

TEXTE

08/2025

Abschlussbericht

Fortsetzung der UBA-Zeitreihe zum Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte

von:

M.Sc. Nikolas Kirchhoff

Dipl.-Ing. (FH) MBA & Eng. Manuel Männel

Müller-BBM Industry Solutions GmbH,
Planegg bei München

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 08/2025

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 54 103 0
FB001420

Abschlussbericht

Fortsetzung der UBA-Zeitreihe zum Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte

von

M.Sc. Nikolas Kirchhoff
Dipl.-Ing. (FH) MBA & Eng. Manuel Männel
Müller-BBM Industry Solutions GmbH,
Planegg bei München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Müller-BBM Industry Solutions GmbH
Helmut-A.-Müller-Straße 1 – 5
82152 Planegg bei München

Abschlussdatum:

August 2023

Redaktion:

Fachgebiet I 2.4 „Lärminderung bei Anlagen und Produkten, Lärmwirkungen“
Jan Gebhardt

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Januar 2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Fortsetzung der UBA-Zeitreihe zum Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte

Das Umweltbundesamt (UBA) hat in der Vergangenheit in mehreren Messkampagnen das Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte bestimmen lassen. Die bisher letzte Kampagne wurde von Müller-BBM in den Jahren 2011/2012 durchgeführt. Nun wurde nach zehn Jahren eine weitere Messkampagne bearbeitet.

Ziel des Vorhabens ist es, zu untersuchen, ob ein Trend bezüglich der Geräuschemission der deutschen Kfz-Flotte zu erkennen ist. Zur Bestimmung des Geräuschverhaltens wurden Vorbeifahrtmessungen von Einzelfahrzeugen nach DIN EN ISO 11819-1:2002-05 (SPB) an 30 Messorten durchgeführt, wobei pro Messort mindestens 1000 Fahrzeuge erfasst werden sollten. Die akustischen Messungen wurden in drei verschiedenen Messhöhen durchgeführt, um Einflüssen der Bodenabsorption entgegenzuwirken. Anders als vor zehn Jahren wurden die Messungen in dieser Kampagne automatisiert unter Zuhilfenahme eines Mikrofon-Arrays in Verbindung mit spezialisierten Auswerte-Algorithmen durchgeführt. Zusätzlich wurde zu jedem Fahrzeug das Kennzeichen mittels einer Kamera detektiert, um darüber technische Parameter der Fahrzeuge beim Kraftfahrtbundesamt (KBA) einholen zu können. Da auch der Fahrbahnbelag einen Einfluss auf das Vorbeifahrgeräusch haben kann, wurden Nahfeldmessungen nach DIN EN ISO 11819-2:2017-10 (CPX) an jedem Streckenabschnitt durchgeführt, um die Homogenität des Fahrbahnbelags zu bestimmen. In Verbindung mit den CPX-Messungen wurden zudem Texturmessungen nach DIN EN ISO 13473:2004-07 (1-3) durchgeführt, um relevante Parameter zur Beschreibung der Fahrbahntextur zu quantifizieren.

Neben der Auswertung der maximalen Schalldruckpegel in der Vorbeifahrt wurden zudem Sound Exposure Levels (SEL) generiert und mit den Maximalpegeln verglichen. Diese zeigten eine geringere Abhängigkeit von der Geschwindigkeit als die Maximalpegel. Mithilfe der vom KBA zur Verfügung gestellten technischen Fahrzeugparameter wie Fahrzeugklasse, Antriebsart, Motorleistung, zulässige Gesamtmasse und mehr, wurden die Einflüsse dieser Parameter auf das Vorbeifahrtgeräusch wissenschaftlich ausgewertet. Abschließend wurde ein Vergleich der Ergebnisse mit denen der Messkampagnen aus 2012 sowie 2002 aufgestellt. Um eine Einschätzung über die zukünftige Entwicklung des Geräuschverhaltens der deutschen Kfz-Flotte treffen zu können, wurden zusätzlich die Erfahrungen von Experten der Homologation herangezogen.

Zusammenfassend lässt sich die Aussage formulieren, dass sich der Vorbeifahrt-Geräuschpegel im Vergleich zu den Jahren 2011/2012 für PKW nicht merklich verändert hat. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass sich die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte insbesondere in Bezug auf hybride und Elektro-Fahrzeuge – bei denen der Geräuschpegel im Mittel um ca. 1 dB niedriger liegt als bei Verbrennern – zunehmend ändert. Dieser Trend wird sich in Zukunft verstärkt fortsetzen und somit weiter Einfluss auf das Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte nehmen.

Abstract: Continuation of the UBA time series on the noise behavior of the German motor vehicle fleet

In the past, the German Federal Environmental Agency (UBA) has conducted several measurement campaigns to determine the noise behavior of the German vehicle fleet. The last campaign was conducted by Müller-BBM in the years 2011/2012. Now, after ten years, another measurement campaign has been processed.

The aim of the project is to investigate whether a trend can be identified with regard to the noise emissions of the German vehicle fleet. To determine the noise behavior, pass-by measurements of individual vehicles were carried out in accordance with DIN EN ISO 11819-1:2002-05 (SPB) at 30 measurement locations, whereby at least 1000 vehicles were to be recorded per measurement location. The acoustic measurements were carried out at three different measurement heights in order to counteract the effects of ground absorption. In contrast to ten years ago, the measurements in this campaign were automated with the aid of a microphone array in combination with specialized evaluation algorithms. In addition, the license plate of each vehicle was detected by a camera so that technical parameters of the vehicles could be obtained from the German Federal Motor Transport Authority (KBA). Since the road surface can also have an influence on the pass-by noise, near-field measurements according to DIN EN ISO 11819-2:2017-10 (CPX) were carried out on each road section to determine the homogeneity of the road surface. In conjunction with the CPX measurements, texture measurements were also carried out in accordance with DIN EN ISO 13473:2004-07 (1-3) in order to quantify relevant parameters for describing the pavement texture.

In addition to the evaluation of the maximum sound pressure levels in the pass-by, Sound Exposure Levels (SEL) were also generated and compared with the maximum levels. These showed a lower dependence on speed than the maximum levels. With the help of the technical vehicle parameters provided by the KBA, such as vehicle class, power train type, engine power, permissible total mass and more, the influences of these parameters on the pass-by noise were scientifically evaluated. Finally, a comparison of the results with those of the measurement campaigns from 2012 as well as 2002 was set up. In order to estimate how vehicle emissions could develop in the coming years, the experience of homologation experts was also used to make estimates about the future development of the noise behavior of the German vehicle fleet.

In summary, the statement can be formulated that the pass-by noise level has not changed noticeably compared to the years 2011/2012 for passenger cars. However, it was found that the composition of the vehicle fleet is increasingly changing, especially with regard to hybrid and electric vehicles – for which the noise level is about 1 dB lower than for internal combustion vehicles. This trend will continue at an increasing pace in the future and will thus have a further influence on the noise behavior of the German vehicle fleet.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	11
Abkürzungsverzeichnis	12
Zusammenfassung.....	13
Summary	25
1 Situation und Aufgabenstellung.....	36
1.1 Projektstruktur	36
1.2 Zeitlicher Ablauf	36
1.3 Beschreibung des Messaufbaus.....	37
1.4 CPX- und Texturmessungen	40
2 Beschreibung der Messpunkte.....	41
2.1 Allgemein	41
2.2 CPX-Ergebnisse.....	43
2.3 SPB-Ergebnisse	46
2.4 KoSD-Ergebnisse	48
2.5 Texturergebnisse.....	53
3 Untersuchung der erfassten Fahrzeugflotte	54
3.1 Allgemein	54
3.2 Fahrzeugklassen	55
3.3 Altersverteilung.....	56
3.4 Kraftstoffquellen	57
3.5 Weitere Verteilungen der Fahrzeugflotte.....	59
3.5.1 Verteilung der Nennleistung.....	59
3.5.2 Verteilung des Hubraums	61
3.5.3 Verteilung der Fahrzeugmasse	63
3.5.4 Verteilung des Typprüfwerts Fahrgeräusch.....	66
4 Auswertung der Vorbeifahrtmessungen	69
4.1 Allgemein	69
4.1.1 Bewertung der Ausbreitungsbedingungen.....	69
4.1.2 Anomalie einzelner Kanal-2-Spektren	71
4.2 Verteilungen des Datensatzes	72
4.3 Akustische Beurteilung des Datensatzes	75
4.3.1 Akustisches Verhalten bei Mehrfachvorbeifahrten.....	75

4.3.2	Geräuschemissionen von PKW	77
4.3.3	Sound Exposure Level von PKW.....	83
4.3.4	Spektren von PKW	84
4.3.5	Kategorisierung von LKW	87
4.3.6	Geräuschemissionen von LKW.....	89
4.3.7	Sound Exposure Level von LKW	94
4.3.8	Spektren von LKW.....	94
4.3.9	Geräuschemissionen von Krafträdern	97
4.3.10	Sound Exposure Level von Krafträdern.....	98
4.3.11	Spektren von Krafträdern	99
4.3.12	Regressionen verschiedener Fahrzeugklassen	100
4.3.13	Spektren verschiedener Fahrzeugklassen.....	102
4.4	Sonderauswertung – Winter.....	103
4.5	Sonderauswertung – DSH-V-Messpunkte.....	106
5	Einfluss der Fahrzeugparameter	108
5.1	Einfluss des Antriebstyps	108
5.2	Einfluss der Nennleistung	111
5.3	Einfluss des Hubraums.....	113
5.4	Einfluss der Fahrzeugmasse	117
5.5	Einfluss des Erstzulassungsjahres	120
5.6	KI-Verfahren.....	121
6	Entwicklung des Emissionsverhaltens.....	123
6.1	Vergleich der Geräuschemissionen von PKW	123
6.2	Vergleich der Geräuschemissionen von LKW	125
6.3	Vergleich der Geräuschemissionen von Krafträdern.....	127
7	Aussage zum zukünftigen Geräuschverhalten und Ausblick.....	128
7.1	Expertenaussagen zur Veränderung der Fahrzeugflotte in Deutschland	128
7.2	Verschneidung der Expertenaussagen mit den Erkenntnissen aus den Fahrzeugmessungen	129
8	Quellenverzeichnis	130
A	Anhang – KI-Verfahren	131
A.1	Principal Component Analysis und Numerical Clustering.....	131
A.2	Random Forrest Regression	134

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verwendeter Messaufbau	37
Abbildung 2:	Exemplarisches Messprotokoll einer Einzelvorbeifahrt an MP5	39
Abbildung 3:	CPX-Messsystem mit Texturlaser	40
Abbildung 4:	Übersicht der Messorte in Deutschland.....	41
Abbildung 5:	CPX-Indizes und Standardabweichungen für $v_{\text{ref, CPX}} = 50 \text{ km/h}$ und $v_{\text{ref, SPB}} = 50 \text{ km/h}$	44
Abbildung 6:	CPX-Indizes und Standardabweichungen für $v_{\text{ref, CPX}} = 80 \text{ km/h}$ und $v_{\text{ref, SPB}} = 80 \text{ km/h}$	44
Abbildung 7:	CPX-Indizes und Standardabweichungen für $v_{\text{ref, CPX}} = 80 \text{ km/h}$ und $v_{\text{ref, SPB}} = 110 \text{ km/h}$	45
Abbildung 8:	Vorbeifahrtpegel bei $v_{\text{ref, PKW}} = 50 \text{ km/h}$, $v_{\text{ref, LKW}} = 50 \text{ km/h}$ nach ISO 11819-1:2002-05	46
Abbildung 9:	Vorbeifahrtpegel bei $v_{\text{ref, PKW}} = 80 \text{ km/h}$, $v_{\text{ref, LKW}} = 70 \text{ km/h}$ nach ISO 11819-1:2002-05	47
Abbildung 10:	Vorbeifahrtpegel bei $v_{\text{ref, PKW}} = 110 \text{ km/h}$, $v_{\text{ref, LKW}} = 85 \text{ km/h}$ nach ISO 11819-1:2002-05	47
Abbildung 11:	Exemplarische KoSD-Auswertung	49
Abbildung 12:	Korrekturwerte nach TP KoSD-19, $v_{\text{ref}} = 50 \text{ km/h}$	51
Abbildung 13:	Korrekturwerte nach TP KoSD-19, $v_{\text{ref}} = 80 \text{ km/h}$	51
Abbildung 14:	Korrekturwerte nach TP KoSD-19, $v_{\text{ref}} = 110 \text{ km/h}$	52
Abbildung 15:	Texturkennwerte der Messpunkte	53
Abbildung 16:	Histogramm Fahrzeugklasse.....	55
Abbildung 17:	Histogramm Zulassungsjahr	56
Abbildung 18:	Histogramm Kraftstoff- oder Energiequelle	57
Abbildung 19:	Histogramm Kraftstoff- oder Energiequelle, ohne Hauptkomponenten Diesel und Benzin.....	58
Abbildung 20:	Histogramm Nennleistung PKW	59
Abbildung 21:	Histogramm Nennleistung LKW	60
Abbildung 22:	Histogramm Nennleistung Kraftrad	60
Abbildung 23:	Histogramm Hubraum PKW	61
Abbildung 24:	Histogramm Hubraum LKW.....	62
Abbildung 25:	Histogramm Hubraum Kraftrad.....	62
Abbildung 26:	Histogramm zulässige Fahrzeugmasse PKW	63
Abbildung 27:	Histogramm zulässige Fahrzeugmasse LKW.....	64
Abbildung 28:	Vergleich Histogramm zulässige Fahrzeugmasse (PKW)	65
Abbildung 29:	Histogramm Fahrgeräusch PKW.....	66
Abbildung 30:	Fahrgeräusch über Zulassungsjahr PKW	67
Abbildung 31:	Histogramm Fahrgeräusch Kraftrad	68
Abbildung 32:	Fahrgeräusch über Zulassungsjahr Kraftrad.....	68
Abbildung 33:	Exemplarische Messpositionen mit und ohne Bodenabsorption	69

Abbildung 34:	Messergebnisse in zwei Höhen für den MP1	70
Abbildung 35:	Messergebnisse in zwei Höhen für den MP2	70
Abbildung 36:	Mittlere Spektren der Maximalpegel einzelner Messpunkte...	72
Abbildung 37:	Histogramm Geschwindigkeit.....	73
Abbildung 38:	Histogramm Temperatur	73
Abbildung 39:	Histogramm T ₆ -Zeit.....	74
Abbildung 40:	T ₆ -Zeit über der Geschwindigkeit (Dichte farbcodiert)	74
Abbildung 41:	Mehrfache Vorbeifahrt MVV-Bus.....	76
Abbildung 42:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für PKW, Messpunkte 1 bis 10	78
Abbildung 43:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für PKW, Messpunkte 11 bis 20	79
Abbildung 44:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für PKW, Messpunkte 21 bis 30	80
Abbildung 45:	Vergleich Regressionsgeraden (PKW)	81
Abbildung 46:	Vergleich Regressionsgeraden KoSD-korrigiert (PKW).....	82
Abbildung 47:	Datensatzvergleich vor und nach KoSD-Korrektur	82
Abbildung 48:	Vergleich mit der Grundwertkurve	83
Abbildung 49:	Vergleich Maximalpegel und SEL für PKW	84
Abbildung 50:	Spektraler Vergleich verschiedener Messhöhen.....	85
Abbildung 51:	Mittlere Spektren der Maximalpegel (korrigiert), PKW	86
Abbildung 52:	Spektren in Geschwindigkeitskategorien (PKW)	87
Abbildung 53:	LKW-Vorbeifahrtpegel über der Geschwindigkeit und zulässige Masse.....	88
Abbildung 54:	LKW-Vorbeifahrtpegel über der Geschwindigkeit in zwei Kategorien	89
Abbildung 55:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für LKW, Messpunkte 1 bis 10	91
Abbildung 56:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für LKW, Messpunkte 11 bis 20	92
Abbildung 57:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für LKW, Messpunkte 21 bis 30	93
Abbildung 58:	Vergleich Maximalpegel und SEL für LKW.....	94
Abbildung 59:	Mittlere Spektren der Maximalpegel (korrigiert), LKW.....	95
Abbildung 60:	Spektren in Geschwindigkeitskategorien (LKW)	96
Abbildung 61:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für Krafträder	97
Abbildung 62:	Vergleich Maximalpegel und SEL für Kraftrad.....	98
Abbildung 63:	Mittlere Spektren der Maximalpegel (korrigiert), Kraftrad.....	99
Abbildung 64:	Spektren in Geschwindigkeitskategorien (Kraftrad)	100
Abbildung 65:	Vergleich der Datensätze nach Fahrzeugklassen	101
Abbildung 66:	Vergleich der Regressionsgeraden nach Fahrzeugkategorie .	102
Abbildung 67:	Vergleich der Spektren nach Fahrzeugkategorie für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche	103

