

GROLIMUND + PARTNER AG
UMWELTECHNIK + BAUPHYSIK + INFORMATIK
LIMMATSTRASSE 31 + 8005 ZÜRICH
T 043 366 60 60
WWW.GROLIMUND-PARTNER.CH
ZUERICH@GROLIMUND-PARTNER.CH



BERICHT

WEITERFÜHRENDE AUSWERTUNGEN UND ANALYSEN ZU LÄRMEMISSIONEN IM NIEDRIGEN GESCHWINDIGKEITSBEREICH

Ihre Kontaktperson: Erik Bühlmann
erik.buehlmann@grolimund-partner.ch
T 031 356 20 06

I:\A4821\BERICHT\ber20160830_Weiterführende_Auswertungen_und_Analysen_zu_Lärmemissionen_im_niedrigen_Geschwindigkeitsbereich.docx

Stadt Zürich, Umwelt - und Gesundheitsschutz
A4821
13. April 2017

IMPRESSUM

PROJEKTTEAM

- + Sebastian Egger
- + Erik Bühlmann
- + Emanuel Hammer

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.0	16.06.2016	Sebastian Egger	Entwurf als Anhang im Forschungsbericht	VSS-Begleitkommission
V 2.0	19.01.2017	Sebastian Egger	Version 2.0	Stadt Zürich
V 3.0	13.04.2017	Sebastian Egger	Abgabeverision	Stadt Zürich

INHALT

1.	AUFTRAG	4
1.1	Ausgangslage & Projektkontext	4
1.2	Projektziele	4
2.	METHODEN	5
2.1	Untersuchungskonzept	5
2.2	Messaufbau & Durchführung der Messungen	5
2.3	Datenaufbereitung & -auswertung	7
3.	ERGEBNISSE	9
3.1	Konstante Fahrweise	9
3.2	Beschleunigende Fahrweise	11
4.	SCHLUSSFOLGERUNGEN	14
	ANHANG	
1	Fahrzeugpark	16
2	Konstantes Fahrverhalten bei 30 und 50 km/h	17
3	Konstantes vs. beschleunigtes Fahrverhalten bei Tempo 30	21
4	Vorbeifahrten bei konstantem Fahrverhalten	25
5	Mittlere Lärmpegel bei beschleunigendem Fahrverhalten	29
6	Mittlere Lärmpegel bei konstantem Fahrverhalten	30

1. AUFTRAG

1.1 AUSGANGSLAGE & PROJEKTKONTEXT

Im Auftrag der Stadt Zürich wurden weiterführende Auswertungen und Analysen der im Rahmen des Forschungsprojekts VSS 2012/214 durchgeführten Emissionsmessungen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich vorgenommen. Durch eine spezifische Auswertung der Lärmemissionen von Fahrzeugen mit unterschiedlicher Motorisierung bei konstanter und beschleunigender Fahrweise sollen zusätzliche Erkenntnisse zum Einfluss von Personenwagen auf die Lärmwirkung bei Geschwindigkeitsreduktionen gewonnen werden.

1.2 PROJEKTZIELE

Durch eine fahrzeugspezifische Auswertung der Vorbeifahrtsmessungen sollen zusätzliche Erkenntnisse zur Lärmwirkung von Personenwagen bei unterschiedlichem Fahrverhalten in Tempo 30 Situationen gewonnen werden. Zu diesem Zweck werden die Vorbeifahrtsszenarien bei konstanter Geschwindigkeit sowie die Beschleunigungsszenarien detailliert untersucht und antriebsartspezifisch (Diesel, Benzin, Hybrid, Elektro) ausgewertet. Ein spezieller Fokus richtet sich dabei auf den Vergleich zwischen stetigen bzw. konstanten Vorbeifahrten mit 30 km/h, typischen Beschleunigungsereignissen in Tempo 30 Situationen und stetigen Vorbeifahrten mit 50 km/h.

2. METHODEN

2.1 UNTERSUCHUNGSKONZEPT

Die Datenerhebung wurde im Rahmen des Forschungsprojekts VSS 2012/214 "Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30" am 22 April 2015 auf dem Testgelände des Dynamic Test Centers in Vauffelin (BE) durchgeführt. Die Erhebungen umfassten Gesamt-, Antriebs- und Rollgeräuschmessungen von 22, für den Schweizer Fahrzeugpark repräsentativen Fahrzeugen für 18 unterschiedliche Szenarien. Das Testgelände ist im Bereich der Messfahrten mit einem Standard-Asphaltbelag (AC 11) ausgestattet.

Der Abschlussbericht zum VSS-Projekt 2012/214 "Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30" umfasst eine detaillierte Beschreibung des Untersuchungskonzeptes und der Messmethoden. Um die Vollständigkeit dieses eigenständigen Berichts zu gewährleisten, sind die wichtigsten Messmethoden aus dem VSS-Projekt 2012/214 nachfolgend zusammengefasst. Der Fokus der vorliegenden Untersuchung richtet sich auf die durchgeführten Vorbeifahrtmessungen bei konstantem und beschleunigendem Fahrverhalten. Tabelle 1 umfasst eine Übersicht der durchgeführten Vorbeifahrtsszenarien. Eine tabellarische Übersicht zum beurteilten Fahrzeugpark ist in Anhang 1 aufgeführt (entnommen aus Forschungsbericht VSS 2012/214).

Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Vorbeifahrtsszenarien

Geschwindigkeit [km/h]	Gang	Bezeichnung Beschleunigungsstil	Bezeichnung Fahrweise
20	1, 2	-	konstant
30	1, 2, 3	-	konstant
40	2, 3	-	konstant
50	2, 3, 4	-	konstant
0 auf 30	1 auf 2	aggressiv	mit Anhalten
0 auf 30	1 auf 2	vorausblickend	mit Anhalten
25 auf 35	2 auf 3	aggressiv	unstetig
25 auf 35	3	vorausblickend	Unstetig

2.2 MESSAUFBAU & DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

Die Vorbeifahrtmessungen wurden in Anlehnung an die Normen UNECE R117 und ISO 11819-1 durchgeführt. Detaillierte Angaben zu den Messsetups sind dem Forschungsbericht des Forschungsprojekts VSS 2012/214 zu entnehmen. Die nachfolgenden Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 stützen sich auf den Forschungsbericht und beschreiben kurz die wichtigsten Details zum Messaufbau und zur Messmethodik.

2.2.1 MESSUNGEN BEI BESCHLEUNIGENDEM FAHRVERHALTEN

Die Messungen bei beschleunigendem Fahrverhalten werden mit der Acceleration pass-by Methode durchgeführt. Sie dienen der Erhebung der Geräuschemission entweder bei vollständigem Abbremsen, Anhalten und dem darauffolgenden Beschleunigungsvorgang, beispielsweise aufgrund einer baulichen Massnahme in einer Tempo 30 Zone oder bei un stetiger Fahrweise, welche häufig bei unübersichtlichen Rechtsvortritten oder bei Vertikalversätzen zu beobachten

ist. Um das Fahrverhalten unterschiedlicher Fahrertypen abzubilden, werden beide Szenarien jeweils in zwei Varianten, einer aggressiven und einer voraussichtlichen Fahrweise erhoben. Die Messstrecke ist aus einer Sequenz von fünf aufeinanderfolgenden und sich teilweise überlappenden Messzonen à 20 m zusammengesetzt, um die unterschiedlichen Phasen des Beschleunigungsvorgangs sowie den Schaltvorgang ganzheitlich zu erfassen. Jede Messzone ist mit einem separaten Mikrofonpaar ausgestattet, welches über einen Messabschnitt von 20 m die Geräuschemission beidseitig der Fahrbahn separat erfasst. Messzonen können einander überlappen. In der Mitte jeder Messzone sind lotrecht zur Vorbeifahrtsachse und in 1.2 m Höhe zwei Mikrofone (mit Windschutz) mit zugehörigen Schallpegelmessgeräten aufgestellt, die in einer Distanz von 7.5 m zur Fahrbahnachse den Schallpegel messen. Ein Geschwindigkeitsradar misst die Geschwindigkeit auf Höhe des Übergangsbereichs zwischen den Mikrofonpaaren 5+6 und 7+8 (siehe Abbildung 1).

Um die Lärmemissionen von Auspuff und Motor beim Start des Beschleunigungsvorgangs möglichst präzise zu erfassen, werden die Beschleunigungsszenarien nach Anhalten für jedes Fahrzeug zwischen den Mikrofonpositionen 1 und 4 gestartet (siehe Abbildung 1). Die Schallemissionen des restlichen Beschleunigungsvorgangs und des Schaltvorgangs werden dann mithilfe der Mikrofonpositionen 5 bis 10 kontinuierlich gemessen. Es fließen die Daten aller 10 Mikrofone in die Auswertung des beschleunigenden Fahrverhaltens ein.

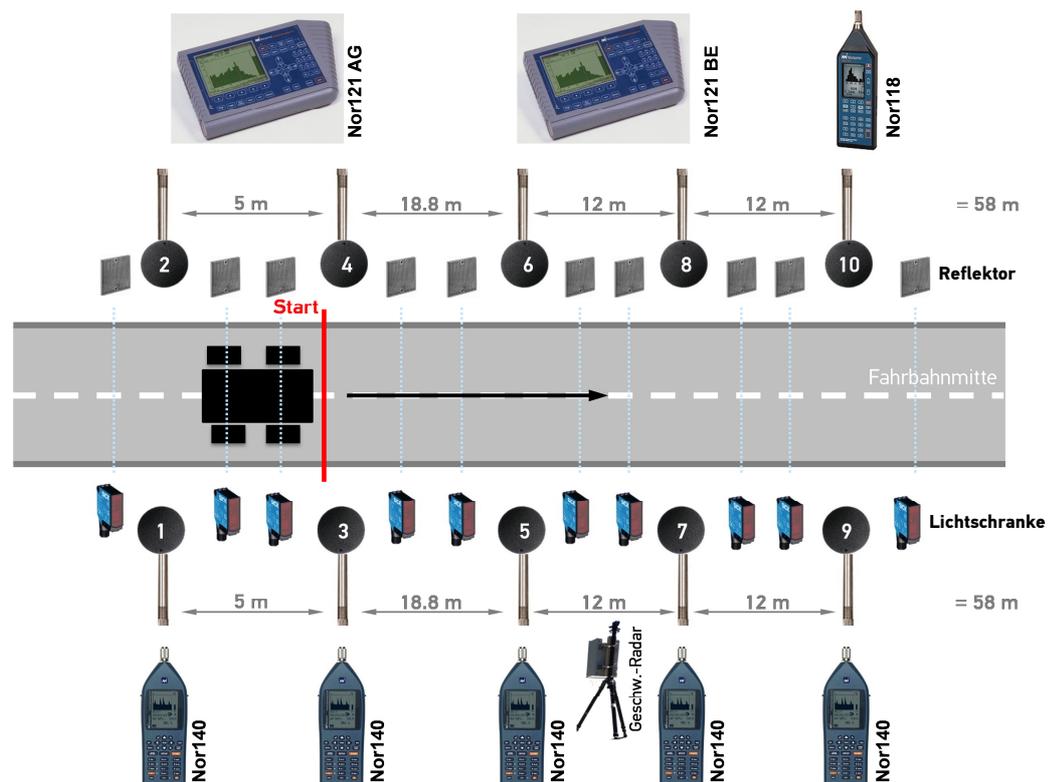


Abbildung 1: Schematischer Messaufbau bei den Emissionsmessungen bei beschleunigendem Fahrverhalten (Abbildung aus dem Forschungsbericht VSS 2012/214).

