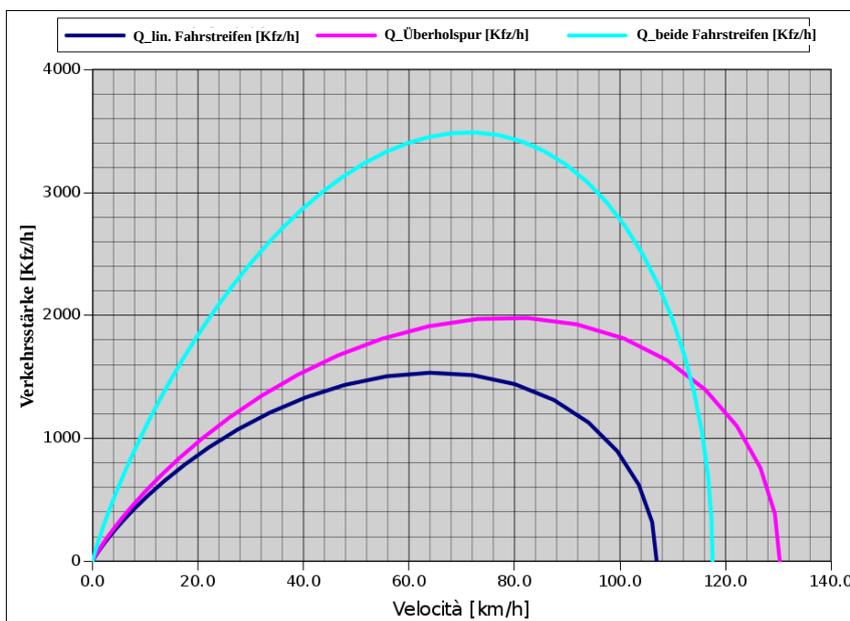


Abb. 18: Charakteristische Kurve Geschwindigkeit - Verkehrsstärke der untersuchten Querschnitte auf der A22.

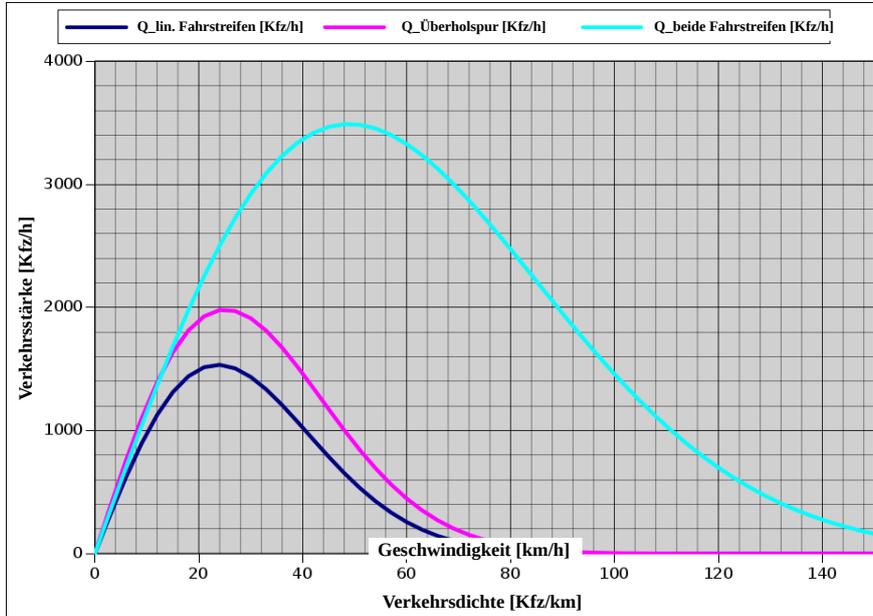


Abb. 19: Charakteristische Kurve Verkehrsdichte - Verkehrsstärke der untersuchten Querschnitte auf der A22.

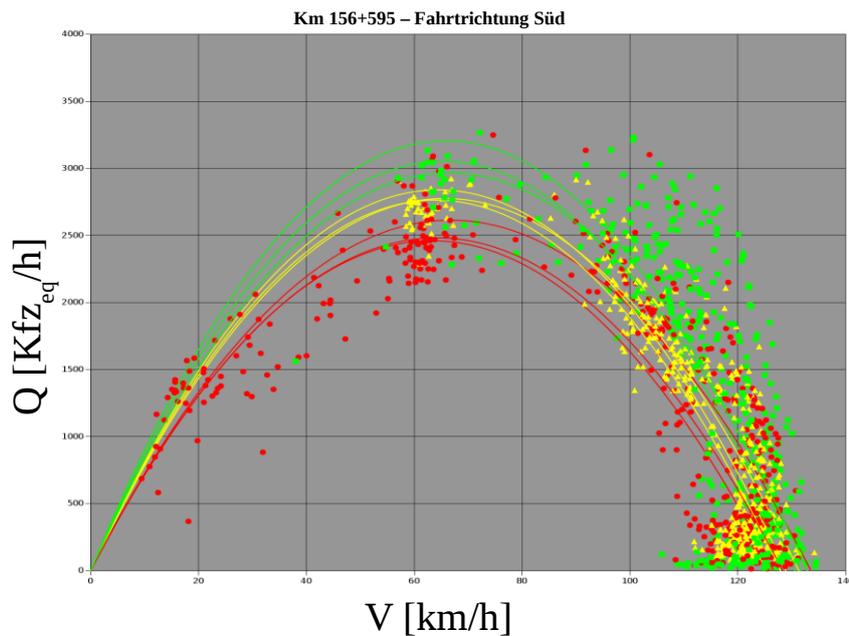


Abb. 20: Charakteristische Kurve Verkehrsstärke - Geschwindigkeit bei Kilometer 156 und Messung der Daten in verschiedenen Verkehrsbedingungen.