Abbildung 68:	MP4/MP13: Sanatoriumswiese (PKW, korrigierte Pegel)	104
Abbildung 69:	MP12/MP14: B17 (PKW, korrigierte Pegel).....	105
Abbildung 70:	Ergebnisse auf den DSH-V-Deckschichten.....	107
Abbildung 71:	Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für verschiedene Antriebstypen (PKW)	109
Abbildung 72:	Einfluss der Antriebstypen (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch	110
Abbildung 73:	Spektraler Einfluss der Antriebstypen.....	110
Abbildung 74:	Verschiedene Nennleistungskategorien (PKW).....	111
Abbildung 75:	Einfluss der Nennleistungskategorien (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch.....	112
Abbildung 76:	Verschiedene Hubraumkategorien (PKW)	114
Abbildung 77:	Einfluss der Hubraumkategorien (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch.....	116
Abbildung 78:	Verschiedene Fahrzeugmassekategorien (PKW).....	117
Abbildung 79:	Einfluss der Fahrzeugmassekategorien (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch.....	119
Abbildung 80:	Einfluss des Erstzulassungsjahres (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch.....	120
Abbildung 81:	Baum und Ladungsmatrix unterschiedlicher Fahrzeugparameter	121
Abbildung 82:	Vergleich der Regressionslinien für PKW in 2002, 2012 und 2022	124
Abbildung 83:	Vergleich der Spektren für PKW in 2012 und 2022	125
Abbildung 84:	Vergleich der Regressionslinien für LKW in 2012 und 2022...	126
Abbildung 85:	Vergleich der Regressionslinien für Krafträder in 2012 und 2022	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung der Messorte und -situationen	42
Tabelle 2:	SPB- und CPX-Pegeldifferenzen sowie -Unsicherheiten.....	50

Abkürzungsverzeichnis

AVAS	Acoustic Vehicle Alerting System. Wird bei Elektrofahrzeugen im niedrigen Geschwindigkeitsbereich verwendet.
CPX	Close-Proximity-Methode. Messmethode zur Bestimmung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche.
dB(A)	Decibel (A-bewertet)
DSH-V 5	Dünnschichtbelag im Heißeinbau mit Versiegelung, 5 mm Größtkorn
HV	Heavy vehicle
Krad	Kraftrad
$L_{AF,max}$	Maximaler Schalldruckpegel, Fast- und A-bewertet
LKW	Lastkraftwagen
MPx	Messpunkt mit Nummerierung x
PC	Passenger car
PC	Principal Component (Hauptkomponente)
PCA	Principal Component Analysis (Hauptkomponentenanalyse)
PKW	Personenkraftwagen
PTW	Powered two-wheelers
SEL	Sound Exposure Level
SPB	Statistical pass-by. Messmethode zur Bestimmung der Vorbeifahrtpegel.
SPL	Sound pressure level
TP KoSD-19	Technische Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten, Ausgabe 2019
UBA	Umweltbundesamt

Zusammenfassung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (i. F. UBA) wurden zur Fortschreibung einer langjährigen Zeitreihe die Geräuschemissionen einer großen Anzahl von Kfz mittels statistischer Vorbeifahrtmessung (SPB, nach DIN EN ISO 11819-1:2002) ermittelt. Die Messungen wurden an insgesamt 30 Messpunkten für jeweils ca. 1000 Fahrzeuge durchgeführt. Die Messungen fanden in den Jahren 2021 und 2022 statt. Die Messergebnisse ermöglichen es, Antworten auf eine Reihe an Fragestellungen zu geben, die für die Charakterisierung von Fahrzeuggeräuschen nötig sind.

Wie wurden die Messungen durchgeführt?

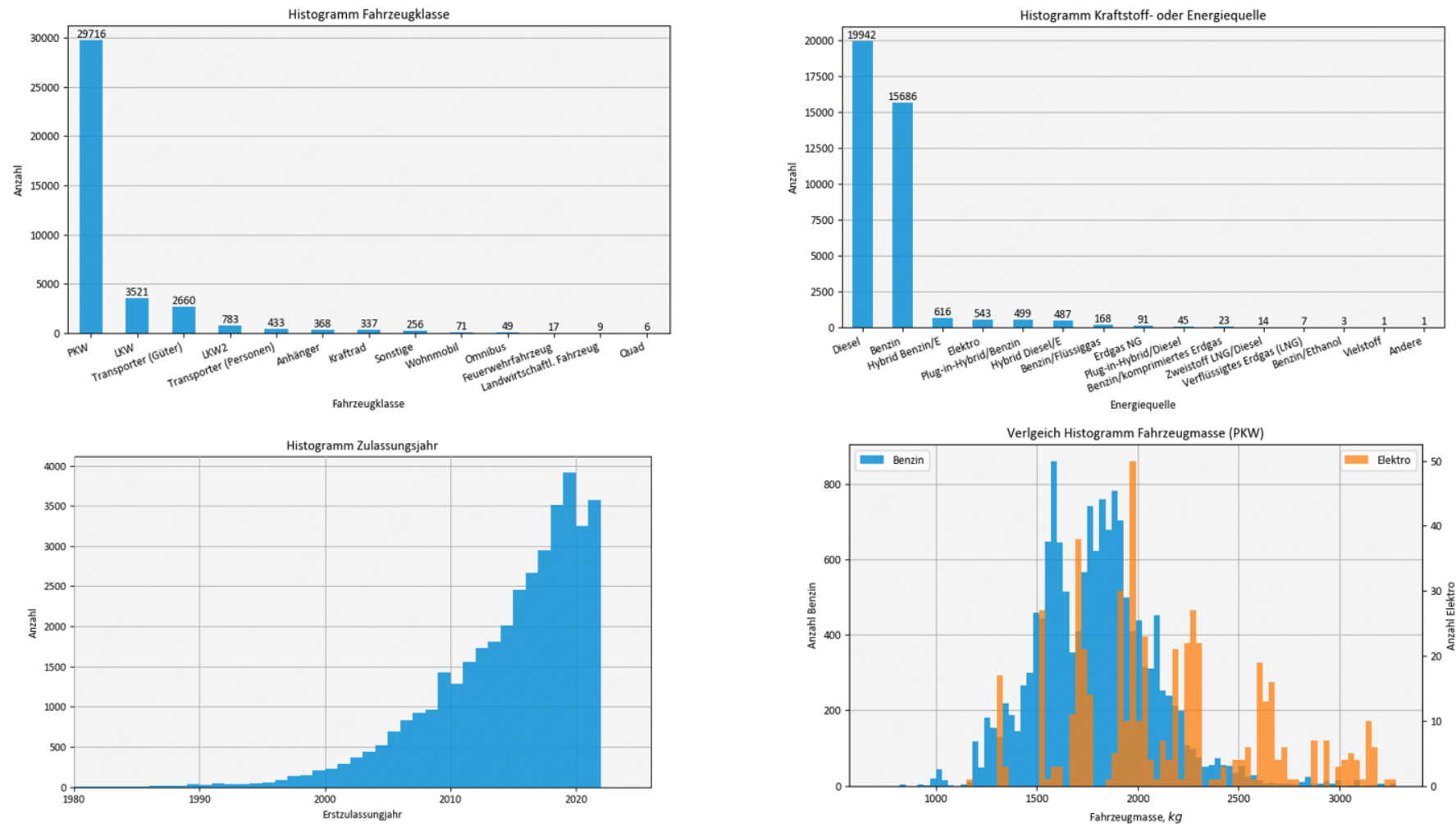
Für die Durchführung der SPB-Messungen wurde ein autonom arbeitendes Messsystem verwendet. Das Messsystem besteht aus mehreren Mikrofonen, einer Wetterstation, einem Geschwindigkeitsmessgerät (hier ausgeführt als Radarmessgerät) und einem Computer zur Steuerung der Messung und zur Datenaufzeichnung. Es wurden Mikrofone in drei verschiedenen Messhöhen verwendet (1,2 m, 3,0 m, 5,0 m), um Einflüssen der Bodenabsorption entgegenzuwirken. Über die Verwendung einer speziellen Anordnung von Mikrofonen und eines Algorithmus, der für die Messaufgabe entwickelt wurde, kann das Verfahren zur Vorbeifahrtmessung automatisiert durchgeführt werden. Zusätzlich wurde eine Kennzeichenerfassungskamera verwendet. Das Kraftfahrtbundesamt lieferte auf Basis der Kennzeichen unter anderem die Daten zu Fahrzeugklasse, Kraftstoff-/Energiequelle, Nennleistung, Hubraum und auch zulässiger Gesamtmasse jedes einzelnen Fahrzeugs.

Außerdem wurden Nahfeldmessungen mit einem Geräuschemessanhänger (CPX, nach DIN EN ISO 11819-2:2017) sowie Texturmessungen der Fahrbahnbeläge (nach DIN EN ISO 13473:2004) an den Messpunkten durchgeführt, um die akustischen Eigenschaften der Fahrbahnbeläge genauer zu charakterisieren.

Wie ist der ermittelte Datensatz zusammengesetzt?

Insgesamt wurden 40.114 Vorbeifahrten mit der SPB-Methode erfasst, die den Anforderungen einzelner Vorbeifahrten entsprechen und somit in die Auswertung der Daten eingehen. In Abbildung Z 1 sind statistische Auswertungen der Fahrzeuge in Bezug auf deren technische Eigenschaften dargestellt.

Abbildung Z 1: Verschiedene Verteilungen der Fahrzeugparameter

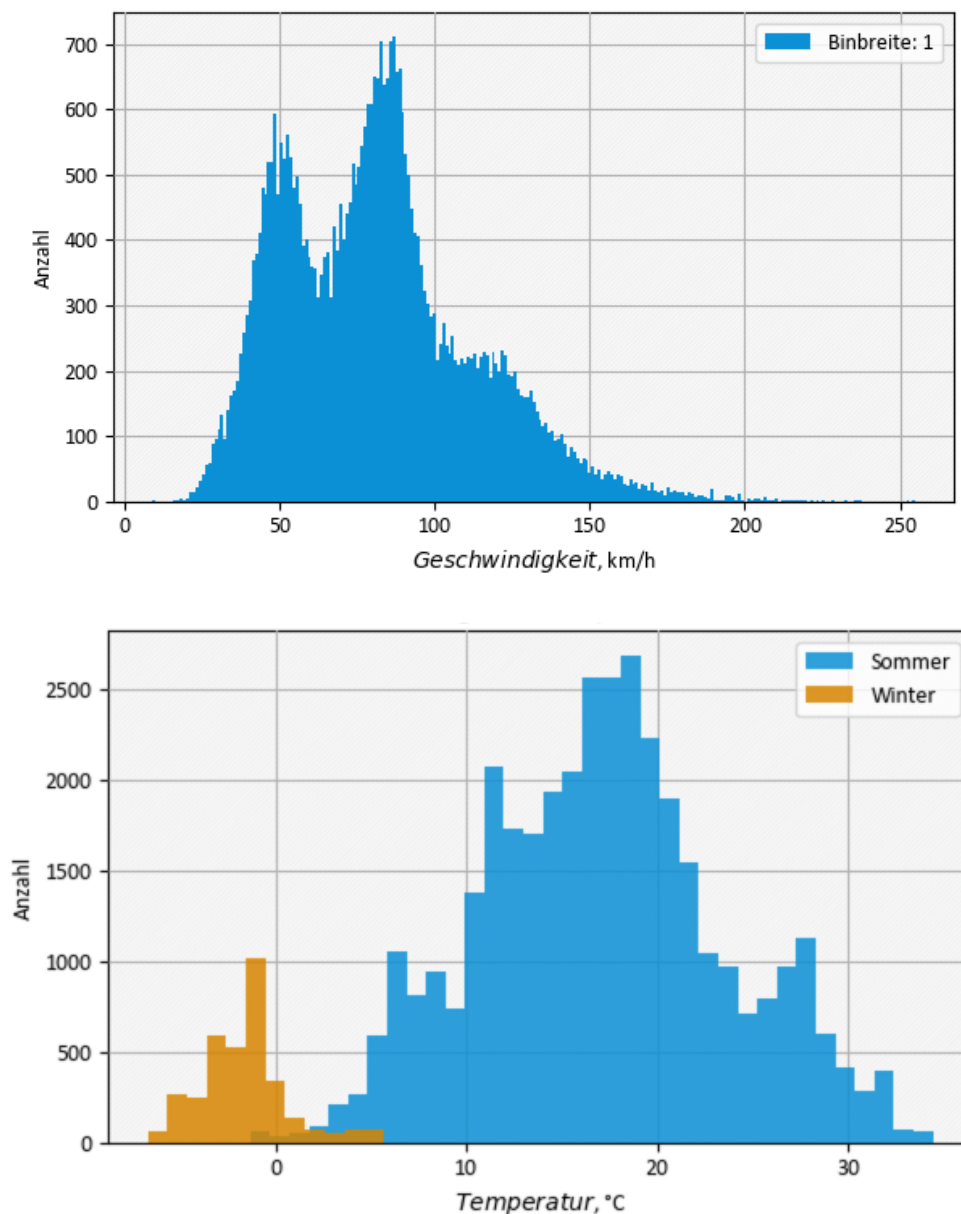


Links oben: Verteilung unterschiedlicher gemessener Fahrzeugklassen. Rechts oben: Verteilung der Kraftstoff-/Energiequellen aller gemessener Fahrzeuge. Links unten: Verteilung des Alters (laut Erstzulassungsjahr) aller gemessenen Fahrzeuge. Rechts unten: Vergleich der Verteilungen der zulässigen Gesamtmasse zwischen PKW mit Kraftstoff-/Energiequelle „Benzin“ und „Elektro“.
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Die Verteilungen im Messdatensatz liegen tatsächlich nah an denen der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge. In dem Datensatz können spezielle Ereignisse (z. B. Abwrackprämie 2009), spezifische Besonderheiten von Fahrzeugarten (Gewichtsverteilungen) und Veränderungen der Gesetze nachvollzogen werden. Auch der Anteil von E-Fahrzeugen in der Gesamtflotte wird repräsentativ erfasst.