2.2.2 MESSUNGEN BEI KONSTANTEM FAHRVERHALTEN

Für die Erhebung des Gesamtgeräusches der Fahrzeuge bei konstanter Vorbeifahrt wird die Controlled pass-by Methode verwendet. Das Fahrzeug wird auf einer Beschleunigungsstrecke auf eine vorgegebene konstante Geschwindigkeit beschleunigt. Die Messzone wird mit dieser konstanten Geschwindigkeit durchquert, wobei das Gesamtgeräusch (Rollgeräusch und An-

triebsgeräusch) der Vorbeifahrt über eine Strecke von 20 m am Mikrofonpaar 7 und 8 gemessen wird. Das Messsetup an den Mikrofonpositionen 7 und 8 ist analog zur Beschleunigungsmessung (siehe Abschnitt 2.2.1). Die Geschwindigkeit wird kurz vor Einfahrt in die Zone mit einem Geschwindigkeitsradar gemessen. Der Messaufbau ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

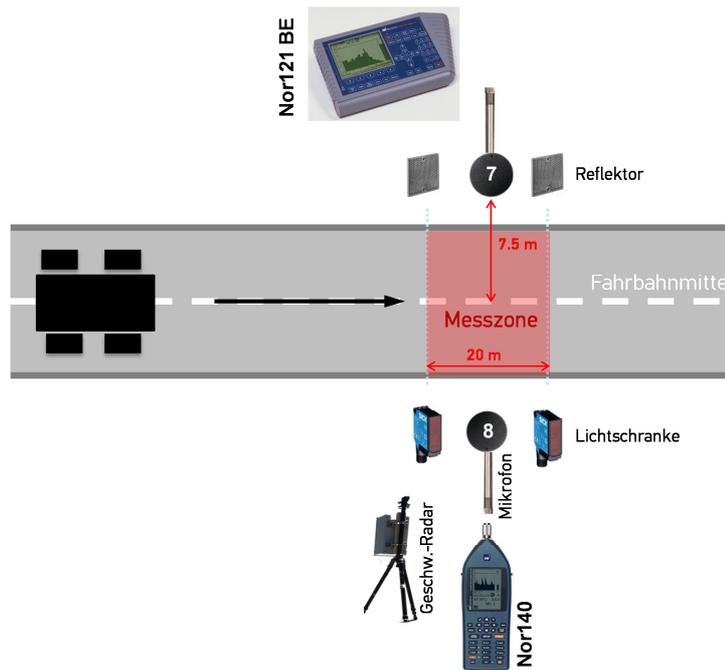


Abbildung 2: Messaufbau bei den Emissionsmessungen mit konstantem Fahrverhalten (Controlled Pass-by Messungen). Gemessen wurde an den Mikrofonpositionen 7 und 8 eines komplexeren Aufbaus mit insgesamt zehn Mikrofonen (Abbildung aus dem Forschungsbericht VSS 2012/214).

2.3 DATENAUFBEREITUNG & -AUSWERTUNG

Vorbeifahrtspegel: Für die Beurteilung der gemessenen Vorbeifahrten wird der Maximalpegel (L_{max}) ausgewertet, welcher während der Durchfahrt der 20m-Messzone aufgezeichnet und mithilfe von NorReview 5.1 ausgewertet wurde. Je nach Vorbeifahrtsszenario variieren die herbeigezogenen Mikrofonpositionen zur Bestimmung des L_{max} . Für die Vorbeifahrten bei konstanter Geschwindigkeit wurden der L_{max} der gegenüberliegenden Mikrofonpositionen 7 und 8 energetisch zu einem Vorbeifahrtspegel gemittelt. Für die Beschleunigungsszenarien wurde der L_{max} aller zehn Mikrofonpositionen energetisch zu einem Kennwert gemittelt. Der Leq in 7.5 m Abstand zur Quelle wurde mithilfe der bereits im Forschungsbericht VSS 2012/24 verwendeten Umrechnungsformel gemäss Heutschi (2004) bestimmt:

$$Leq_{1Fz/h,A} = L_{max,7.5m,A} - 10 \cdot \log(v) - 10 \cdot \log(d) - 7.5$$

mit $L_{max,7.5m,A}$ maximaler A-bewerteter Vorbeifahrtpegel in 7.5 m Abstand [dB(A)], v Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h] und d Abstand Empfänger - Fahrspur [m]. In den Anhängen 5 und 6 sind die mittleren Vorbeifahrtspegel für die vier Antriebsarten (Diesel, Benzin, Hybrid, Elektro) und die verschiedenen Szenarien tabellarisch ausgewiesen.

Vorbeifahrtsdiagramme: In den Anhängen 2 und 3 sind die Pegelverläufe jeweils eines repräsentativen Fahrzeugs aus dem Forschungsprojekt VSS 2012/214 für die vier Antriebsarten (Diesel, Benzin, Hybrid, Elektro) bei konstanter Fahrweise und beschleunigender Fahrweise

dargestellt. Die Diagramme zeigen den Pegelverlauf als energetisches Mittel der, an den Mikrofonpositionen 7 und 8 in 7.5m Distanz zur Quelle gemessenen Emissionspegel. Die repräsentativen Fahrzeuge für den jeweiligen Antriebstyp wurden anhand vollständiger und störungsfreier Pegelverläufe ausgewählt und sind in Anhang 1 tabellarisch aufgelistet.

Strassenbelag: Wie im Forschungsbericht des VSS Projekts 2012/214 ausführlich beschrieben, handelt es sich bei dem Belag auf dem Testgelände in Vauffelin um einen neuen AC 11 Belag. Solche Beläge werden häufig im Strassenbau eingesetzt. Auf einem Testgelände ist allerdings die mechanische Beanspruchung sehr gering, weshalb das Rollgeräusch auf diesem Belag viel tiefer liegt als üblich. Dies ist bei der Interpretation zu berücksichtigen. Sollten die in den Anhängen 5 und 6 ausgewiesenen Werte mit anderen Studien verglichen werden, ist dieser Tatsache mithilfe der Angaben im Forschungsbericht VSS 2012/214 unbedingt Rechnung zu tragen.

3. ERGEBNISSE

3.1 KONSTANTE FAHRWEISE

Die konstante Fahrweise entspricht dem Fahrverhalten bei konstanter Geschwindigkeit und konstanter Gangwahl. In Tabelle 2 sind die gemessenen Vorbeifahrtspegel (LEQ) bei konstanter Vorbeifahrt nach Antriebsart (Diesel, Benzin, Hybrid, Elektro) arithmetisch gemittelt und jeweils der Grösse nach absteigend aufgelistet.

Tabelle 2: Jeweils nach der Grösse absteigend geordnete, mittlere LEQ in dB(A) bei konstanter Vorbeifahrt für die vier Antriebsklassen (Diesel-, Benzin-, Hybrid und Elektroantrieb) in 7.5 m Abstand zur Quelle.

Diesel*			Benzin			Hybrid			Elektro**	
Gang	Geschw. [km/h]	LEQ _{MW} [dB(A)]	Gang	Geschw. [km/h]	LEQ _{MW} [dB(A)]	Gang	Geschw. [km/h]	LEQ _{MW} [dB(A)]	Geschw. [km/h]	LEQ _{MW} [dB(A)]
1	30	39.0	1	30	36.0	2	50	32.2	50	31.4
2	50	36.6	2	50	35.3	3	50	32.1		
2	40	34.1	3	50	33.1	4	50	31.6		
1	20	33.9	2	40	32.7	2	40	30.0	40	28.5
3	50	33.8	4	50	32.4	3	40	29.5		
4	50	33.2	1	20	31.5	1	30	29.4	30	26.7
3	40	31.5	3	40	30.9	2	30	27.3		
2	30	31.3	2	30	29.9	3	30	27.1		
3	30	28.8	3	30	27.9	1	20	26.3	20	23.9
2	20	28.3	2	20	27.0	2	20	25.0		

* Der Lieferwagen mit Dieselantrieb wurde von der Analyse ausgeschlossen.

** Die spezifische Gangwahl war bei den gemessenen Fahrzeugen mit Elektroantrieb nicht möglich. Der LEQ_{MW} ist für Elektrofahrzeuge daher als arithmetisches Mittel aller Szenarien bei der entsprechenden Geschwindigkeit aufgeführt.

Kommentar und Interpretation

- + Bei gleicher Gangwahl und Geschwindigkeit gilt $LEQ_{\text{Diesel}} > LEQ_{\text{Benzin}} > LEQ_{\text{Hybrid}} > LEQ_{\text{Elektro}}$
- + Die gemessenen Benzin- und Dieselfahrzeuge zeigen insbesondere bei tieferen Gängen z.T. deutlich höhere Lärmpegel als Fahrzeuge mit Elektro- oder Hybridantrieb. Bei höheren Gängen sind diese Differenzen erwartungsgemäss kleiner.
- + Im Mittel sind die gemessenen ...
 - ... Benzinfahrzeuge ca. 1.5 dB leiser als die Dieselfahrzeuge
 - ... Hybridfahrzeuge ca. 4 dB leiser als die Dieselfahrzeuge
 - ... Elektrofahrzeuge ca. 5 dB leiser als die Dieselfahrzeuge
- + Typische Vorbeifahrten bei 30 km/h im 3. Gang sind nahezu unabhängig vom Fahrzeugtyp ca. 4.5 dB leiser als typische Vorbeifahrten bei 50 km/h im 4. Gang. Selbst eher hochtourige Vorbeifahrten bei 30 km/h im 2. Gang sind leiser als typische Vorbeifahrten bei 50 km/h im 4. Gang. (Dieselfahrzeuge ca. 2 dB, Benzinfahrzeuge ca. 2.5 dB und Hybridfahrzeuge ca. 4.5 dB)
- + Extreme Vorbeifahrten bei 30 km/h im 1. Gang zeigen für Dieselfahrzeuge ca. 2.5 dB höhere Vorbeifahrtspegel wie extreme Vorbeifahrten bei 50 km/h im 2. Gang. Benzinfahrzeuge emittieren bei 30 km/h im 1. Gang ca. 0.5 dB mehr Lärm als bei 50 km/h im 2. Gang. Hybridfahrzeuge wurden hingegen ca. 3 dB leiser gemessen.

- + Für Benzin- und Dieselfahrzeuge bei Tempo 20 im 2. Gang (z.B. in Begegnungszonen) zeigen sich Pegelreduktionspotentiale von ca. 0.5 bis 1 dB gegenüber Tempo 30 Situationen, in denen typischerweise im 3. Gang gefahren wird. Bei Hybrid- und Elektrofahrzeugen beträgt dieses Potential ca. 2 bzw. 3 dB.

Lärmmessungen zeigen immer wieder, dass die Lärmwirkung in unterschiedlichen Situationen trotz gleicher Geschwindigkeitssignalisation unterschiedlich ausfallen kann. Das Fahrverhalten der Fahrzeugfahrer ist dabei ausschlaggebend. Im G+P Bericht (2016) "Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30" für die Stadt Zürich, wurde das Fahrverhalten in unterschiedlichen Tempo 30 Situationen bei über 1'800 Fahrzeugen bewertet und statistisch ausgewertet. In Tabelle 3 und Tabelle 4 werden die dort ermittelten Anteile zum Fahrverhalten herbeigezogen und anteilig zu einem Emissionspegel LEQ_{Stat} unter Berücksichtigung der Statistik energetisch gemittelt. Tabelle 5 beinhaltet einen Vergleich der Emissionspegel bei signalisiertem Tempo 30 und Tempo 50.

Tabelle 3: Vorbeifahrtspegel bei signalisiertem Tempo 30 unter Berücksichtigung des statistischen Anteils gemäss Bericht G+P (2016): "Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30" im Auftrag der Stadt Zürich.

Szenario			statistischer Anteil*	Diesel** LEQ_{MW} [dB(A)]	Benzin LEQ_{MW} [dB(A)]	Hybrid LEQ_{MW} [dB(A)]	Elektro*** LEQ_{MW} [dB(A)]
stetig	2. Gang	30 km/h	14%	31.3	29.9	27.3	26.7
stetig	3. Gang	30 km/h	86%	28.8	27.9	27.1	
LEQ_{Stat} Tempo 30 gemäss stat. Anteilen				29.1	28.2	27.1	26.7
ΔLEQ_{Stat} zu Diesel				0.0	-0.9	-2.0	-2.4

* Zur Berechnung der statistischen Anteile, blieben der 1. Gang und der 4. Gang unberücksichtigt (d.h. die Anteile des 2. und 3. Gangs ergeben 100%).