Die Geschwindigkeiten und Lufttemperaturen zu jeder Vorbeifahrt sind im Datensatz wie in Abbildung Z 2 gezeigt verteilt. Es können Schwerpunktgeschwindigkeiten bei 50 km/h, 80 km/h und 120 km/h ausgemacht werden. Die Temperatur ist im positiven Bereich annähernd normalverteilt, im negativen Bereich (Wintermessungen) mit einem größeren Anteil knapp unter 0 °C.

Abbildung Z 2: Verteilungen von Messdaten

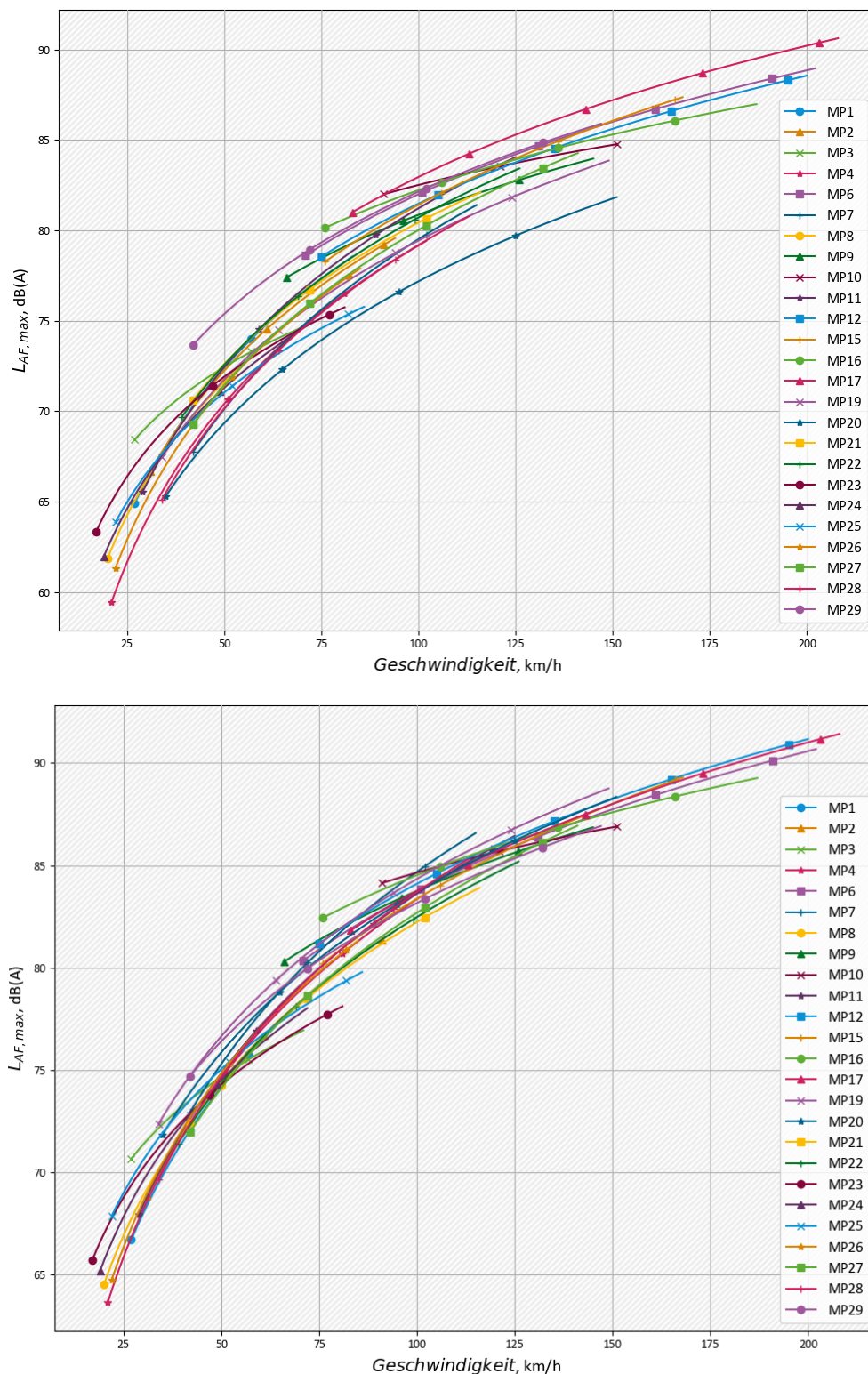


Verteilung der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten (oben) und Verteilung der zu jeder Vorbeifahrt gemessenen Lufttemperatur (unten). Blau: Sommer-Messungen, orange: Winter-Messungen.
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Wie wurde bei der Auswertung vorgegangen? Sind die Teildatensätze von verschiedenen Messpunkten vergleichbar?

Um die Geräuschemissionen von beispielsweise PKW zu beurteilen, wird der Maximalpegel über der Geschwindigkeit für jeden Messpunkt im Vergleich zum Gesamtdatensatz betrachtet. Die Geräuschemissionen können weiterhin mithilfe der Regressionslinien einer linearen Regression des Maximalpegels über logarithmische Geschwindigkeiten eingeordnet werden. In Abbildung Z 3 links sind die Regressionslinien der einzelnen Messpunkte zusammen dargestellt (ohne spezielle Sondersituationen wie Messungen an geräuschmindernden Deckschichten und Wintermessungen). Hier ist erkennbar, dass sich die Regressionslinien einzelner Messpunkte voneinander unterscheiden. Unterschiede von Messpunkt zu Messpunkt können in den meisten Fällen mit den unterschiedlichen akustischen Eigenschaften der Fahrbahnbeläge an den jeweiligen Messorten erklärt werden (über die CPX-Messungen und die Auswertungen der SPB-Messdaten nach dem TP KoSD-19-Verfahren nach TP KoSD-19). Verrechnet man die individuellen Messwerte mit den akustischen Eigenschaften der Deckschichten, die sich aus der TP KoSD-19 ergeben, so fallen die einzelnen Regressionsgeraden gut aufeinander (vgl. in Abbildung Z 3 rechts dargestellte Schar an Regressionslinien).

Abbildung Z 3: Regressionsgeraden einzeln pro Messpunkt



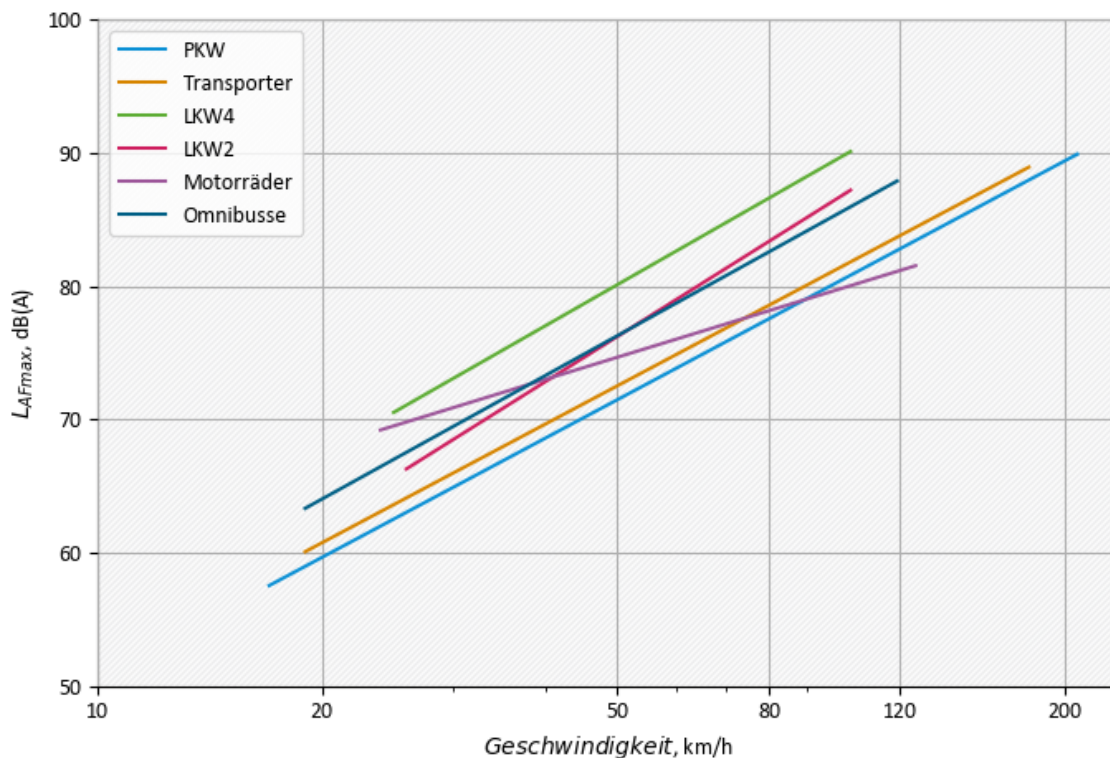
Oben: Vergleich der Einzelregressionslinien der verschiedenen Messpunkte für PKW. Unten: Vergleich der Einzelregressionslinien der verschiedenen Messpunkte für PKW nach Anwendung der Korrektur mit den Pegeldifferenzen aus der KoSD-Auswertung. Sondersituationen wie DSH-V-, Winter- und LKW-Messpunkte wurden hier ausgelassen (MP5, MP13, MP14, MP18 und MP30). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Neben den Maximalpegeln, die in den gängigen deutschen Regelwerken verwendet werden, könnten auch andere Pegelgrößen herangezogen werden. Ein Vergleich zwischen den Maximalpegeln und den errechneten Sound Exposure Level¹ (SEL) zeigt, dass die SEL-Werte beispielsweise weniger geschwindigkeitsabhängig sind und somit eine flachere Regressionskurve erzeugen.

Wie unterscheiden sich die Ergebnisse für verschiedene Fahrzeugklassen?

Der Vergleich der Regressionen aller Fahrzeugklassen, wie in Abbildung Z 4 dargestellt, zeigt sowohl unterschiedliche Absolutpegel als auch Geschwindigkeitsabhängigkeiten der verschiedenen Fahrzeugklassen. Für die Motorräder ergibt sich z. B. eine flachere Kurve als für PKW. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich bei Motorrädern keine nennenswerten Reifen-Fahrbahn-Geräusche ergeben, die eine starke Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweisen würden, sondern die dominante Quelle durch den Motor und Antriebsstrang gegeben ist. Für die Gruppe der LKW ergibt sich hingegen eine größere Steigung als für PKW.

Abbildung Z 4: Regressionsgeraden unterschiedlicher Fahrzeugklassen



Vergleich der Regressionsgeraden des Gesamtdatensatzes (Messhöhe 3 m, korrigiert auf 1,2 m Höhe) für unterschiedliche Fahrzeugkategorien. Dargestellt sind die Ergebnisse der Messdaten ohne die Winter- und DSH-V-Messpunkte. „LKW4“ steht für 4-achsige LKW und „LKW2“ steht für 2-achsige LKW. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

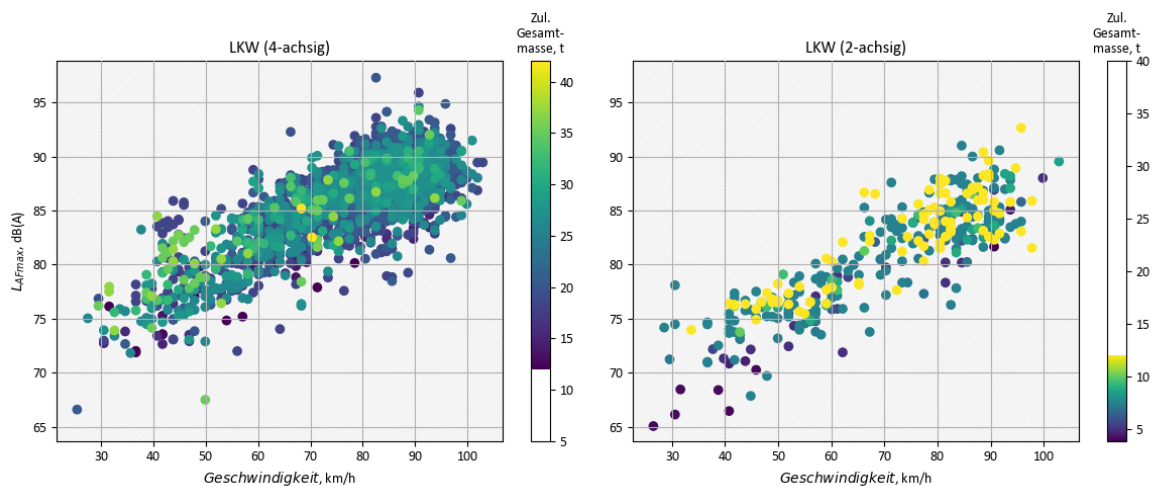
¹ Das Sound Exposure Level beschreibt die Energie eines Schallereignisses über einen definierten Zeitraum, hier die T₆-Zeit (die Zeit, in der der Schalldruckpegel um 6 dB steigt und wieder abfällt).

Gibt es Besonderheiten bei einzelnen Fahrzeugklassen wie LKW?

Die laut KBA nach „LKW“ kategorisierten Fahrzeuge müssen in Anlehnung an DIN EN ISO 11819-1:2002-05 vorerst in zweiachsige und vierachsige LKW aufgeteilt werden.

Abbildung Z 5 zeigt den maximalen Schalldruckpegel über der Geschwindigkeit für die beiden Kategorien nebeneinander, die zulässige Gesamtmasse der Fahrzeuge ist farblich codiert. Es ist klar erkennbar, dass die Anzahl der Achsen einen erheblichen Einfluss auf den gemessenen Schalldruckpegel hat, da die Punktwolke der vierachsigen LKW im Pegel höher angesiedelt ist als die der zweiachsigen LKW. Die Unterschiede der Fahrzeugmasse können hier ebenfalls zu diesem Einfluss beitragen.

Abbildung Z 5: Fahrzeugmasse von zweiachsigen und vierachsigen LKW

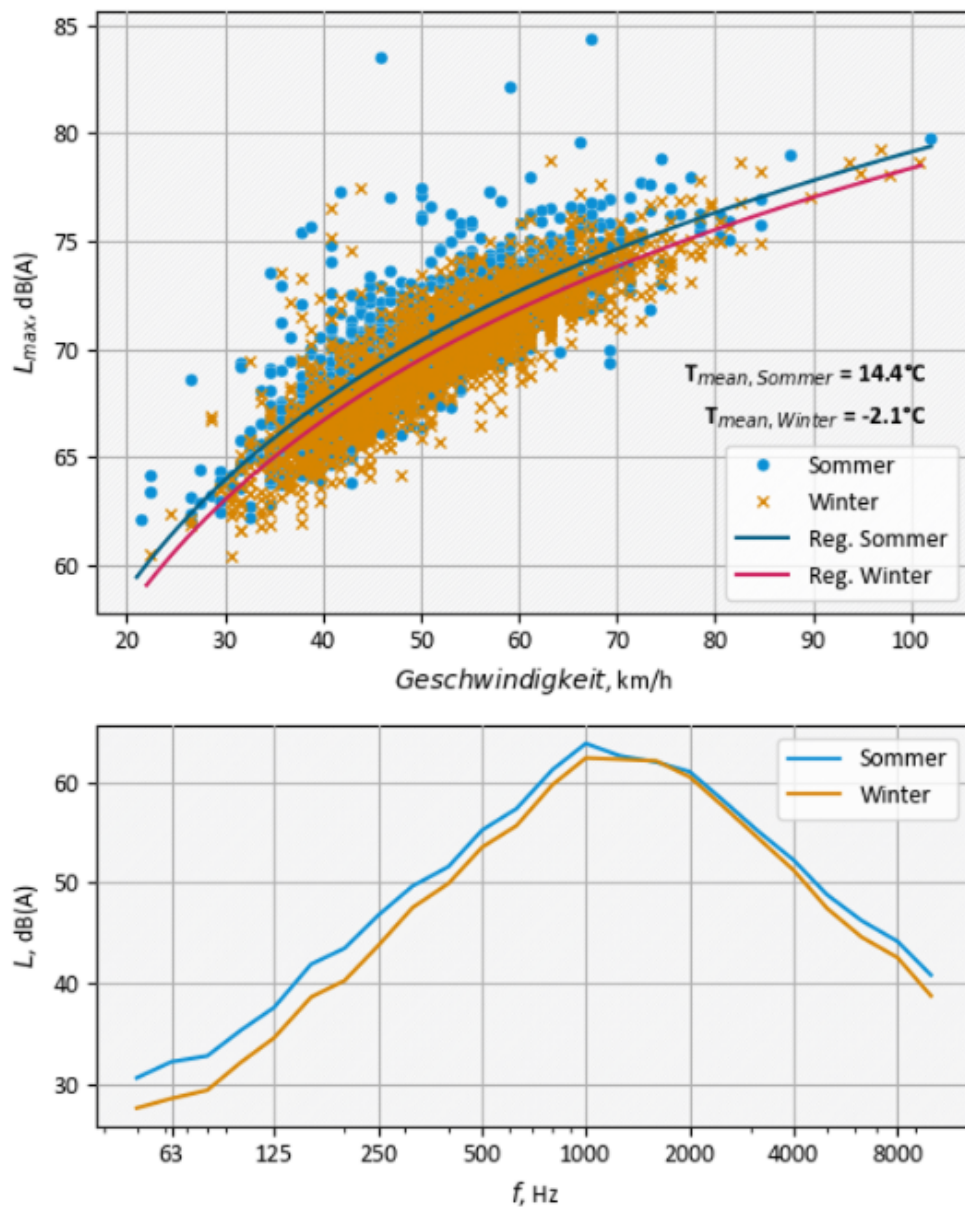


Veranschaulichung der Verteilung der gemessenen LKW über der Geschwindigkeit mit Einfluss der Masse auf den maximalen Schalldruckpegel. Links: vierachsige LKW, rechts: zweiachsige LKW, zulässige Fahrzeugmasse ist als Farbcodierung dargestellt. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Wie unterscheiden sich Vorbeifahrtpegel im Sommer und Winter?

Die Vergleichsmessungen im Winter zeigen, dass die Vorbeifahrtgeräuschpegel vor allem im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich bei der Wintermessung etwas tiefer liegen. Wir führen dies auf die weichere Gummimischung der Winterreifen zurück, die zu niedrigeren Schalldruckpegeln der Reifen-Fahrbahn-Geräusche führt, die offensichtlich einen stärkeren Einfluss auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch hat, als das gröbere Profil der Winterreifen (das wiederum zu höheren Pegeln führen würde). Es ist zu beachten, dass diese Ergebnisse auf Schalldruckpegeln nach Temperaturkorrektur basieren und die Temperaturkorrektur bei niedrigen Temperaturen groß ausfällt – auch dies kann einen Einfluss auf den Vergleich der Absolutpegel zueinander haben.

Abbildung Z 5: Vergleich von Sommer- und Wintermessergebnissen

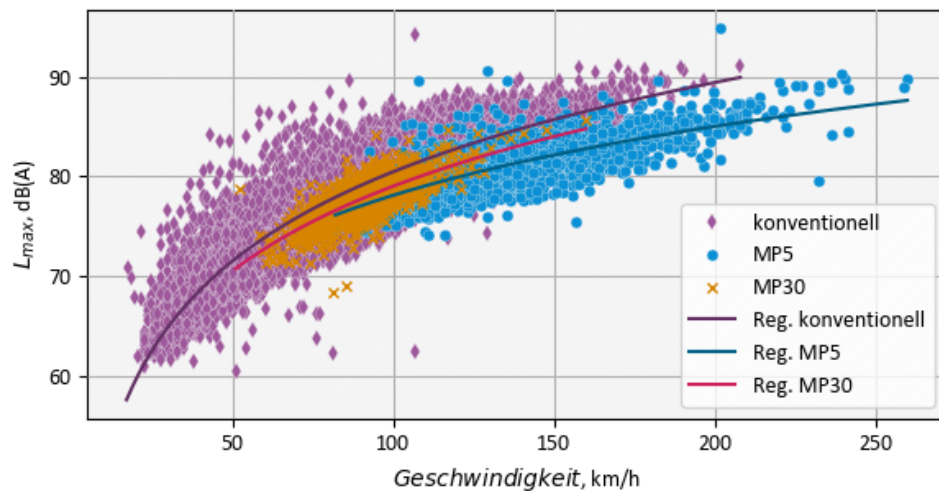


Vergleich der Messwerte an einem der Messpunkte (Sanatoriumswiese, MP4/MP13) im Sommer und im Winter für PKW. Oben: Maximalpegel über der Geschwindigkeit inkl. Regressionslinien, korrigiert nach Temperatur und Messhöhe, unten: mittlere Terzspektren. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Wirken sich geräuschmindernde Fahrbahnbeläge nennenswert aus?

Messungen an zwei geräuschmindernden DSH-V-Deckschichten mit 5 mm Größtkorn zeigen, dass sich trotz der langen Liegedauer der Deckschichten noch geräuschmindernde Eigenschaften ergeben, da die Einzelregressionen konsequent unter der Gesamtregressionslinie des Datensatzes für konventionelle Deckschichten für PKW liegen.

Abbildung Z 6: Vergleich der DSH-V-Deckschichten



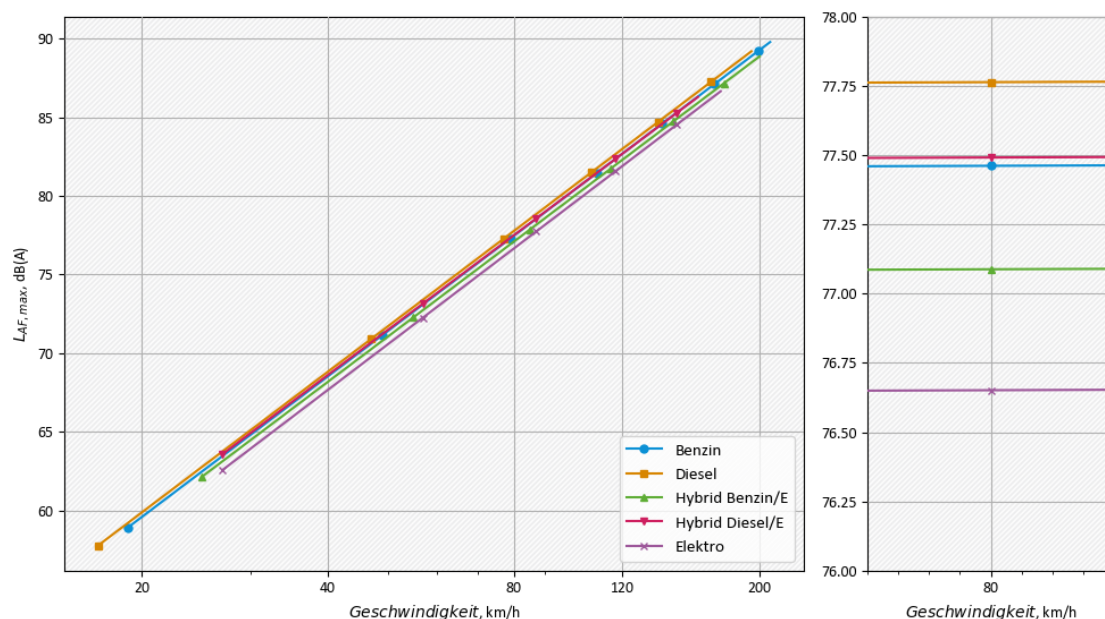
Vergleich der DSH-V-Messpunkte für PKW (verglichen mit dem Gesamtdatensatz für PKW auf SMA und Asphaltbetonoberflächen (konventionell)). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Gibt es spezifische Fahrzeugparameter innerhalb einer Fahrzeugklasse, die sich auf die Vorbeifahrtpegel auswirken?

Die Einflüsse unterschiedlicher Fahrzeugparameter wie Antriebsart, Nennleistung, Hubraum, zul. Gesamtmasse und Erstzulassungsjahr auf die Geräuschpegel zeigen in vielen Fällen signifikante Ergebnisse. Abbildung Z 7 zeigt exemplarisch die Regressionslinien des Gesamtdatensatzes verschiedener Antriebsarten von PKW über der Geschwindigkeit sowie bei 80 km/h. Es ist eine Abhängigkeit des Geräuschpegels vom Motortyp im gesamten Geschwindigkeitsbereich zu erkennen. Die Reihenfolge der Antriebsarten *von lauter zu leiser* ergibt sich zu:

Diesel → Hybrid/Diesel → Benzin → Hybrid/Benzin → Elektro

Abbildung Z 7: Regressionsgeraden unterschiedlicher Antriebstypen



Vergleich der Regressionsgeraden für PKW unterschiedlicher Kraftstoff-/Energiequellen. Links: über der Geschwindigkeit, rechts: für 80 km/h. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

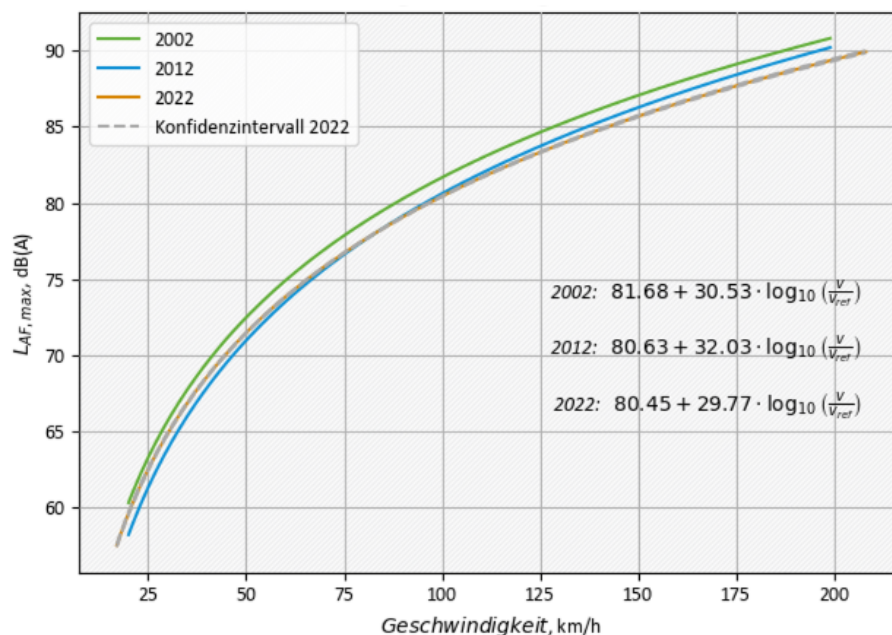
Für die Betrachtung der anderen genannten Fahrzeugparameter ergeben sich ebenfalls Abhängigkeiten. Es lässt sich zusammenfassen:

- ▶ Je größer die Nennleistung desto höher der Geräuschpegel
- ▶ Je größer der Hubraum desto höher der Geräuschpegel. Diese Abhängigkeit zeigt sich stärker bei niedrigeren Geschwindigkeiten als bei höheren Geschwindigkeiten.
- ▶ Je größer die Fahrzeugmasse desto höher der Geräuschpegel
- ▶ Das Erstzulassungsjahr hat keinen signifikanten Einfluss auf den Geräuschpegel.

Wie haben sich die Vorbeifahrtpegel in den letzten Jahrzehnten entwickelt?

Die Regressionsgeraden des Gesamtdatensatzes für PKW aus den Projekten aus den Jahren 2002, 2012 und 2022 sind in Abbildung Z 8 dargestellt. Während von 2002 auf 2012 noch ein Rückgang des mittleren Geräuschpegels von ca. 1 dB auszumachen war, liegt die Kurve für 2022 nur leicht verkippt auf der Kurve der Vorgängerkampagne 2012. Die Entwicklung des Geräuschverhaltens über die letzten 20 Jahre lässt vermuten, dass die Grenzwertverschärfung nach altem Verfahren (Veränderung zwischen 2002 und 2012) mehr Auswirkung auf den Geräuschpegel hatte als die Umstellung des Messverfahrens (seit 2016) mit anschließenden weiteren Verschärfungen. Aufgrund der zunehmenden Ausschöpfung des Geräuschminderungspotenzials von Fahrzeugen² ist zu erwarten, dass die Reduzierung der Geräuschpegel asymptotisch hin zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch verläuft, welches mittlerweile den dominanten Geräuschanteil vieler PKW in einem breiten Geschwindigkeitsbereich ausmacht.

Abbildung Z 8: Vergleich der Messkampagnen



Vergleich der Regressionslinien des Gesamtdatensatzes für PKW in den Messkampagnen 2002, 2012 und 2022. $v_{ref} = 100$ km/h. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

² Bezüglich beispielsweise Dämmung von Motorengeräuschen, Verbesserung der Aerodynamik etc.

Wenn man die bevorstehenden technischen Veränderungen/Weiterentwicklungen von Fahrzeugen antizipiert: Welchen Einfluss könnten diese zukünftig auf die Schallemissionen von Fahrzeugen haben?

Um auf Basis der gefundenen Erkenntnisse aus der durchgeführten Messkampagne auf das zukünftige Geräuschverhalten extrapolieren zu können, wurden die aktuell relevantesten Trends in der Automobilindustrie durch Gespräche mit Experten der Homologation identifiziert. Diese sind unter anderem:

- ▶ Zunahme der Anzahl an Elektrofahrzeugen
- ▶ Zunahme der Fahrzeugmasse bei PKW unter anderem durch das Batteriegewicht
- ▶ Abnahme von Motorengeräuschen auch bei niedrigeren Geschwindigkeiten und damit einhergehend die zunehmende Dominanz der Reifen-Fahrbahn-Geräusche
- ▶ Keine signifikante Änderung der Fahrzeuggewichte bei LKW
- ▶ Möglicherweise Verstetigung des Verkehrsflusses durch autonomes Fahren in einem langfristigen Kontext (> 10 Jahre) und damit einhergehend eine Verringerung der Schallemissionen im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich

Die genannten Trends könnten teilweise zu einer Verringerung und teilweise zu einer Erhöhung der Vorbeifahrtpegel beitragen. In der Summe der identifizierten Trends und deren Auswirkungen kann für PKW eine geringfügige Verringerung des Vorbeifahrtpegels von Einzelfahrzeugen prognostiziert werden, falls sich die Trends (inkl. dem autonomen Fahren) tatsächlich wie erwartet durchsetzen.

Welche Schlussfolgerungen lassen sich aus den Erkenntnissen ziehen?