** Der Lieferwagen mit Dieselantrieb wurde von der Analyse ausgeschlossen.

*** Die spezifische Gangwahl war bei den gemessenen Fahrzeugen mit Elektroantrieb nicht möglich. Der LEQ_{MW} ist für Elektrofahrzeuge daher als arithmetisches Mittel aller Szenarien bei der entsprechenden Geschwindigkeit aufgeführt.

Tabelle 4: Vorbeifahrtspegel bei signalisiertem Tempo 50 unter Berücksichtigung des statistischen Anteils gemäss Bericht G+P (2016): "Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30" im Auftrag der Stadt Zürich.

Szenario			statistischer Anteil*	Diesel** LEQ_{MW} [dB(A)]	Benzin LEQ_{MW} [dB(A)]	Hybrid LEQ_{MW} [dB(A)]	Elektro*** LEQ_{MW} [dB(A)]
stetig	3. Gang	50 km/h	13%	33.8	33.1	32.1	31.4
stetig	4. Gang	50 km/h	87%	33.2	32.4	31.6	
LEQ_{Stat} Tempo 50 gemäss stat. Anteilen				33.2	32.5	31.7	31.4
ΔLEQ_{Stat} zu Diesel				0.0	-0.8	-1.5	-1.8

* Zur Berechnung der statistischen Anteile, blieben der 1., 2. Gang und 5. Gang unberücksichtigt (d.h. die Anteile des 3. und 4. Gangs ergeben 100%).

** Der Lieferwagen mit Dieselantrieb wurde von der Analyse ausgeschlossen.

*** Die spezifische Gangwahl war bei den gemessenen Fahrzeugen mit Elektroantrieb nicht möglich. Der LEQ_{MW} ist für Elektrofahrzeuge daher als arithmetisches Mittel aller Szenarien bei der entsprechenden Geschwindigkeit aufgeführt.

Tabelle 5: Vergleich der Vorbeifahrtspegel bei signalisiertem Tempo 30 und signalisiertem Tempo 50 unter Berücksichtigung des statistischen Anteils gemäss Bericht G+P (2016): "Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30" im Auftrag der Stadt Zürich.

Signalisierte Ge- schwindigkeit	Diesel	Benzin	Hybrid	Elektro
	LEQ _{Stat} [dB(A)]	LEQ _{Stat} [dB(A)]	LEQ _{Stat} [dB(A)]	LEQ _{Stat} [dB(A)]
Tempo 50	33.2	32.5	31.7	31.4
Tempo 30	29.1	28.2	27.1	26.7
Δ LEQ _{Stat}	-4.1	-4.3	-4.6	-4.8

Kommentar und Interpretation

- + Unter Berücksichtigung der statistischen Anteile zum Fahrverhalten ergeben sich bei konstanter Fahrt in Tempo 30 Situationen für Benzinfahrzeuge ca. 1 dB leisere, für Hybridfahrzeuge ca. 2 dB leisere und für Elektrofahrzeuge ca. 2.5 dB leisere Emissionspegel als bei Dieselfahrzeugen.
- + In Tempo 50 Situationen sind die Pegelunterschiede zwischen den Antriebsarten nur geringfügig kleiner als in Tempo 30 Situationen (Pegelunterschiede < 0.5 dB), d.h. Benzinfahrzeuge ca. 1 dB leiser, Hybridfahrzeuge ca. 1.5 dB leiser und Elektrofahrzeuge ca. 2 dB leiser als Dieselfahrzeuge).
- + Unter Annahme einer ausschliesslich konstanten Fahrweise wären Diesel- und Benzinfahrzeuge bei 30 km/h ca. 4 dB leiser und Hybrid- und Elektrofahrzeuge knapp 5 dB leiser unterwegs als bei 50 km/h.

3.2 BESCHLEUNIGENDE FAHRWEISE

3.2.1 SZENARIOS VSS 2012/214

Die beschleunigende Fahrweise bezeichnet das Fahrverhalten von Fahrzeugen während des Beschleunigungsvorgangs. Eine statistische Erhebung an fünf Strassenquerschnitten mit signalisiertem Tempo 30 (G+P (2016) „Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30“) hat gezeigt, dass mehr als 80% der Fahrer in Tempo 30 Situationen mit konstantem Fahrverhalten verkehren. Beschleunigungsereignisse traten jeweils zur knappen Hälfte vorausblickend oder sportlich auf. Aggressives Fahrverhalten wurde bei weniger als 2 % der Fahrer festgestellt. Bei begleitenden baulichen Massnahmen zur Sicherung der Geschwindigkeitsreduktion treten solche vorausblickenden Beschleunigungen nach oder kurz vor dem Anhalten verstärkt auf. Nachfolgend wird daher ein Vergleich zwischen der mittleren vorausblickend beschleunigten Fahrt nach Anhalten (Referenz) mit stetigen Vorbeifahrten bei Tempo 30 und Tempo 50 sowie mit aggressiven Beschleunigungen nach Anhalten und bei un-stetiger Fahrt gezogen (siehe Tabelle 6). Die Pegeldifferenz ($\Delta_{L_{max}}$) des jeweiligen Szenarios zur mittleren vorausblickend beschleunigten Fahrt ist mit einem Zahlenwert und einem farbigen Balken ausgewiesen.

Tabelle 6: Lärmemissionen einer mittleren vorausblickend beschleunigten Fahrt im Vergleich zu stetigen Vorbeifahrten bei 30 und 50 km/h, sowie zu aggressivem Beschleunigen und nach unstetiger Fahrt. Die Pegeldifferenz ($\Delta_{L_{max}}$) des jeweiligen Szenarios zur mittleren vorausblickend beschleunigten Fahrt (Referenz) ist jeweils mit einem Zahlenwert und einem farbigen Balken ausgewiesen.

Szenario	Diesel*		Benzin		Hybrid		Elektro**	
	$L_{max_{MW}}$ [dB(A)]	$\Delta_{L_{max}}$ [dB]	$L_{max_{MW}}$ [dB(A)]	$\Delta_{L_{max}}$ [dB]	$L_{max_{MW}}$ [dB(A)]	$\Delta_{L_{max}}$ [dB]	$L_{max_{MW}}$ [dB(A)]	$\Delta_{L_{max}}$ [dB]
Anhalten vorausblickend 0 auf 30 km/h (Referenz)	63.4		62.7		59.5		56.7	
Gegenüberstellung mit beschleunigenden Vorbeifahrten								
unstetig vorausblickend 25 auf 35 km/h	63.2	-0.2	62.0	-0.7	60.7	-1.2	58.0	-1.3
unstetig aggressiv 25 auf 35 km/h	65.8	+2.4	66.9	+4.2	63.7	+4.2	61.8	+5.1
Anhalten aggressiv 0 auf 30 km/h	69.6	+6.2	68.1	+5.4	64.4	+4.9	61.0	+4.3
Gegenüberstellung mit konstanter bzw. stetiger Vorbeifahrten bei 30 Km/h								
stetig 2. Gang 30 km/h	62.3	-1.1	60.9	-1.8	58.3	-1.2	57.7	-1.0
stetig 3. Gang 30 km/h	59.8	-3.6	58.9	-3.8	58.1	-1.4		
stetig statistisch 30 km/h	60.1	-3.3	59.2	-3.5	58.1	-1.4	57.7	-1.0
Gegenüberstellung mit konstanter bzw. stetiger Vorbeifahrten bei 50 Km/h								
stetig 3. Gang 50 km/h	67.0	+3.6	66.3	+3.6	65.3	+5.8	64.7	+8.0
stetig 4. Gang 50 km/h	66.4	+3.0	65.6	+2.9	64.9	+5.4		
stetig statistisch 50 km/h	66.5	+3.1	65.7	+3.0	64.9	+5.4	64.7	+8.0

* Der Lieferwagen mit Dieselantrieb wurde von der Analyse ausgeschlossen.

** Die spezifische Gangwahl war bei den gemessenen Fahrzeugen mit Elektroantrieb nicht möglich. Der LEQ_{MW} ist für Elektrofahrzeuge daher als arithmetisches Mittel aller Szenarien bei der entsprechenden Geschwindigkeit aufgeführt.

Gegenüberstellung mit beschleunigenden Vorbeifahrten

- + Bei einer vorausblickend beschleunigten Fahrt nach Anhalten entsprechen die mittleren gemessenen Maximalpegel für Diesel- und Benzinfahrzeuge ungefähr denjenigen einer vorausblickend unstetigen Fahrweise ($|\Delta_{LEQ}| \leq 0.7$ dB). Für Elektro- und Hybridfahrzeuge ergeben sich leicht grössere Differenzen, da hier die Auswirkung der gefahrenen Geschwindigkeit auf das Rollgeräusch aufgrund des wegfallenden Motorengeräusches alleinentscheidend ist.
- + Bei aggressivem Beschleunigen von 0 auf 30 km/h zeigen Diesel- und Benzinfahrzeuge durchschnittlich ca. 6 dB höhere und Hybrid- und Elektrofahrzeuge ca. 4.5 dB höhere Lärmemissionen als bei vorausblickender Beschleunigung nach Anhalten.

Gegenüberstellung mit konstanter Vorbeifahrt bei 30 km/h

- + Bei einer vorausblickend beschleunigten Fahrt von 0 auf 30 km/h ist der Maximalpegel für Diesel- und Benzinfahrzeuge in etwa 3.5 dB lauter als bei einer stetigen statistischen Vorbeifahrt bei 30 km/h. Hybridfahrzeuge sind ca. 1 dB leiser und Elektrofahrzeuge ca. 1 dB lauter.

Gegenüberstellung mit konstanter Vorbeifahrt bei 50 km/h

- + Mittlere stetige Vorbeifahrten bei 50 km/h im 3. und 4. Gang zeigen für Diesel- und Benzinfahrzeuge ca. 3 bis 3.5 dB, für Hybridfahrzeuge ca. 5.5 bis 6 dB und für Elektrofahrzeuge ca. 8 dB höhere Maximalpegel als bei einer vorausblickenden Beschleunigung auf 30 km/h nach Anhalten.
- + Bei einer statistischen Gewichtung von 3. und 4. Gang bei 50 km/h entsprächen die Maximalpegel ungefähr denjenigen bei einer Vorbeifahrt im 4. Gang.

Quervergleiche

- + Es zeigt sich, dass bei den Hybrid- und Elektrofahrzeugen bei allen erhobenen Beschleunigungsszenarien deutlich tiefere Maximalpegel auftreten als bei stetigen Vorbeifahrten mit Tempo 50.
- + Bei den Diesel- und Benzinfahrzeugen zeigt lediglich die aggressive Beschleunigung höhere Maximalpegel als bei einer stetigen Vorbeifahrt mit Tempo 50. Bei vorausblickender Beschleunigung von 0 auf 30 km/h liegen die Maximalpegel deutlich tiefer als bei einer stetigen Vorbeifahrt mit Tempo 50.
- + Bei den vorausblickend beschleunigten Vorbeifahrten liegen die Maximalpegel erwartungsgemäss zwischen einer stetigen Vorbeifahrt mit Tempo 30 und Tempo 50.
- + Bei Elektrofahrzeugen, bei denen in guter Näherung das Rollgeräusch als massgebend für die Gesamtemission erachtet werden kann, ist der Maximalpegel rein geschwindigkeitsabhängig.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im vorliegenden Projekt wurden die, im Rahmen der Messkampagne des Forschungsprojekts VSS 2012/214 gemessenen Lärmwirkungen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich mithilfe weiterführender Analysen für Personenwagen mit unterschiedlichem Antrieb untersucht. Aus den Analysen resultieren folgende Erkenntnisse:

Konstante Fahrweise

- + Für konstantes Fahrverhalten im Bereich von ≤ 50 km/h gilt bei gleicher Gangwahl und Geschwindigkeit $LEQ_{\text{Diesel}} > LEQ_{\text{Benzin}} > LEQ_{\text{Hybrid}} > LEQ_{\text{Elektro}}$. Im Mittel sind die gemessenen Benzinfahrzeuge ca. 1.5 dB, die Hybridfahrzeuge ca. 4 dB und die Elektrofahrzeuge ca. 5 dB leiser als die gemessenen Dieselfahrzeuge.
- + Stetige Vorbeifahrten bei 30 km/h im 2. oder 3. Gang sind nahezu unabhängig vom Fahrzeugtyp 4 bis 5 dB leiser als stetige Vorbeifahrten bei 50 km/h. Im 2. Gang verringert sich diese Differenz für die Diesel- und Hybridfahrzeuge auf rund 2 dB. Erst bei extremen (sehr hochtourigen) Vorbeifahrten mit 30 km/h im 1. Gang sind die Lärmemissionen von Diesel- und Benzinfahrzeugen deutlich höher als bei stetigen Vorbeifahrten mit 50 km/h. Die gemessenen Hybridfahrzeuge sind selbst dann noch leiser als bei stetigen Vorbeifahrten mit 50 km/h.
- + Unter Berücksichtigung der statistischen Gangverteilung wären rein stetige bzw. konstante Vorbeifahrten bei Tempo 30 ca. 4 bis 5 dB leiser als Vorbeifahrten bei Tempo 50 mit rein konstanter Fahrweise.