Die Aufarbeitung des gemessenen Datensatzes, der Vergleich mit den statistisch erfassten Zulassungszahlen und die Gespräche mit den Experten haben gezeigt, dass der Fahrzeugmarkt und damit auch die tatsächlich verkehrende Fahrzeugflotte einem starken Wandel unterliegt. Insbesondere werden nun nach und nach sehr viele neue Elektro-Fahrzeuge und Plug-In-Hybride zugelassen³. Die Ergebnisse der Studie haben einerseits gezeigt, dass sich zumindest im PKW-Sektor die Gesamtregression seit der letzten Untersuchung vor ca. 10 Jahren kaum verändert hat, andererseits die Elektrofahrzeuge aber einen niedrigeren Vorbeifahrtpegel aufweisen als die konventionellen Verbrenner. Im Segment der Elektrofahrzeuge sind die Veränderungen der Fahrzeugkonzepte bzw. deren Adaption auf die Marktanforderungen nach unserem Verständnis noch sehr dynamisch und das Angebot ist weit weniger konsolidiert, als dies im Verbrenner-Segment der Fall ist. Das Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte wird sich mit zunehmender Elektrifizierung der Fahrzeuge verändern. Ob sich der mittlere Geräuschpegel dadurch signifikant verringert, ist nicht eindeutig prognostizierbar und muss durch zukünftige Messkampagnen festgestellt werden.

³ Kraftfahrt-Bundesamt – Pressemitteilungen – Fahrzeugzulassungen im Dezember 2022 – Jahresbilanz (kba.de)

Summary

On behalf of the German federal agency of environment „Umweltbundesamt“ (UBA), the noise emissions of a large number of vehicles were determined by means of statistical pass-by measurements (SPB, according to DIN EN ISO 11819-1:2002) in order to update a long-term time series. The measurements were carried out at a total of 30 measurement points for approx. 1000 vehicles each. The measurements took place in the years 2021 and 2022. The measurement results make it possible to provide answers to a number of questions that are necessary for the characterization of vehicle noise.

How were the measurements conducted?

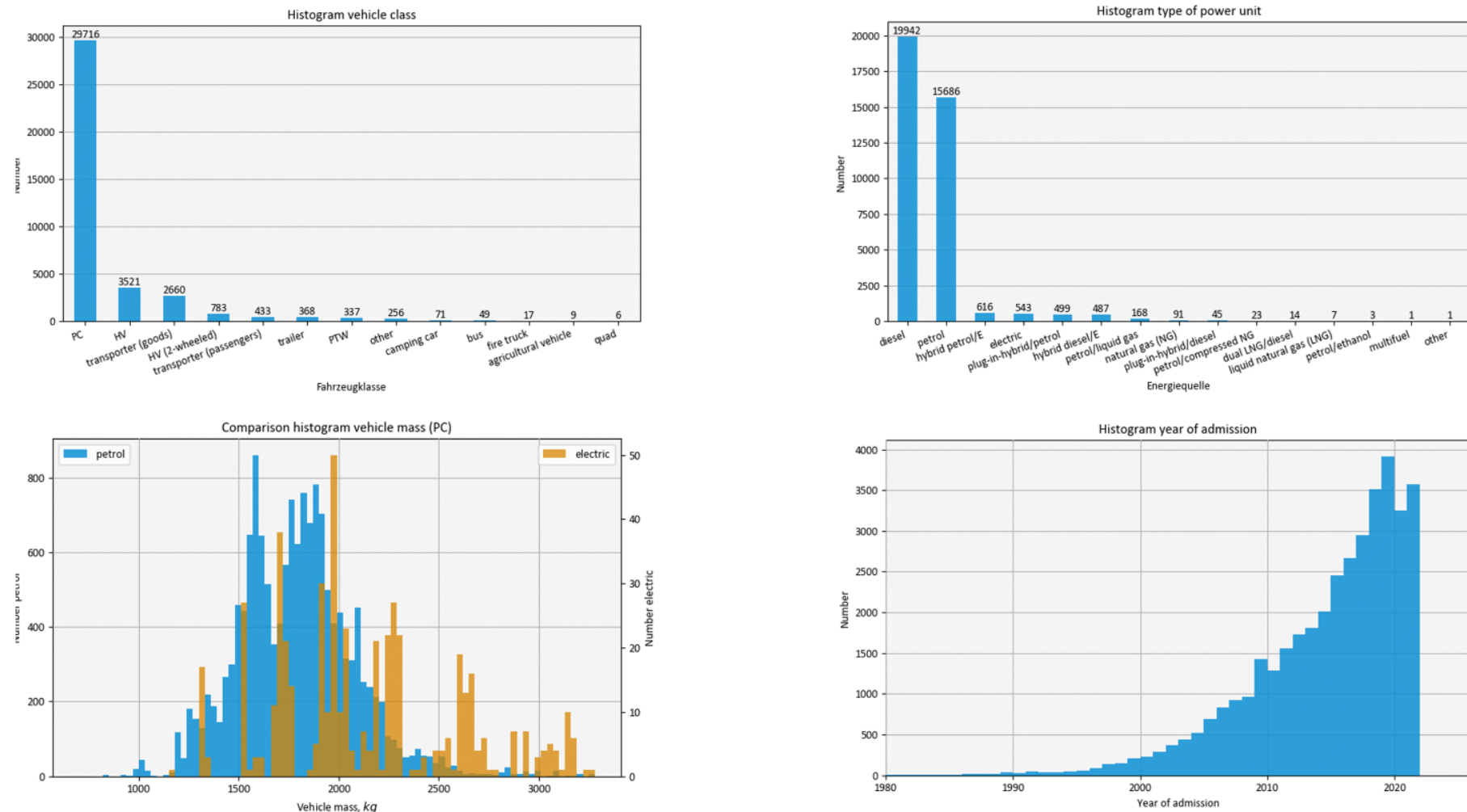
An autonomously operating measurement system was used to carry out the SPB measurements. The measurement system consists of several microphones, a weather station, a speed measuring device (here designed as a radar measuring device) and a computer to control the measurement and to record the data. Microphones were used at three different measurement heights (1.2 m, 3.0 m, 5.0 m) to counteract the effects of ground absorption. By using a special arrangement of microphones and an algorithm developed for the measurement task, the pass-by measurement procedure can be automated. In addition, a license plate recognition camera was used. The German Federal Motor Transport Authority provided amongst other data on the vehicle class, fuel/energy source, nominal power, engine capacity and also permissible total mass of each individual vehicle on the basis of the license plates.

In addition, near-field measurements with a noise measurement trailer (CPX, according to DIN EN ISO 11819-2:2017) as well as texture measurements of the road surfaces (according to DIN EN ISO 13473:2004) were carried out at the measurement points in order to characterize the acoustic properties of the road surfaces in more detail.

What is the composition of the determined data set?

A total of 40,114 pass-bys were recorded using the SPB method, which comply with the requirements and are therefore included in the evaluation of the data. Figure 1 shows statistical evaluations of the vehicles in relation to their technical characteristics.

Figure 1: Different distributions of the vehicle parameters

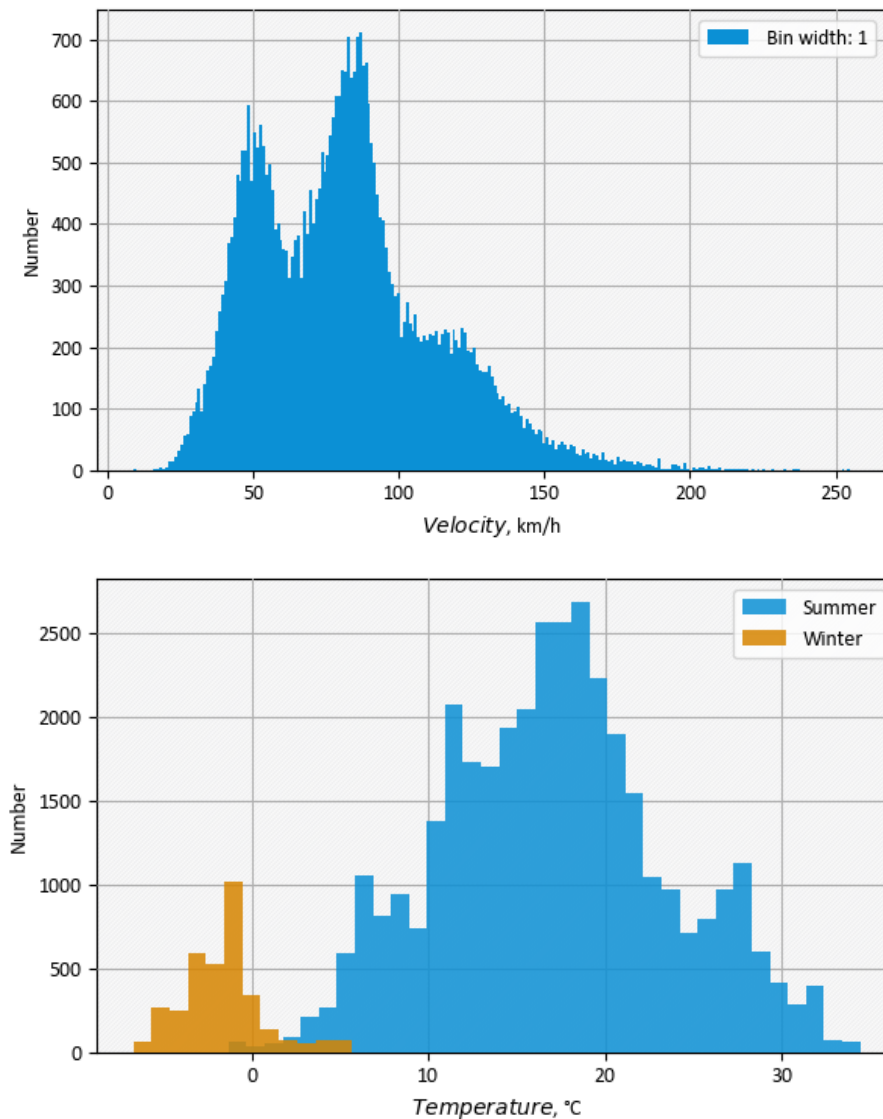


Upper left: distribution of the different measured vehicle classes. Upper right: distribution of the type of power unit of all measured vehicles. Lower left: distribution of the age (acc. to year of registration) of all measured vehicles. Lower right: comparison of the distributions of the vehicle mass between passenger cars with power unit „petrol“ and „electro“. (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

The distributions in the measurement dataset are close to the actual distributions of vehicles registered in Germany. In the data set, earlier events (e. g. “Abwrackprämie” 2009), specific features of vehicle types (weight distributions) and changes in legislation etc. can be retraced. The percentage of electric vehicles is recorded in a representative manner.

The velocities and air temperatures at each pass-by are distributed as shown in Figure 2. Accumulated mean velocities can be identified at 50 km/h, 80 km/h and 120 km/h. The temperature is approximately normally distributed in the positive range, in the negative range (winter measurements) with a larger proportion just below 0 °C.

Figure 2: Distribution of measurement data

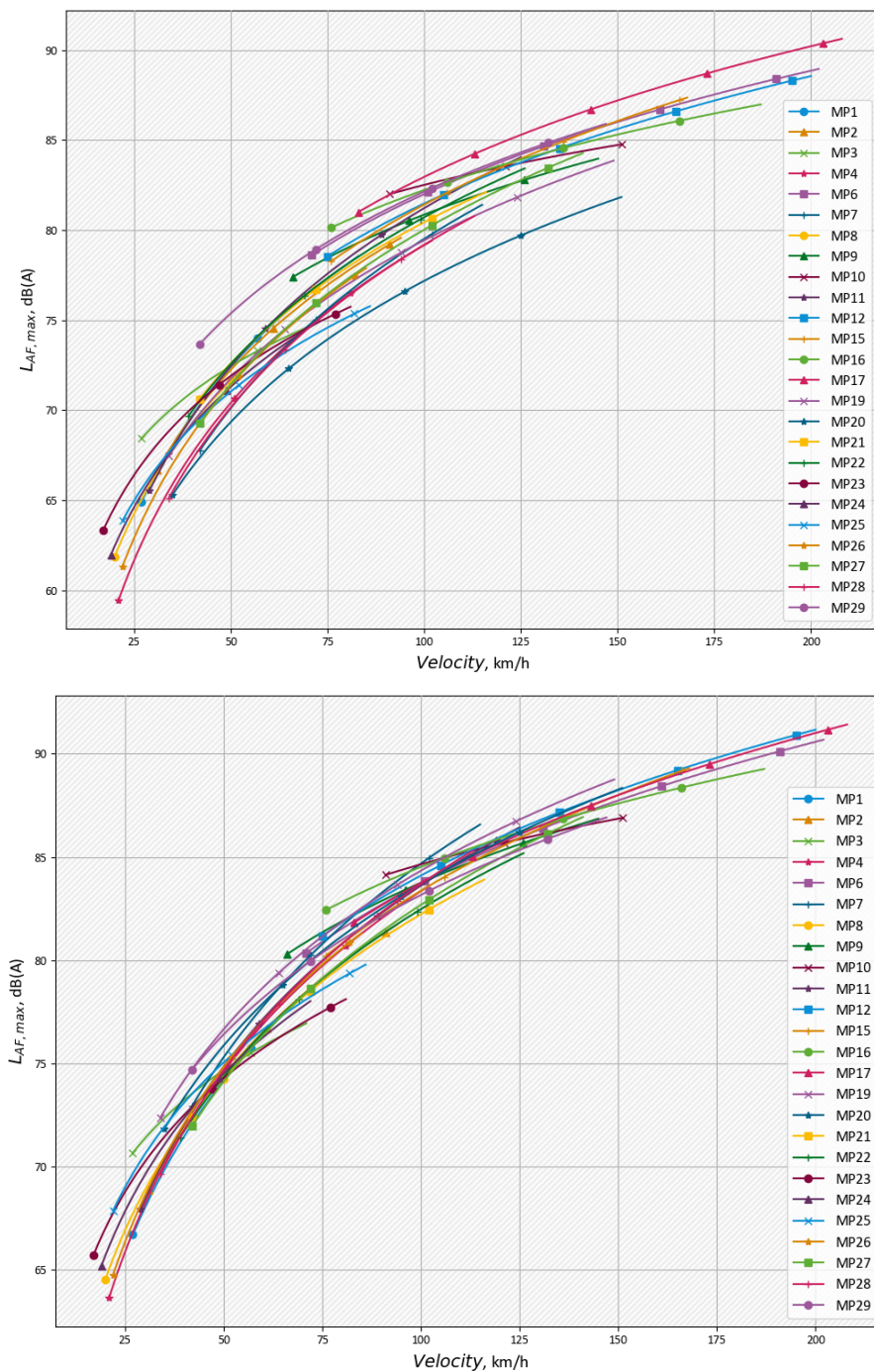


Distribution of measured vehicle speeds (top) and distribution of air temperature measured at each pass (bottom). Blue: summer measurements, orange: winter measurements. (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

How was the evaluation carried out? Are the partial data sets from different measurement points comparable?

To evaluate the noise emissions of PC, the maximum level is plotted over the velocity for each measurement location in comparison to the total data set. The noise emissions can be described by the regression line of a linear regression of the maximal level over logarithmic speed. Figure 3 shows the regression lines of each measurement location in comparison to one another (without special situations such as measurements on noise-reducing surface layers and winter measurements). It can be noticed that the regression lines of individual measurement points differ from each other. Differences between measurement points can in most cases be explained by the acoustic properties of the road surfaces (via the CPX measurements and the evaluations of the SPB measurement data according to the TP KoSD-19 method TP KoSD-19). If the individual measured values are corrected with the acoustic properties of the surface layers resulting from TP KoSD-19, the individual regression lines coincide well (cf. the group of regression lines shown on the right in Figure 3).

Figure 3: Regression lines individually per measurement point



Top: Comparison of the individual regression lines of the different measurement points for cars. Bottom: Comparison of the individual regression lines of the different measuring points for cars after applying the correction with the level differences from the KoSD evaluation. Special situations such as DSH-V, winter and truck measuring points were omitted here (MP5, MP13, MP14, MP18 and MP30). (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

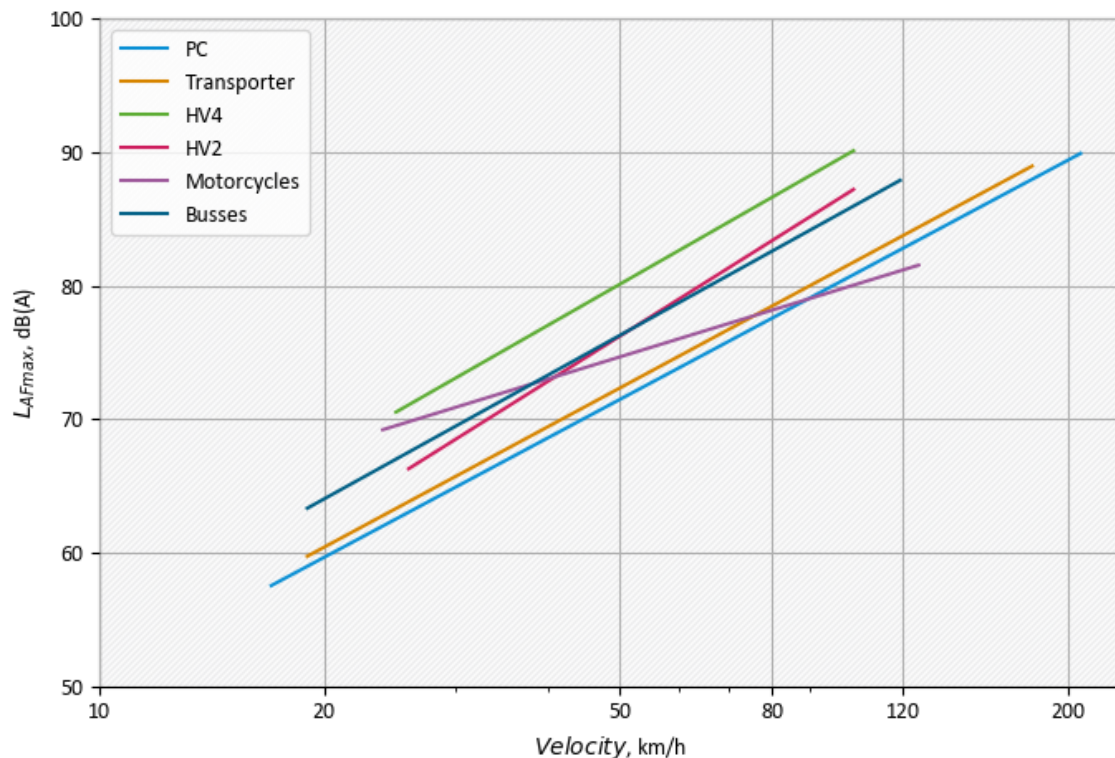
In addition to the maximum levels used in the current German regulations, other level values could also be used. A comparison between the maximum levels and the calculated Sound

Exposure Levels⁴ (SEL) shows that the SEL values, for example, are less speed-dependent and thus produce a flatter regression curve.

How do the results differ for different vehicle classes?

The comparison of the regressions of all vehicle classes, as shown in Figure 4, shows both different absolute levels as well as speed dependencies of the different vehicle classes. For motorcycles, for example, the curve is flatter than for passenger cars. This can be attributed to the fact that motorcycles do not produce any significant tire-road noise that would show a strong dependency on speed, but the dominant source is provided by the engine and drive train. For the group of trucks, on the other hand, there is a greater slope than for passenger cars.

Figure 4: Regression lines of different vehicle classes



Comparison of the regression lines of the total data set (measurement height 3 m, corrected to 1.2 m height) for different vehicle categories. Shown are the results of the measurement data without the winter and DSH-V measurement points.

“HV4” stands for 4-axle HV and “HV2” stands for 2-axle HV. (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

⁴ The Sound Exposure Level describes the energy of a sound event over a defined period of time, here the T_6 time (the time in which the sound pressure level rises and falls again by 6 dB).

Are there special features for individual vehicle classes such as heavy vehicles?

The vehicles categorized as "heavy vehicles" according to the KBA must first be divided into two-axle and four-axle vehicles based on DIN EN ISO 11819-1:2002-05.

Figure 5 shows the maximum sound pressure level above speed for the two categories side by side, the total permissible mass of the vehicles is color-coded. It is clearly visible that the number of axles has a significant influence on the measured sound pressure level, as the point cloud of the four-axle trucks is higher in level than that of the two-axle trucks. The differences in vehicle mass may also contribute to this influence here.

Figure 5: Vehicle mass of two-axle and four-axle trucks

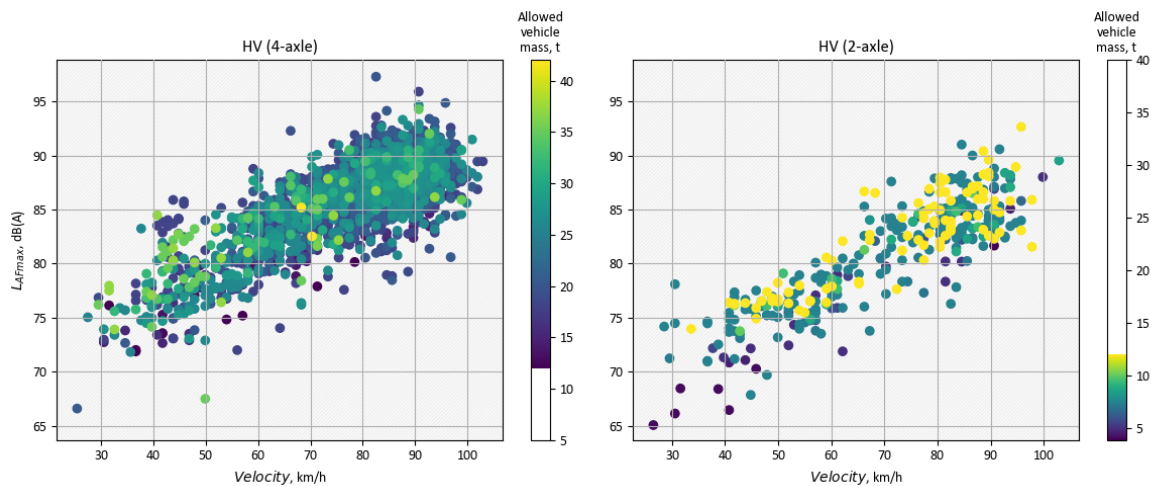


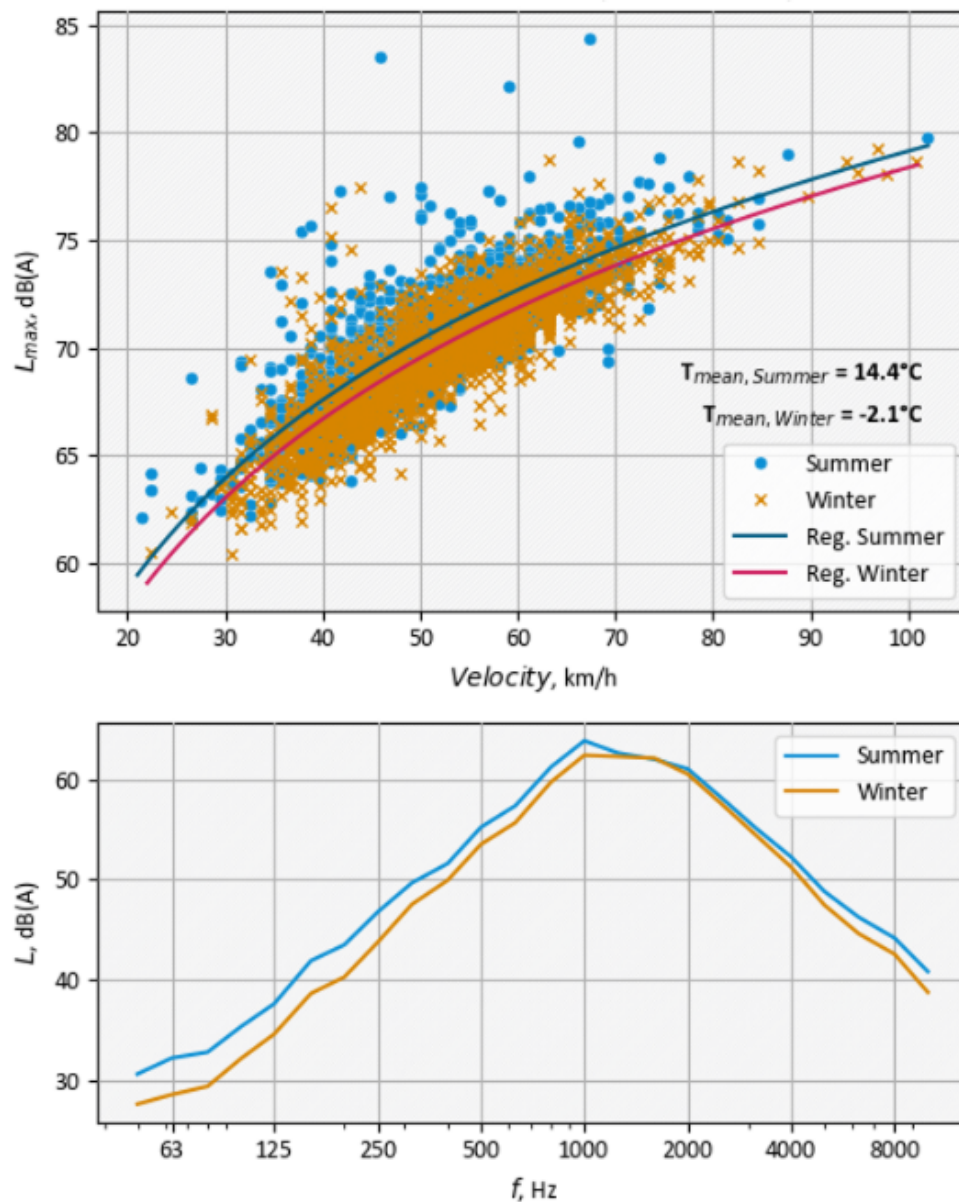
Illustration of the distribution of the measured trucks over the speed with influence of the mass on the maximum sound pressure level. Left: four-axle trucks, right: two-axle trucks, permissible vehicle mass is shown as color coding.

(Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

How do pass-by levels differ in summer and winter?

The comparative measurements in winter show that the pass-by noise levels are somewhat lower in the winter measurement, especially in the low and medium speed range. We attribute this to the softer rubber compound of the winter tires resulting in lower tire-road noise sound pressure levels, which obviously has a stronger influence on tire-road noise than the coarser tread of the winter tires (which in turn would result in higher levels). It should be noted that these results are based on sound pressure levels after temperature correction and that the temperature correction is large at low temperatures – this may also have an influence on the comparison of the absolute levels to each other.

Figure 6: Comparison of summer and winter measurement results

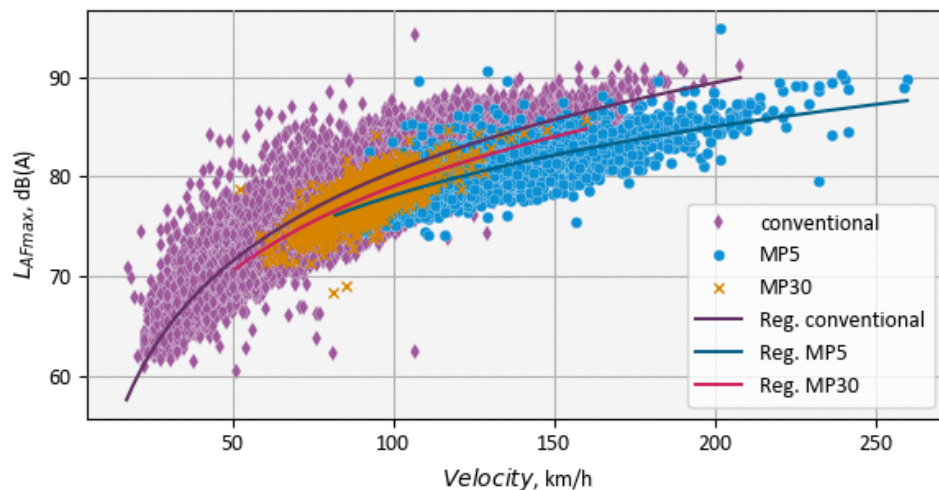


Comparison of the measured values at one of the measuring points (Sanatoriumswiese, MP4/MP13) in summer and winter for passenger cars. Top: Maximum level above speed incl. regression lines, corrected for temperature and measurement height, bottom: mean third octave spectra. (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Do noise-reducing road surfaces have a significant effect?

Measurements on two noise-reducing thin layer asphalt surfaces (DSH-V) with a maximum aggregate size of 5 mm show that noise-reducing properties are still obtained despite the long service life of the surfaces, since the individual regressions are consistently below the overall regression line of the data set for conventional surfaces for passenger cars.

Figure 7: Comparison of the DSH-V surfaces



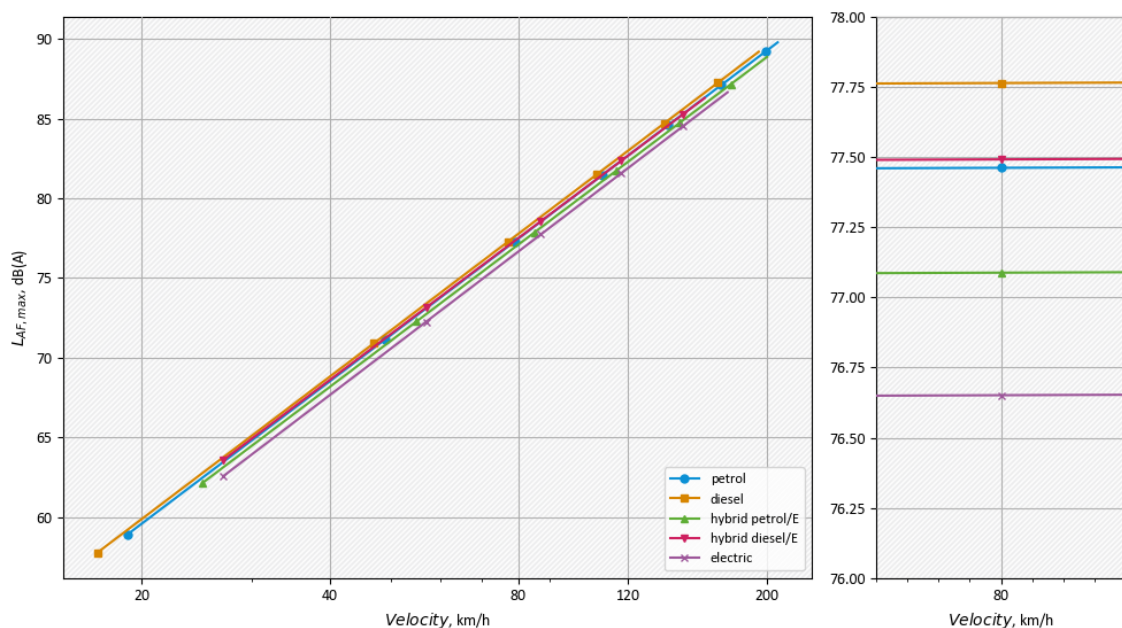
Comparison of DSH-V measurement points for passenger cars (compared to the total data set for passenger cars on SMA and asphalt concrete surfaces (conventional)). (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Are there specific vehicle parameters within a vehicle class that affect pass-by levels?