Beschleunigende Fahrweise

- + Bei vorausblickender Beschleunigung von 0 auf 30 km/h und vorausblickender unstetiger Fahrweise liegen die Vorbeifahrmaximalpegel nur bis zu 2 dB höher als bei einer stetigen Vorbeifahrt mit 30 km/h und deutlich tiefer als die Vorbeifahrmaximalpegel einer stetigen Vorbeifahrt mit 50 km/h (3 dB oder mehr). Die Differenzen zwischen vorausblickender Beschleunigung auf 30 km/h und stetiger statistischer Vorbeifahrt bei 50 km/h betragen im Maximalpegel rund 3 dB bei Diesel- und Benzinfahrzeugen, rund 6 dB bei Hybrid- und 8 dB bei Elektrofahrzeugen.
- + Bei aggressivem Beschleunigen von 0 auf 30 km/h und unstetiger aggressiver Fahrweise liegen die Maximalpegel deutlich höher (rund 2.5 bis 6 dB) als bei vorausblickendem Beschleunigen auf 30 km/h.

Wann haben Elektro- und Hybridfahrzeuge Vorteile?

- + Die Ergebnisse zeigen, dass Elektro- und Hybridfahrzeuge bereits bei Tempo 50, aber insbesondere im tiefen Geschwindigkeitsbereich, klare akustische Vorteile gegenüber Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotor aufweisen. Dies trifft insbesondere auf beschleunigende Vorbeifahrten zu, bei denen das Motorengeräusch der Elektrofahrzeuge als zusätzliche Lärmquelle vernachlässigbar ist.
- + Bei stetiger Vorbeifahrt mit 30 km/h und statistischer Gewichtung des 2. und 3. Gangs liegt der Vorteil der gemessenen Elektrofahrzeuge gegenüber den Dieselfahrzeugen bei rund 2.5 dB. Bei 50 km/h (statistische Gewichtung von 3. und 4. Gang) liegt dieser Vorteil noch bei rund 2 dB.
- + Hybridfahrzeuge zeigen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich ebenfalls akustische Vorteile und sind nur etwa 0.5 dB lauter als Elektrofahrzeuge bei konstanter Fahrt mit 30 km/h. Bei Beschleunigungen liegen Hybridfahrzeuge akustisch etwa zwischen Elektrofahrzeugen und Benzin-/Dieselfahrzeugen.
- + Die Ergebnisse zeigen das Potential dieser Fahrzeugkategorien bei der Lärmbekämpfung, auch wenn die untersuchte Stichprobe klein ist.

Bedeutung für strassenbauliche Massnahmen

- + Auf Strassen mit vorwiegend Personenwagen können trotz flankierender Massnahmen, die zu unstetigen Fahrweisen führen, wesentliche Lärmreduktionen erwartet werden. Dies geht aus der grossen akustischen Differenz zwischen Tempo 50 und Tempo 30 bei konstanter Fahrweise sowie aus den akustisch mässig ins Gewicht fallenden Beschleunigungsereignissen bei Tempo 30 hervor.
- + Die Ergebnisse zeigen, dass maximale Lärmreduktionen erreicht werden können, wenn neben der Geschwindigkeitsreduktion eine Verstetigung des Verkehrs erreicht wird. Aus diesem Grund ist der Signalisation und Strassengestaltung grosses Gewicht einzuräumen.

Limitierungen

- + Die im Rahmen des Projekts gezogenen Schlussfolgerungen beziehen sich auf Personenwagen. Lieferwagen, Schwerverkehr und Motorräder wurden nicht untersucht.
- + Die Stichprobengrösse bei den Elektro- und Hybridfahrzeugen ist gering. Die generelle Gültigkeit der, in Bezug auf Elektro- und Hybridfahrzeuge getätigten Aussagen wäre daher in Folgeprojekten noch zu überprüfen.
- + Die Vorbeifahrtmessungen erfolgten auf einem leisen Belag, sodass die gemessenen Rollgeräusche im Vergleich zu anderen Belägen abweichen können. Die im Bericht ausgewiesenen absoluten Pegel sollten daher nicht ohne eine entsprechende Belagskorrektur mit den Resultaten anderer Studien verglichen werden.
- + Weiterhin ist zu beachten, dass die untersuchten Beschleunigungsfahrten im Tempo-30-Regime ausschliesslich mit stetigen Vorbeifahrten bei Tempo 50 verglichen wurden. Wie im Bericht "Statistische Erhebungen zum Fahrverhalten mit Fokus Tempo 30" dokumentiert, wird bei Tempo 50 Signalisation in stätischen Verhältnissen ebenfalls unstetig gefahren.

Das vorliegende Projekt liefert weitere relevante Erkenntnisse für die akustische Beurteilung von Personenwagen in Tempo 30 Situationen. Für eine akustische Beurteilungen von Tempo 30 Situationen inklusive Schwerverkehr wird auf das Forschungsprojekt VSS 2012/214 hingewiesen.

Grolimund + Partner AG



Erik Bühlmann



Sebastian Egger

ANHANG

Die Datengrundlage für die Auswertungen in diesem Projekt stammt aus den im Rahmen des Forschungsprojekts 2012/214 durchgeführten Messungen zur Lärmemission im niedrigen Geschwindigkeitsbereich. Der in Anhang 1 aufgelistete Fahrzeugpark ist dem Abschlussbericht zum Forschungsprojekt VSS 2012/214 entnommen. Für die Darstellung der Vorbeifahrtspegel jeweils eines repräsentativen Fahrzeugs pro Antriebsart wurden die Fahrzeuge 15, 16, 17 und 18 anhand ihrer vollständigen und störungsfreien Pegelverläufe ausgewählt (siehe Anhänge 2 bis 4). Die Anhänge 5 und 6 enthalten die mittleren gemessenen Vorbeifahrtspegel pro Szenario für die vier Antriebsarten in Tabellenform.

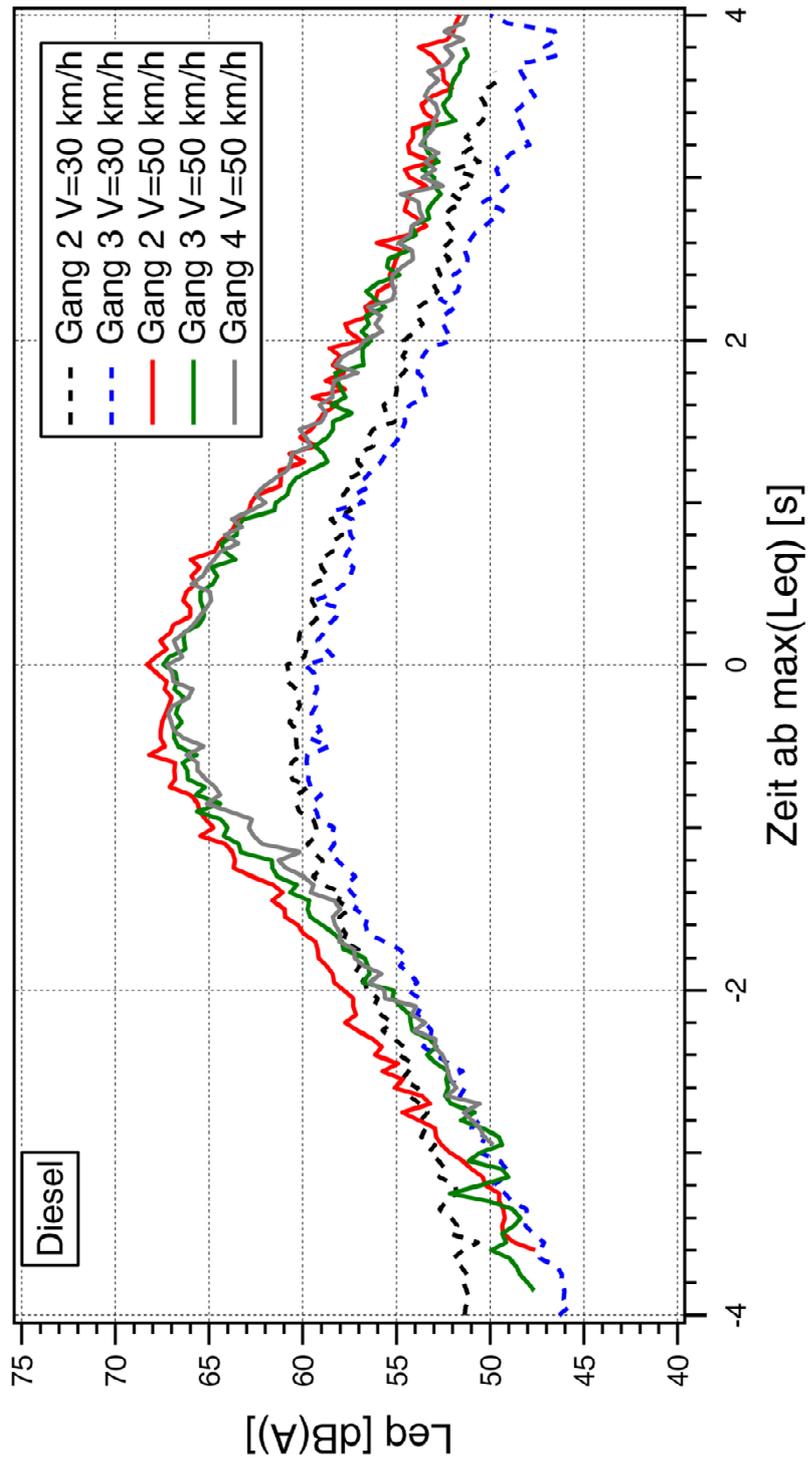
1 FAHRZEUGPARK

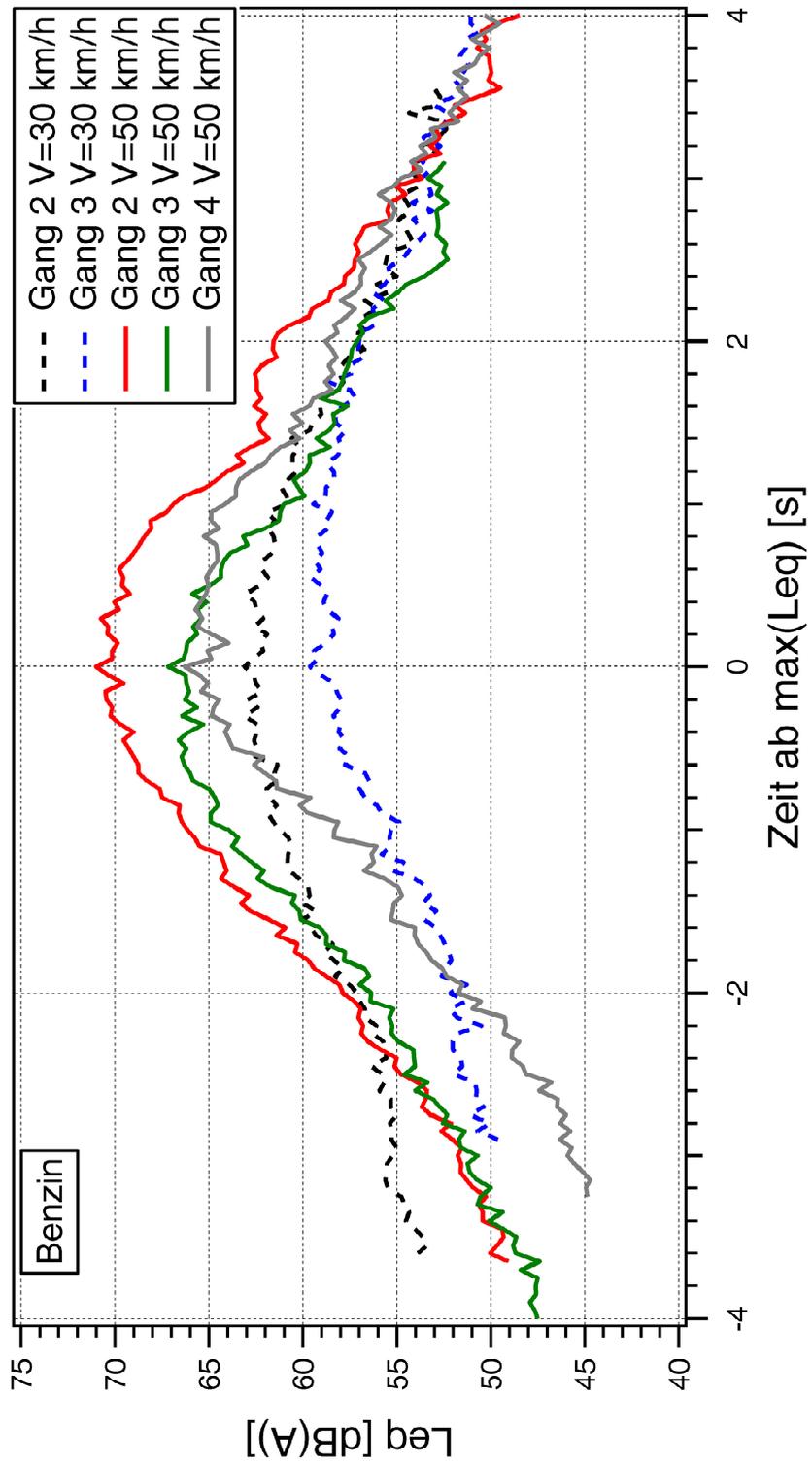
Tabelle 7: Fahrzeugpark der Messkampagne zum Emissionsansatz im niedrigen Geschwindigkeitsbereich (entnommen aus dem Forschungsbericht VSS 2012/214).

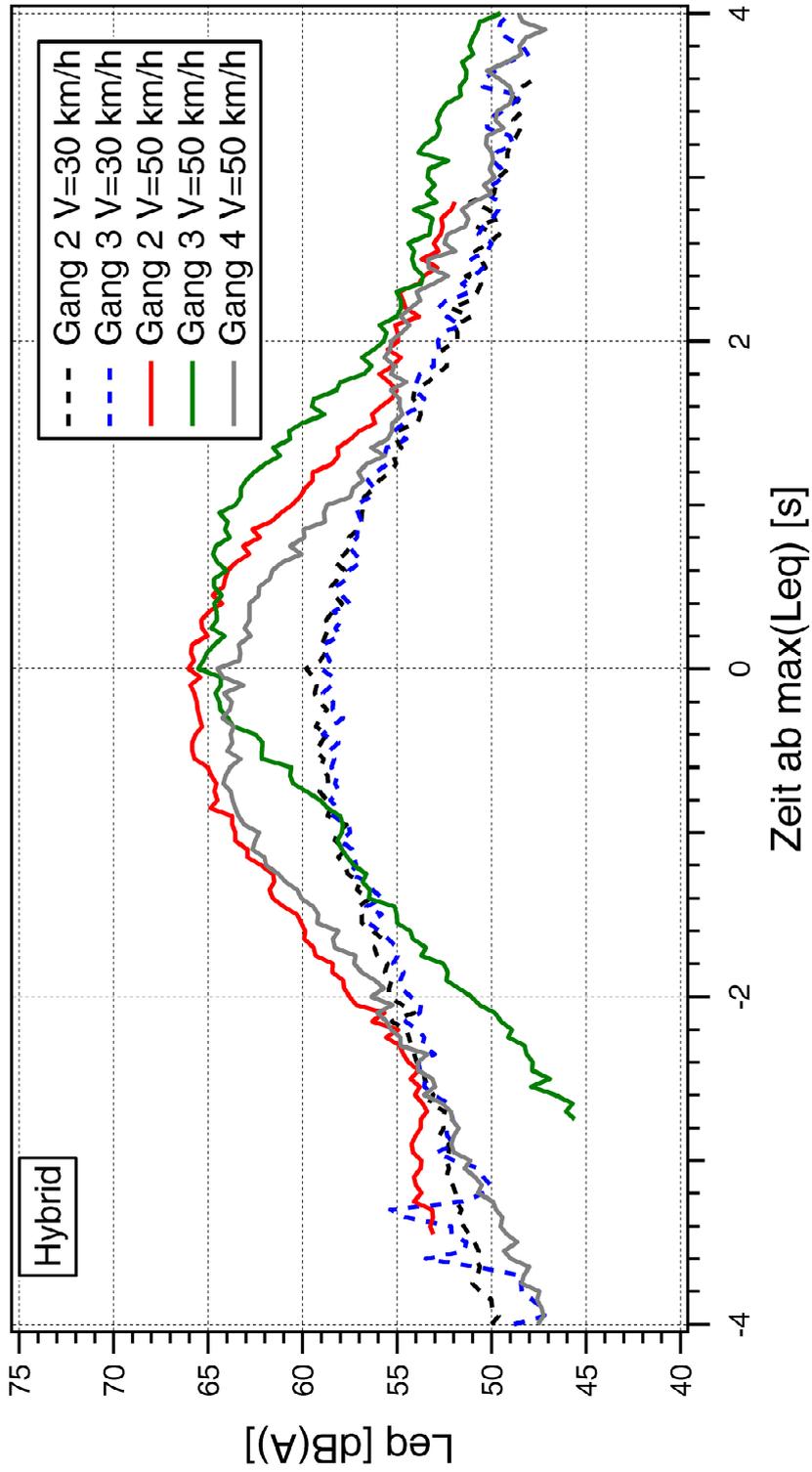
Fz	Marke	Typ	Fahrzeugkategorie	Antrieb
1	Ford USA	Mustang 5.0i-V8 GT	Sportwagen	Benzin
2	Volkswagen	Touran	Kombi/Limousine/Minivan	Benzin
3	Toyota	Highlander	SUV/Geländewagen	Hybrid
4	Audi	A1 1.4 TFSI CoD Sportsback	Kleinwagen/Kompaktwagen	Benzin
5	Toyota	Auris HSD	Kombi/Limousine/Minivan	Hybrid
6	Volkswagen	Touran 2.0D Blue Motion	Kombi/Limousine/Minivan	Diesel
7	Subaru	Impreza	Kombi/Limousine/Minivan	Diesel
8	Volkswagen	T5 California TDI	Kleinbus/Van	Diesel
9	Volkswagen	Golf VII 1.4 TSI 5	Kleinwagen/Kompaktwagen	Benzin
10	Volvo	XC60 D3 AWD	SUV/Geländewagen	Diesel
11	Citroen	C4 Picasso 1.6i	Kombi/Limousine/Minivan	Benzin
12	Volkswagen	Golf VI 1.4 TFSI	Kleinwagen/Kompaktwagen	Benzin
13	Renault	Espace 2.0 DCI	Kleinbus/Van	Diesel
14	BMW	i3	Kleinwagen/Kompaktwagen	Elektro
15	Skoda	Octavia C 1.8 TFSI	Kombi/Limousine/Minivan	Benzin
16	Audi	A3 SB 2.0 TDI	Kleinwagen/Kompaktwagen	Diesel
17	Peugeot	308 SW 1.6 HDI FAP	Kombi/Limousine/Minivan	Hybrid
18	VW	e-Golf	Kleinwagen/Kompaktwagen	Elektro
19	Mini	Cooper	Kleinwagen/Kompaktwagen	Benzin
20	Toyota	Previa 2.4	Kombi/Limousine/Minivan	Benzin
21	Mercedes-Benz	Viano 3.0 CDI	Kleinbus/Van	Diesel
22	Mercedes-Benz	313 CDI	Lieferwagen (3,5t)	Diesel

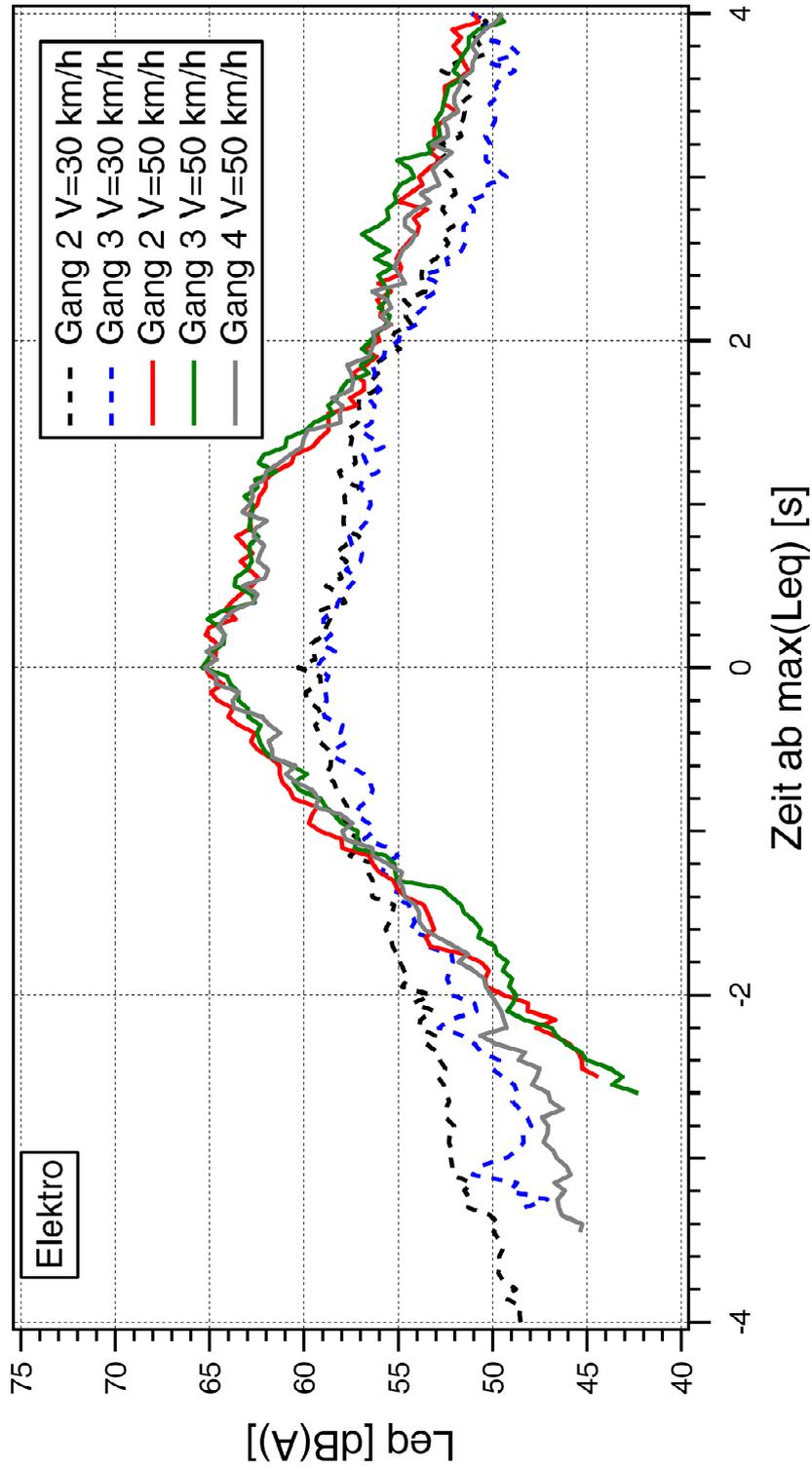
2 KONSTANTES FAHRVERHALTEN BEI 30 UND 50 KM/H*

* Erläuterungen zu den Diagrammen unter "Vorbeifahrsdiagramme" im Kapitel 2.3.