The influence of different vehicle parameters such as type of power unit, nominal power, engine capacity, permissible total mass and year of first registration on the noise levels show significant results in many cases. Figure 8 shows an example of the regression lines of the total data set of different power unit types of passenger cars above speed as well as at 80 km/h. A dependence of the noise level on the engine type can be seen in the entire speed range. The order of the drive types from louder to quieter is as follows:

Diesel → Hybrid/Diesel → Petrol → Hybrid/Petrol → Electric

Figure 8: Regression lines of different types of power unit



Comparison of the regression lines for passenger cars of different fuel/energy sources. Left: above speed, right: for 80 km/h. (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

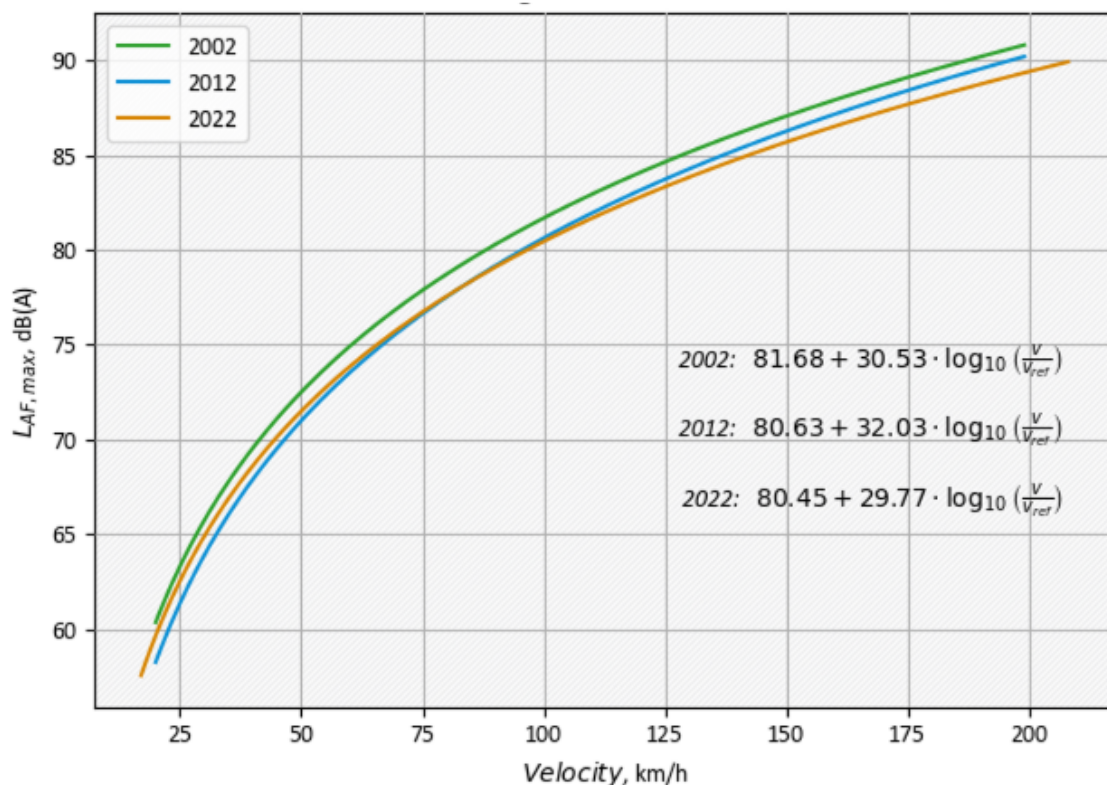
There are also dependencies when considering the other mentioned vehicle parameters. The following can be summarised:

- ▶ the larger the rated power, the higher the noise level
- ▶ the larger the cubic capacity, the higher the noise level. This dependency is more prominent at lower velocities than at higher velocities.
- ▶ the larger the vehicle mass, the higher the noise level
- ▶ the year of admission does not seem to have a significant influence on the noise level.

How have the pass-by levels developed over the last decades?

The regression lines of the total data set for passenger cars from the projects from the years 2002, 2012 and 2022 are shown in Figure 9. While a decrease in the average noise level of approx. 1 dB could be observed from 2002 to 2012, the curve for 2022 is only slightly tilted on the curve of the previous campaign in 2012. The development of the noise behavior over the last 20 years suggests that the lowering of the limit values according to the old procedure (change between 2002 and 2012) had more effect on the noise level than the change of the measurement procedure (since 2016) with subsequent further lowering of the limits. Due to the increasing exhaustion of the noise reduction potential of vehicles⁵, it is to be expected that the reduction of noise levels asymptotically converges towards the tire-road noise, which meanwhile constitutes the dominant noise component of many passenger cars in a wide speed range.

Figure 9: Comparison of the measurement campaigns



Comparison of the regression lines of the total data set for passenger cars in the measurement campaigns 2002, 2012 and 2022. $v_{ref} = 100$ km/h. (Source: own depiction, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

⁵ Regarding, for example, the damping of engine noise, improvement of aerodynamics etc.

Anticipating the upcoming technical changes/developments of vehicles: What influence could these have on the sound emissions of vehicles in the future?

In order to be able to extrapolate future noise behavior on the basis of the findings from the measurement campaign, the most relevant current trends in the automotive industry were identified through discussions with homologation experts. These are among others:

- ▶ increase of the number of electric vehicles
- ▶ increase in vehicle mass due to, among other things, battery weight
- ▶ decrease of engine noise also at lower velocities and thus the increasing dominance of the tire-road noise
- ▶ no significant change in vehicle mass for heavy vehicles
- ▶ possible manifestation of the traffic flow due to autonomous driving in a long-term perspective (> 10 years) and thus a decrease in noise emissions in the low and medium velocity range

The aforementioned trends could partly contribute to a reduction and partly to an increase of the pass-by levels. In the sum of the identified trends and their effects, a slight reduction in the pass-by level of individual vehicles can be predicted for passenger cars if the trends (including autonomous driving) actually take hold as expected.

What conclusions can be drawn from the findings?

The processing of the measured data set, the comparison with the statistically recorded registration figures, and the discussions with the experts have shown that the vehicle market and thus also the vehicle fleet is subject to heavy change. In particular, a very large number of new electric vehicles and plug-in hybrids are now gradually being admitted⁶. On the one hand, the results of the study have shown that, at least in the passenger car sector, the overall regression has hardly changed since the last study approx. ten years ago, but on the other hand, electric vehicles have a lower pass-by level than conventional internal combustion vehicles. In the electric vehicle segment, the changes in vehicle concepts or their adaptation to market requirements are, as we understand it, still very dynamic and the supply is far less consolidated than is the case in the internal combustion vehicle segment. The noise behavior of the German vehicle fleet will change with increasing electrification of the vehicles. Whether this will result in a significant reduction in the average noise level cannot be clearly predicted and must be determined by future measurement campaigns.

⁶ Kraftfahrt-Bundesamt – Pressemitteilungen – Fahrzeugzulassungen im Dezember 2022 – Jahresbilanz (kba.de)

1 Situation und Aufgabenstellung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes (i. F. UBA) wurden zur Fortschreibung einer langjährigen Zeitreihe die Geräuschemissionen einer großen Anzahl von Kfz mittels statistischer Vorbeifahrtmessung ermittelt. Die Messungen wurden an insgesamt 30 Messpunkten für jeweils ca. 1000 Fahrzeuge in Anlehnung an DIN EN ISO 11819-1:2002 (SPB-Messverfahren) durchgeführt. Zusätzlich zu den akustischen Messungen wurden die meteorologischen Randbedingungen, die Fahrzeuggeschwindigkeit, der Abstand zum Messmikrofon und das amtliche Kennzeichen des Fahrzeugs aufgezeichnet. Außerdem wurden Messungen nach dem in DIN EN ISO 11819-2:2017-10: „Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren“, 2017, beschriebenen Verfahren (CPX) DIN EN ISO 11819-2:2017 sowie Texturmessungen des Fahrbahnbelages DIN EN ISO 13473:2004 durchgeführt.

Das Projekt setzt die beim UBA vorhandene Zeitreihe zur Fahrzeuggeräuschemissionen fort, die in einem ca. zehnjährigen Rhythmus fortgeschrieben wird.

1.1 Projektstruktur

Das Projekt wurde in folgende Arbeitspakete aufgeteilt.

Arbeitspaket 1:

Sichtung der Messorte der Messkampagne von 2011, Überprüfung der Messorte auf Eignung für die geplante Messkampagne, ggf. Ermittlung alternativer Messorte in Abstimmung mit dem UBA und Einholen der Messgenehmigungen

Arbeitspaket 2:

Vorbeifahrtmessungen an 30 Messpunkten nach der SPB-Methode, Durchführung von Texturmessungen der Fahrbahnbeläge, Auswertung der Daten durch Regressionsanalysen sowie Untersuchung von Abhängigkeiten einzelner Fahrzeugparameter

Arbeitspaket 3:

Durchführung von Messungen nach der CPX-Methode im Umfeld der SPB-Messungen, Auswertung der CPX-Ergebnisse und des SPB-Gesamtdatensatzes nach der KoSD-Methode TP KoSD-19, Anwendung der KoSD-Ergebnisse auf den Gesamtdatensatz

Arbeitspaket 4:

Ableitung eines Sound Exposure Levels (SEL) als zusätzliches Kriterium neben dem Maximalpegel zur Auswertung und Analyse der Messdaten

Arbeitspaket 5:

Erstellung von Zwischenberichten im Sechs-Monats-Turnus, des Abschlussberichts und weiterer Dokumente (Kurzfassung etc.).

1.2 Zeitlicher Ablauf

Die Messungen fanden in den Jahren 2021 und 2022 vornehmlich in der Sommerperiode statt. Einzelne SPB-Messungen wurden auch im Winter 2021/22 durchgeführt. Hier sollten die Fahrzeuggeräuschemissionen bei der Verwendung von Winterreifen untersucht werden.

Vor der Durchführung der Messungen wurde im Winter 2020/21 das autonom arbeitende Messsystem vorbereitet, im Winter 2022/23 wurden die Ergebnisse ausgewertet und im Frühjahr 2023 zum Bericht zusammengefasst.

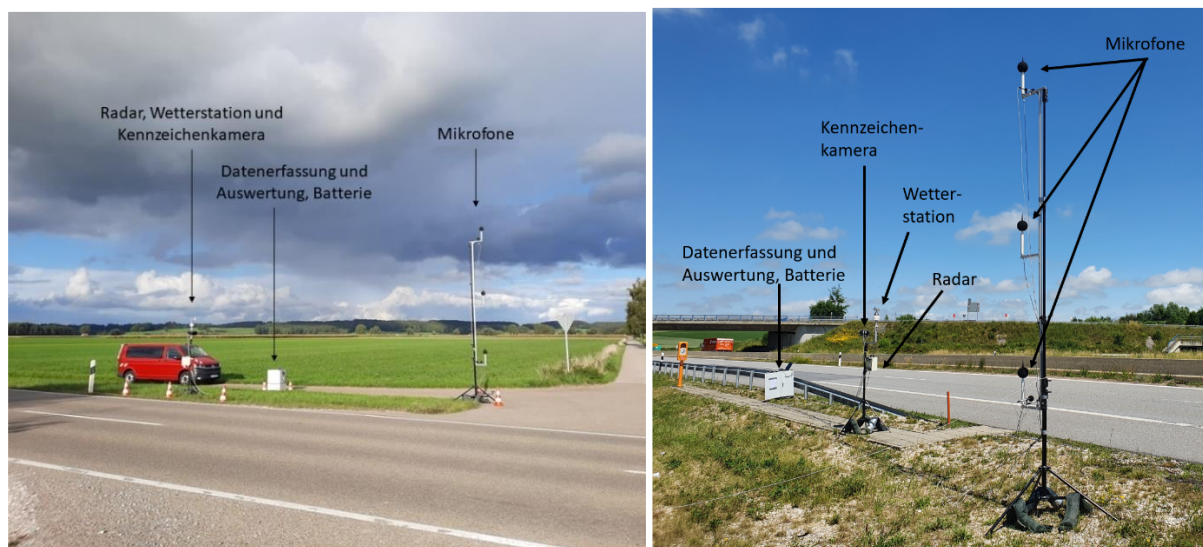
1.3 Beschreibung des Messaufbaus

Für die Durchführung der SPB-Messungen wurde ein autonom arbeitendes Messsystem verwendet. Das Messsystem besteht im Wesentlichen aus den gleichen Komponenten wie ein konventionelles SPB-Messsystem, d. h. aus Mikrofonen, einer Wetterstation, einem Geschwindigkeitsmessgerät (hier ausgeführt als Radarmessgerät) und einem Computer zur Steuerung der Messung und zur Datenaufzeichnung. Zusätzlich wurde eine Kennzeichenerfassungskamera verwendet, die die Kennzeichen der vorbeifahrenden Fahrzeuge erfasst.

Bei der autonomen Messdurchführung werden einzelne zusätzliche Mikrofone installiert, mit deren Hilfe eine Schallquellenlokalisierung durchgeführt werden kann. Durch die Bestimmung der Positionen der Schallquellen (Fahrzeuge) in Abhängigkeit von der Zeit kann die Verkehrssituation zu jedem Zeitpunkt während der Messung bestimmt werden. Auf diese Weise kann festgestellt werden, wann ein einzelnes Fahrzeug, das für die Messung verwendet werden kann, auf dem zu messenden Fahrstreifen fährt. Details zu der eingesetzten Technologie sind in M. Ertsey bis N. Kirchhoff dokumentiert.

In der folgenden Abbildung 1 ist das Messsystem dargestellt.