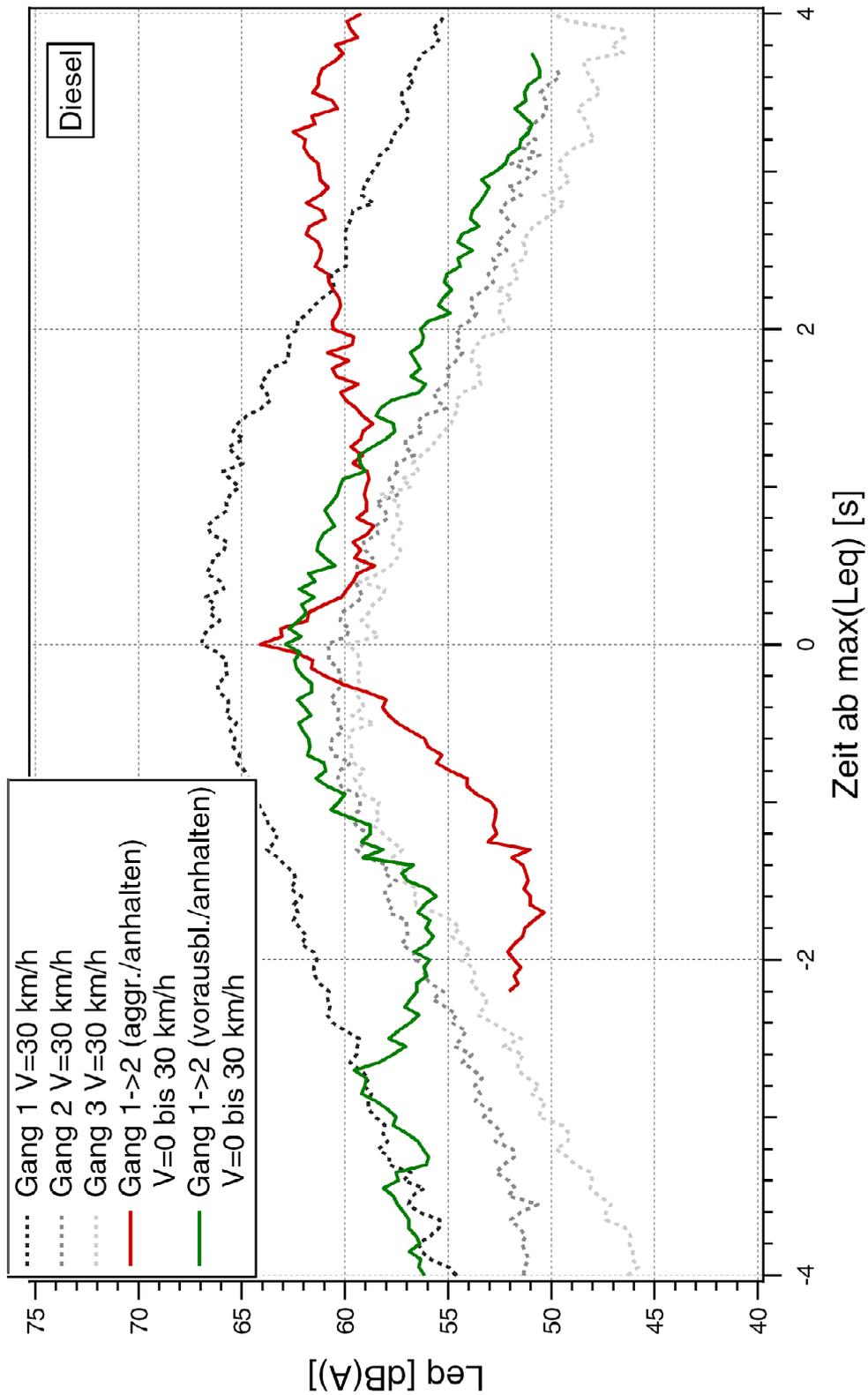


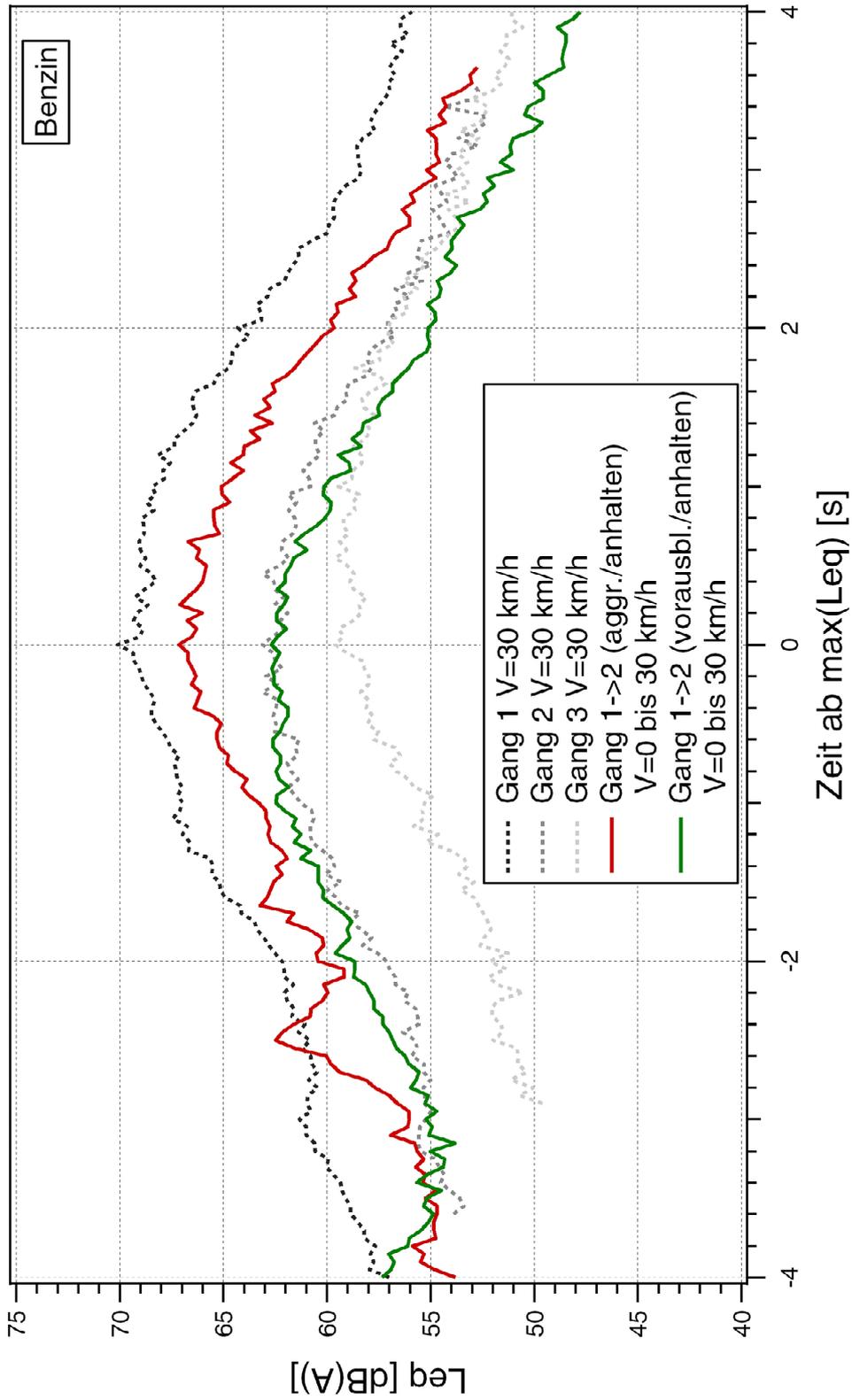


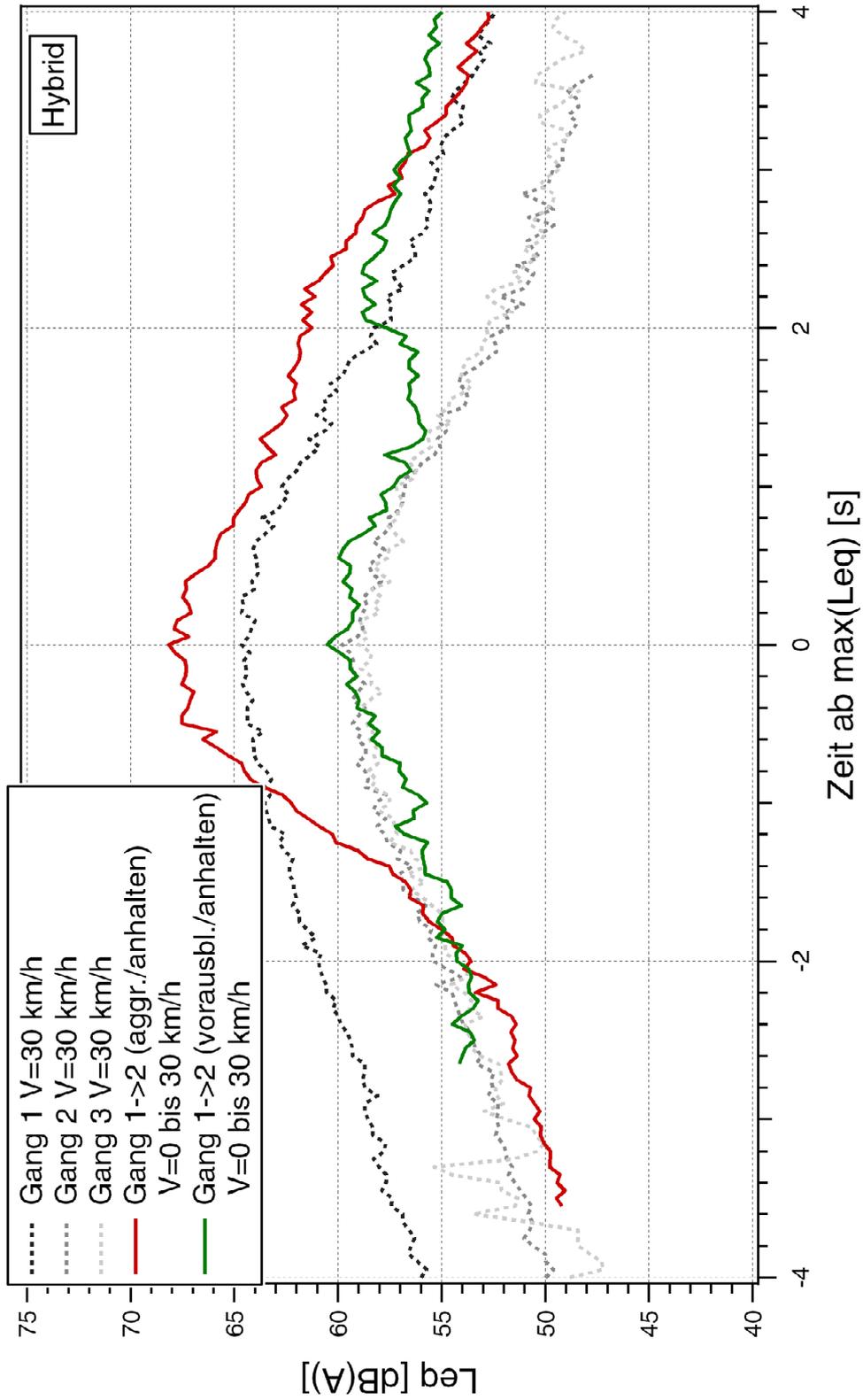


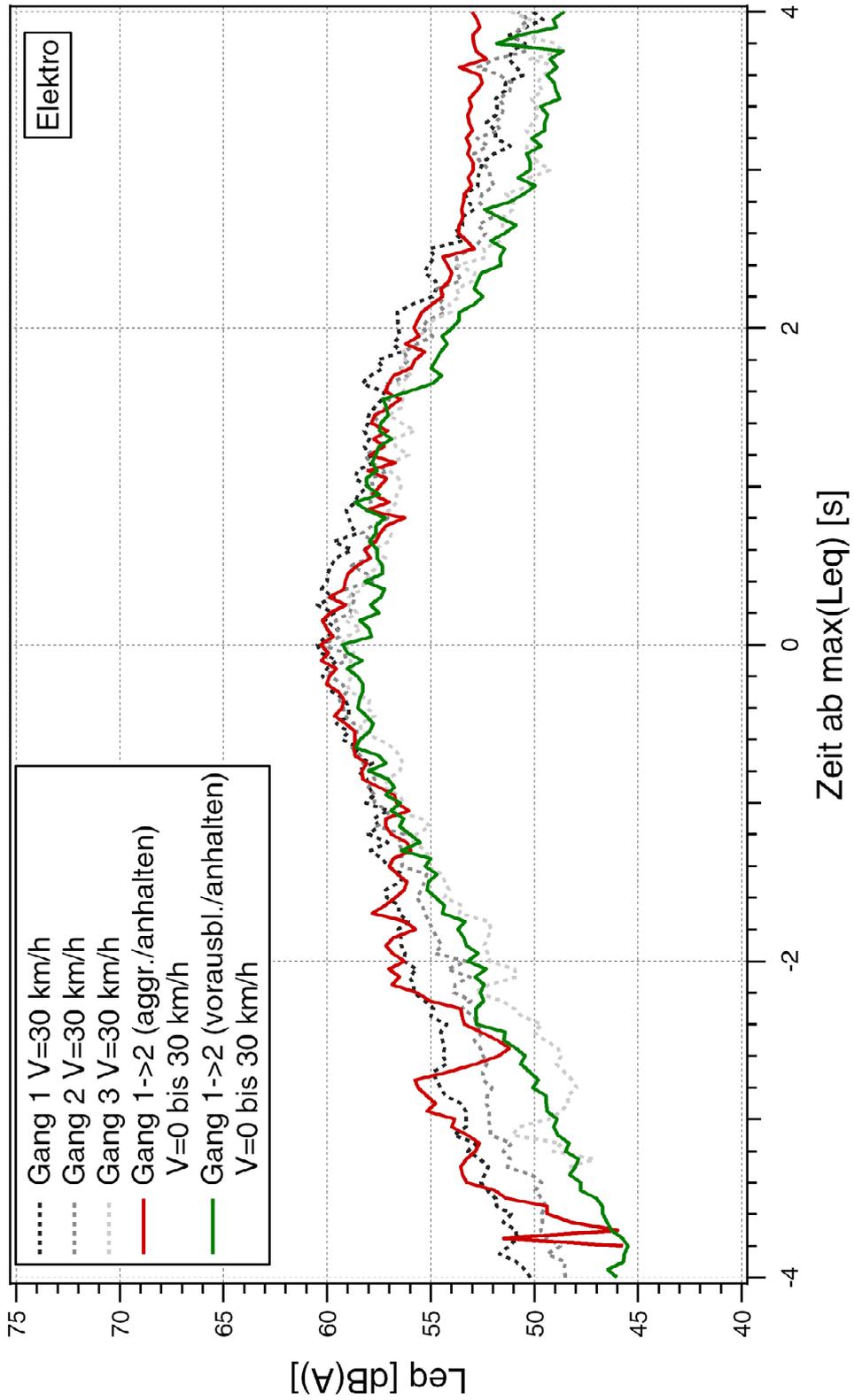


3 KONSTANTES VS. BESCHLEUNIGTES FAHRVERHALTEN BEI TEMPO 30

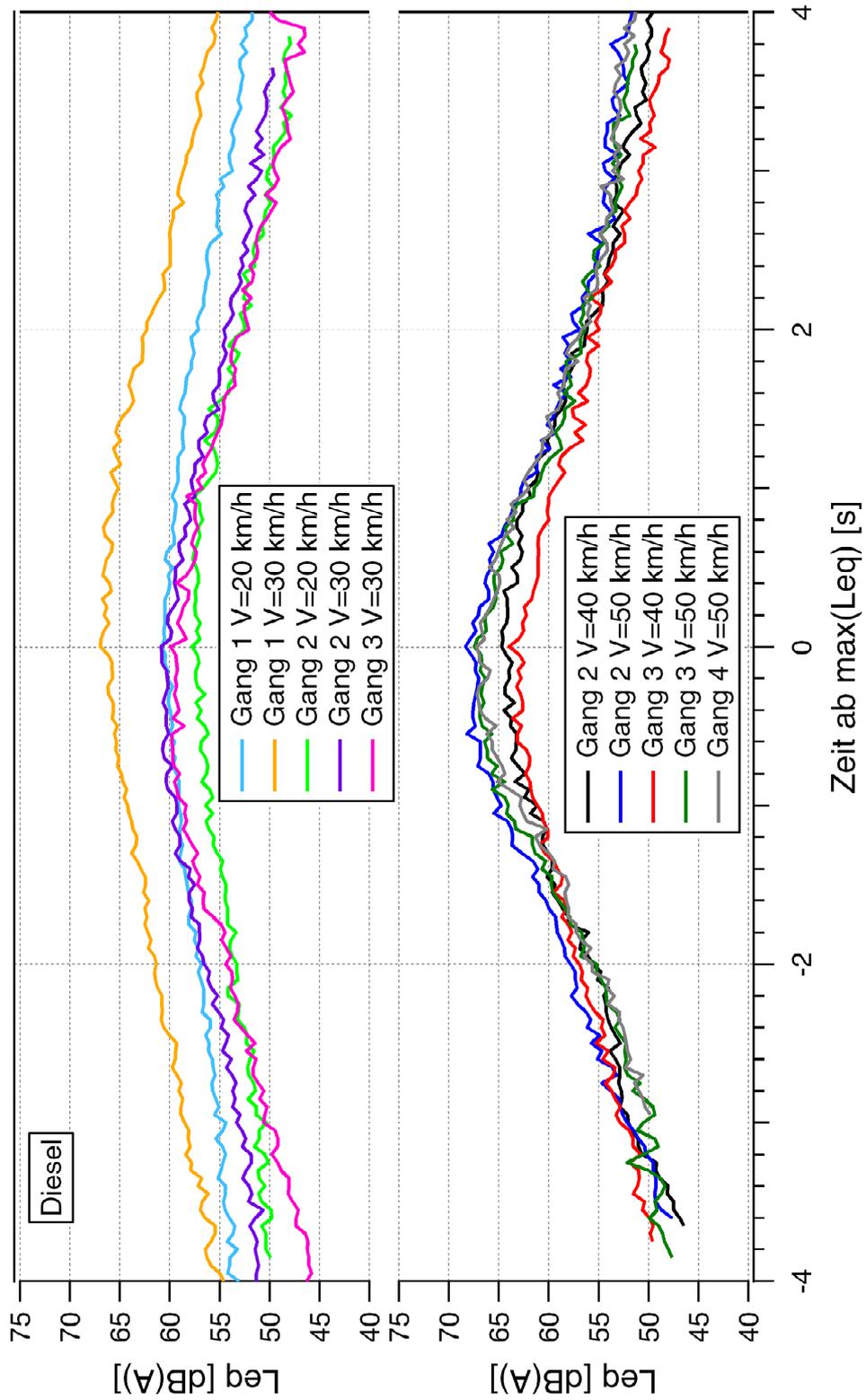


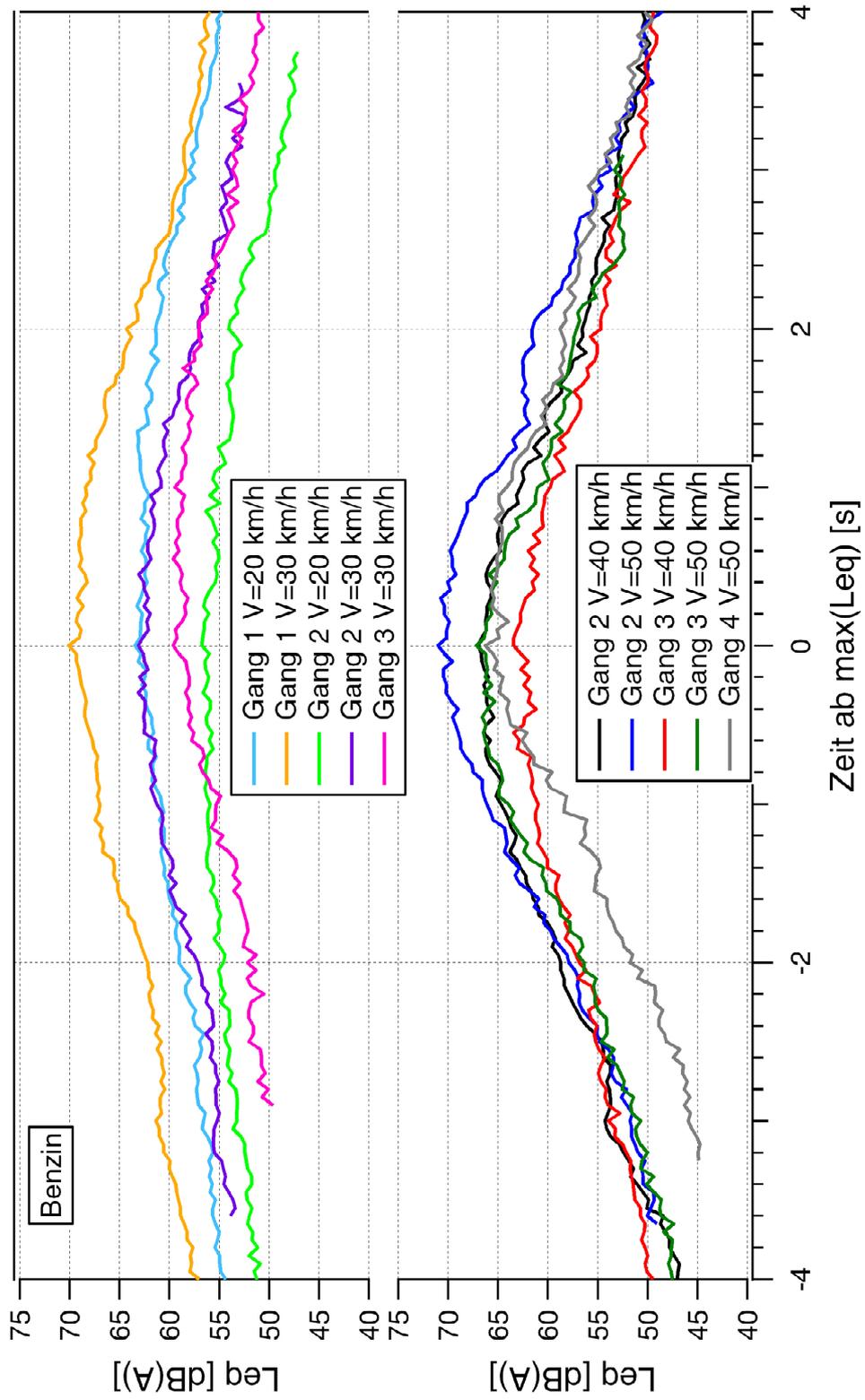


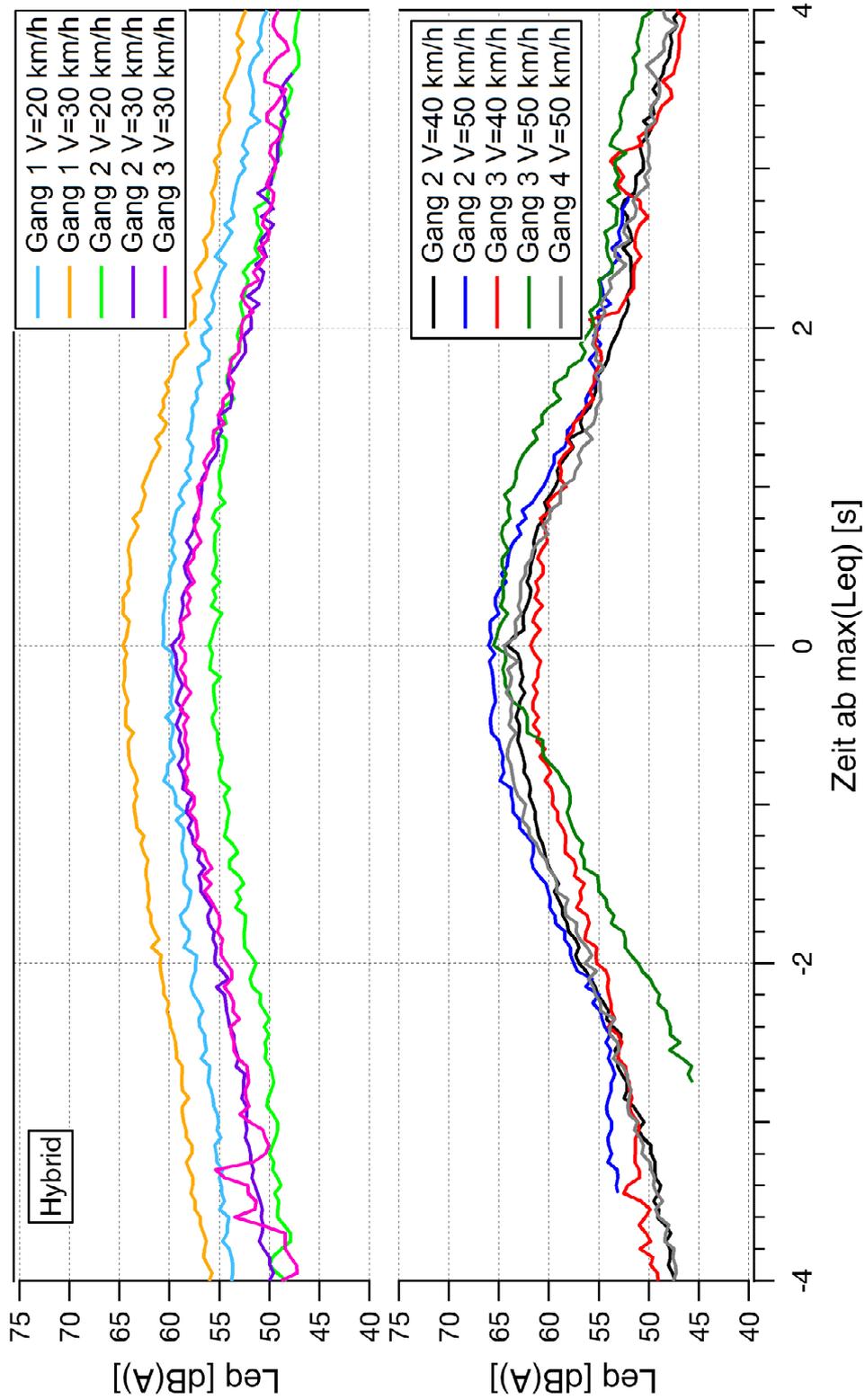


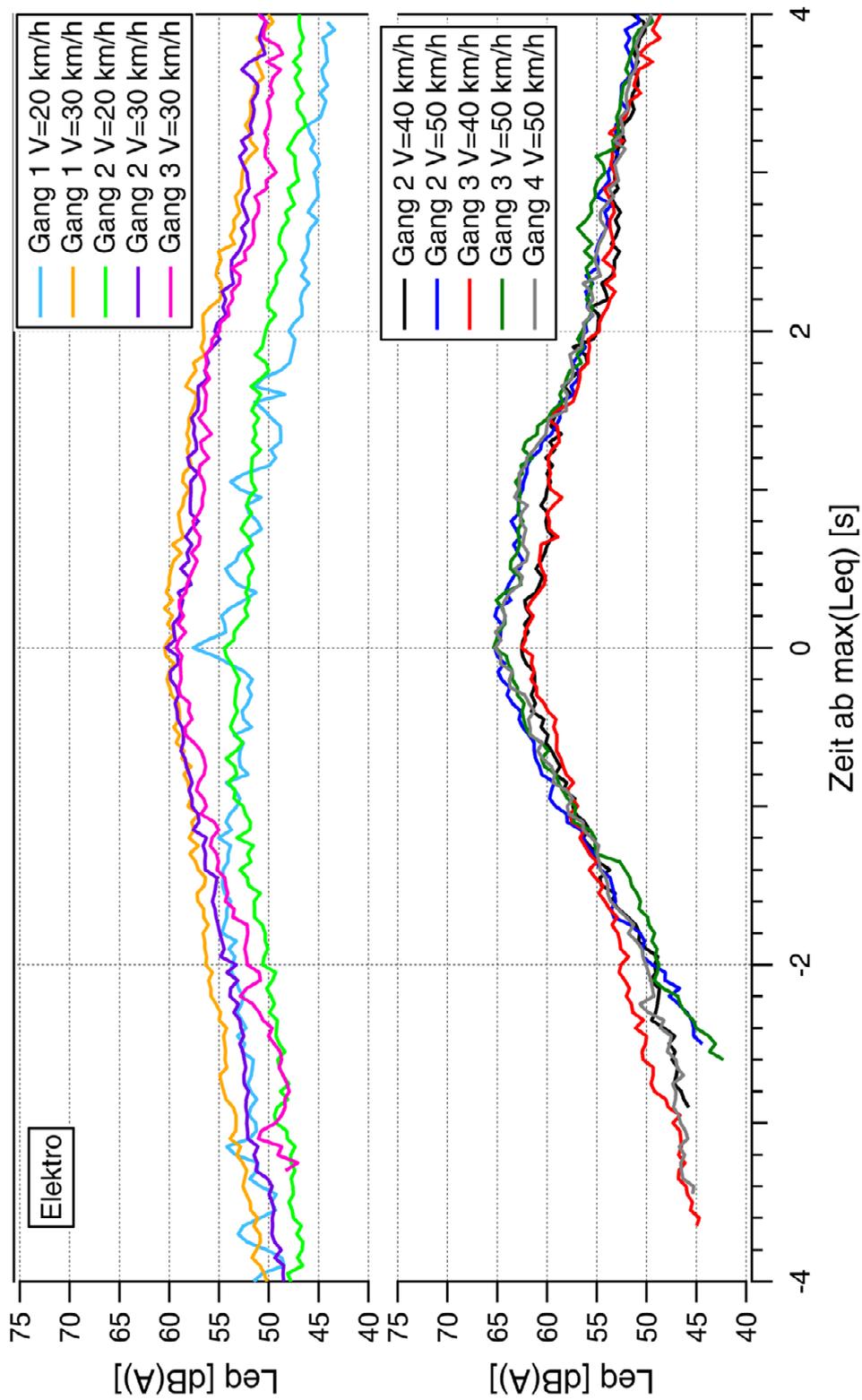


4 VORBEIFAHRTEN BEI KONSTANTEM FAHRVERHALTEN









5 MITTLERE LÄRMPEGEL BEI BESCHLEUNIGENDEM FAHRVERHALTEN

Tabelle 8: Mittelwert (MW) und empirische Standardabweichung (STDW) des gemessenen A-bewerteten maximalen Schalldruckpegels (L_{max}) für alle Szenarien bei beschleunigender Fahrweise jeweils in 7.5 m Distanz zur Quelle (bzgl. Bemerkungen zum Belag vgl. Kap. 2.3.).

Fahrzeug- kategorie	Fahrweise	Beschleunigungs- stil	Anzahl Fahrzeuge	L _{max} [dB(A)]	
				MW	STDW
Diesel	Anhalten	aggressiv	7	69.6	3.9
Benzin	Anhalten	aggressiv	9	68.1	3.3
Hybrid	Anhalten	aggressiv	3	64.4	3.3*
Elektro	Anhalten	aggressiv	2	61.0	-
Diesel	Anhalten	vorausblickend	7	63.4	1.5
Benzin	Anhalten	vorausblickend	9	62.7	1.5
Hybrid	Anhalten	vorausblickend	3	59.5	3.2*
Elektro	Anhalten	vorausblickend	2	56.7	-
Diesel	unstetig	aggressiv	7	65.8	1.9
Benzin	unstetig	aggressiv	9	66.9	1.7
Hybrid	unstetig	aggressiv	3	63.7	2.0*
Elektro	unstetig	aggressiv	2	61.8	-
Diesel	unstetig	vorausblickend	7	63.2	1.7
Benzin	unstetig	vorausblickend	9	62.0	2.1
Hybrid	unstetig	vorausblickend	3	60.7	1.6*
Elektro	unstetig	vorausblickend	2	58.0	-

* STDW bei sehr kleiner Stichprobengrösse.

6 MITTLERE LÄRMPEGEL BEI KONSTANTEM FAHRVERHALTEN

Tabelle 9: Mittelwert (MW) und empirische Standardabweichung (STDW) des berechneten A-bewerteten energieäquivalenten Dauerschallpegels (LEQ) und des gemessenen A-bewerteten maximalen Schalldruckpegels (L_{max}) für alle Szenarien bei konstanter Fahrweise jeweils in 7.5 m Distanz zur Quelle (bzgl. Bemerkungen zum Belag vgl. Kap. 2.3.).

Fahrzeug- kategorie	Gang	Geschw. [km/h]	Anzahl Fahrzeuge	LEQ [dB(A)]		L_{max} [dB(A)]	
				MW	STDW	MW	STDW
Diesel	1	30	7	39.0	2.5	70.0	2.5
Diesel	2	50	7	36.6	1.7	69.9	1.7
Diesel	2	40	7	34.1	2.0	66.4	2.0
Diesel	1	20	7	33.9	3.0	63.2	3.0
Diesel	3	50	7	33.8	0.9	67.0	0.9
Diesel	4	50	6	33.2	0.8	66.4	0.8
Diesel	3	40	7	31.5	1.2	63.7	1.2
Diesel	2	30	7	31.3	2.0	62.3	2.0
Diesel	3	30	7	28.8	0.9	59.8	0.9
Diesel	2	20	7	28.3	2.4	57.5	2.4
<hr/>							
Benzin	1	30	9	36.0	2.9	67.0	2.9
Benzin	2	50	8	35.3	1.7	68.5	1.7
Benzin	3	50	8	33.1	1.3	66.3	1.3
Benzin	2	40	8	32.7	1.4	65.0	1.4
Benzin	4	50	8	32.4	1.3	65.6	1.3
Benzin	1	20	9	31.5	1.8	60.7	1.8
Benzin	3	40	8	30.9	1.6	63.1	1.6
Benzin	2	30	9	29.9	1.3	60.9	1.3
Benzin	3	30	9	27.9	1.3	58.9	1.3
Benzin	2	20	9	27.0	2.0	56.3	2.0
<hr/>							
Hybrid	2	50	3	32.2	0.5*	65.4	0.5*
Hybrid	3	50	3	32.1	0.7*	65.3	0.7*
Hybrid	4	50	3	31.6	1.0*	64.9	1.0*
Hybrid	2	40	3	30.0	1.2*	62.3	1.2*
Hybrid	3	40	3	29.5	0.4*	61.7	0.4*
Hybrid	1	30	3	29.4	3.7*	60.4	3.7*
Hybrid	2	30	3	27.3	1.1*	58.3	1.1*
Hybrid	3	30	3	27.1	0.8*	58.1	0.8*
Hybrid	1	20	3	26.3	4.4*	55.6	4.4*
Hybrid	2	20	3	25.0	1.5*	54.2	1.5*
<hr/>							
Elektro**	-	50	1	31.4	-	64.7	-
Elektro**	-	40	2	28.5	-	60.7	-
Elektro**	-	30	2	26.7	-	57.7	-
Elektro**	-	20	2	23.9	-	53.1	-

* STDW bei sehr kleiner Stichprobengröße (n=3).

** Die spezifische Gangwahl war bei den gemessenen Fahrzeugen mit Elektroantrieb nicht möglich. LEQ und L_{max} sind für Elektrofahrzeuge daher als arithmetisches Mittel aller Szenarien bei der entsprechenden Geschwindigkeit aufgeführt.