Abbildung 1: Verwendeter Messaufbau



Darstellung des Messaufbaus der autonomen SPB-Messungen an je einer typischen Messsituation. Links: Übersicht, rechts: Detailansicht. (Quelle: eigene Aufnahme, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

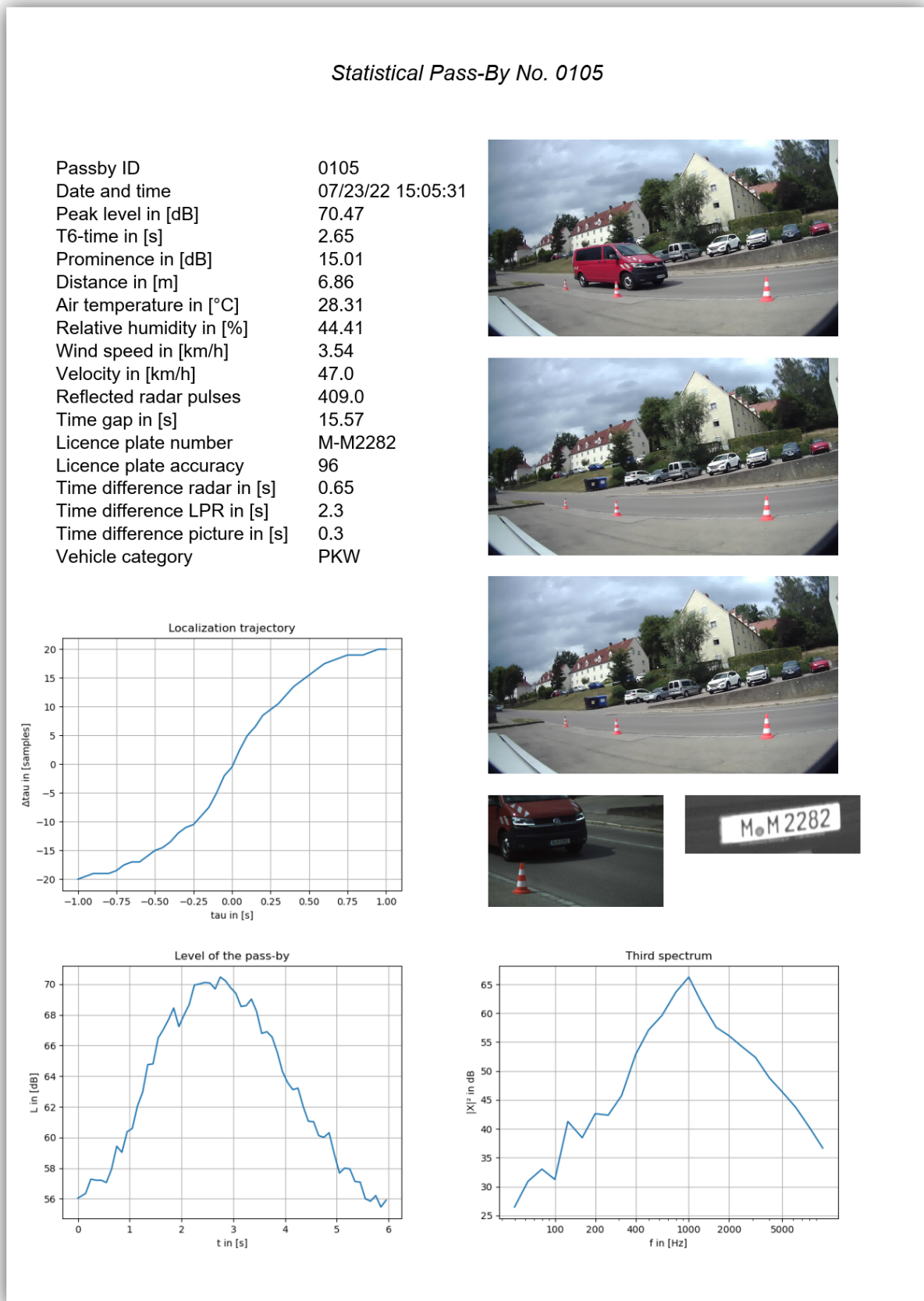
Die Messungen werden je Messpunkt kontinuierlich über ca. 36 bis 80 Stunden durchgeführt, um je nach Verkehrssituation die notwendige Fahrzeuganzahl zu erreichen. Es werden Rohdaten der Vorbeifahrtgeräusche gespeichert und die Situation in Echtzeit von dem eingesetzten Algorithmus bewertet. Als Ergebnis dieser Bewertung werden potenzielle Einzelvorbeifahrten ausgewertet und abgespeichert. Auf diese Weise kann bereits während der Messungen festgestellt werden, ob die notwendige Fahrzeuganzahl erreicht werden kann.

Nach der autonomen Messung findet eine Nachauswertung statt, in der der Datensatz mit einem aufwändigeren, nicht-echtzeit-fähigen Algorithmus ausgewertet wird, in dem Doppelvorbeifahrten (wenn ein Fahrzeug auf einem anderen Fahrtstreifen den Messquerschnitt zeitgleich passiert) ausgeschlossen werden sowie solche Situationen, bei denen es zwar keinen Niederschlag (mehr) gab, aber die Fahrbahn noch feucht war. Dies kann an einigen Messpunkten dazu führen, dass die mindestens 1000 zu messenden Fahrzeuge nicht in den finalen Datensatz aufgenommen werden können. Dennoch konnte die im Projekt geforderte Anzahl an zu messenden Fahrzeugen (30.000) auch in dem finalen Datensatz deutlich, um ca. 30 %, überschritten werden (vgl. Kapitel 4.2).

Letztendlich wird zu jeder Vorbeifahrt ein Messprotokoll erzeugt, in dem alle Messdaten zusammengefasst sind. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 zu sehen. Zusätzlich werden die Daten in einer Datenbank abgelegt.

Die erfassten Kennzeichen wurden für die Vorbeifahrtmessungen gesammelt und in einem Datensatz an das Kraftfahrtbundesamt (i. F. KBA) übergeben. Die Fahrzeugdaten wurden vom KBA geliefert. Es konnten nicht zu allen Fahrzeugen technische Daten übermittelt werden – 1,5 % des Datensatzes wurden aufgrund fehlerhafter oder ausgelaufener Kennzeichen nicht oder nicht vollständig geliefert.

Abbildung 2: Exemplarisches Messprotokoll einer Einzelvorbeifahrt an MP5



(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

1.4 CPX- und Texturmessungen

Bei der Close-Proximity-Messung (CPX) wird das Rollgeräusch von standardisierten Messreifen im Nahfeld aufgenommen. Hierzu wird ein Messanhänger verwendet, der mit Mikrofonen ausgestattet ist und die Messreifen akustisch abschirmt, wobei im Innenraum ein poröser Absorber verbaut ist. Somit wird eine Freifeldbedingung simuliert, die unabhängig von äußeren Störgeräuschen (wie passierenden Fahrzeugen, Helikoptern etc.) ist. Der Messanhänger wird mit konstanter Geschwindigkeit über die zu messende Fahrbahn bewegt. Neben dem Schall kann mithilfe eines Triangulationssensors auch die Oberflächentextur der Fahrbahn aufgenommen werden. In Abbildung 3 ist ein Bild des Messsystems dargestellt.

Die CPX- und Textur-Messungen wurden nicht im engeren zeitlichen Zusammenhang mit den SPB-Messungen, sondern gegen Ende einer jeden Messperiode blockweise durchgeführt. In der Zwischenzeit fanden an keinem der Messpunkte ergebnisrelevante Veränderungen der Situation (z. B. Deckschichtwechsel) statt.

Die CPX-Messungen wurden mit den beiden normgerechten Messreifen P1 und H1 (nach ISO/TS 11819-3) und bei der jeweils nächstgelegenen Nominalgeschwindigkeit zur typischen Fahrgeschwindigkeit durchgeführt. Bei der Auswertung wurde die Temperaturkorrektur nach ISO/TS 13471-1 angewandt.

Abbildung 3: CPX-Messsystem mit Texturlaser



Geräusch-Messanhänger/CPX-Messsystem. Links: geschlossene Haube zur Schallabdämmung während der Fahrt, rechts: offene Haube mit Triangulations-Laser zur Fahrbahntexturmessung.
(Quelle: eigene Aufnahme, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Zur Texturmessung wird ein Triangulationslaser verwendet, der die Anforderungen aus DIN EN ISO 13473-1:2021 erfüllt. Die Abtastrate des Lasers beträgt 30 kHz, sodass sich bei einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h eine Auflösung von 0,75 mm ergibt.

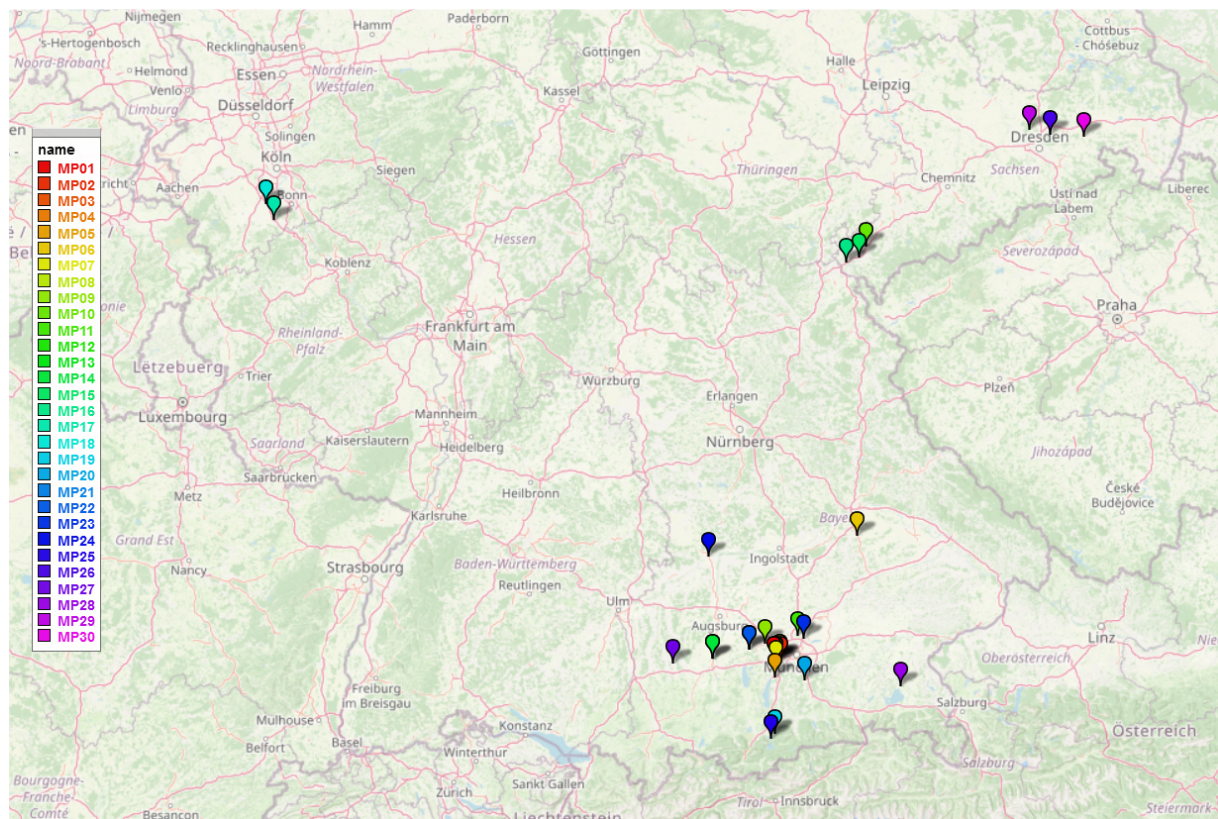
2 Beschreibung der Messpunkte

2.1 Allgemein

Im Folgenden wird ausschließlich auf die Eigenschaften der Straßendeckschicht sowie der Messumgebung eingegangen – Fahrzeuggeräusche werden somit vorerst nicht betrachtet.

Es wurden 30 SPB-Messungen an 28 unterschiedlichen Orten durchgeführt, die in der folgenden Abbildung 4 sowie in Tabelle 1 aufgetragen sind. An 2 Orten wurden die Messungen sowohl in der Sommer- wie auch der Winterperiode durchgeführt. Somit ergeben sich die 30 SPB-Messungen.

Abbildung 4: Übersicht der Messorte in Deutschland



(Quelle: openstreetmap. © openstreetmap Mitwirkende).

Tabelle 1: Auflistung der Messorte und -situationen

Messpunkt	Bezeichnung	Koordinate	Geschwindigkeit	Sondersituation	Anzahl SPB
MP1	Pentenrieder Str.	48.100575 °N, 11.381541 °O	60 km/h	–	1.074
MP2	Münchner Str.	48.103929 °N, 11.438339 °O	60 km/h	–	847
MP3	Pasinger Str.	48.111896 °N, 11.431702 °O	50 km/h	–	461
MP4	Sanatoriumswiese	48.102787 °N, 11.392301 °O	40 km/h	–	1.936
MP5	BAB A952	48.004142 °N, 11.390321 °O	unbegrenzt	DSH-V 5	2.662
MP6	B15n (Schierling)	48.838582 °N, 12.115919 °O	unbegrenzt	–	2.445
MP7	Gauting	48.080397 °N, 11.397727 °O	80 km/h	–	871
MP8	Steinkirchner Str.	48.111901 °N, 11.428952 °O	30 km/h	–	826
MP9	B471-1 (Eting)	48.200433 °N, 11.299092 °O	100 km/h	–	1.465
MP10	BAB A72-1	50.498801 °N, 12.19904 °O	unbegrenzt	–	799
MP11	B471-2 (Schleißheim)	48.250801 °N, 11.587526 °O	100 km/h	–	1.122
MP12	B17 (Hurlach)	48.110951 °N, 10.835373 °O	unbegrenzt	–	1.349
MP13	Sanatoriumswiese	48.102787 °N, 11.392301 °O	40 km/h	Winter	1.944
MP14	B17 (Hurlach)	48.110951 °N, 10.835373 °O	unbegrenzt	Winter	1.505
MP15	BAB A72-2	50.434658 °N, 12.132866 °O	120 km/h	–	830
MP16	BAB A72-3	50.404691 °N, 12.021096 °O	120 km/h	–	927
MP17	BAB A61-1	50.644764 °N, 6.940277 °O	120 km/h	–	1.161
MP18	BAB A61-2	50.738465 °N, 6.872816 °O	120 km/h	Vorrangig LKW	715
MP19	B11	47.665738 °N, 11.382160 °O	100 km/h	Motorrad	4.014
MP20	B13 (Sauerlach)	47.984563 °N, 11.647752 °O	100 km/h	–	1.593
MP21	Jesenwang-1	48.168271 °N, 11.158402 °O	80 km/h	–	776
MP22	Jesenwang-2	48.168271 °N, 11.158402 °O	80 km/h	–	1.435
MP23	Dirnismaning	48.233110 °N, 11.641067 °O	50 km/h	–	1.293
MP24	Donauwörth	48.714465 °N, 10.796052 °O	50 km/h	–	852
MP25	Kesselberg	47.637479 °N, 11.351633 °O	60 km/h	Motorrad	728
MP26	Langebrück	51.124934 °N, 13.830689 °O	50 km/h	–	1.841
MP27	B16 (Mindelheim)	48.083935 °N, 10.482011 °O	100 km/h	–	900
MP28	Seebruck	47.948307 °N, 12.501871 °O	80 km/h	Motorrad	1.014
MP29	S81 (Dresden)	51.152603 °N, 13.643885 °O	100 km/h	–	1.235
MP30	B6	51.112146 °N, 14.126924 °O	100 km/h	DSH-V 5	1.494

Insgesamt wurden 40.114 Vorbeifahrten mit der SPB-Methode erfasst, die den Anforderungen entsprechen und somit in die Auswertung der Daten eingehen. Sogenannte „Doppelvorbeifahrten“ (zwei Fahrzeuge zeitgleich) und Messdaten bei nasser Straße, oder Temperaturen unter 5 °C oder über 30 °C, oder Windgeschwindigkeiten über 5 m/s wurden dabei ausgeschlossen. An zwei Orten wurden neben den konventionellen SPB-Messungen auch Messungen in der Winterperiode durchgeführt⁷, um den Einfluss von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen von Fahrzeugen mit Winterreifen bestimmen zu können. An einem Ort wurde erst der Fahrstreifen in die eine Richtung und anschließend der Fahrstreifen in die entgegengesetzte Richtung als jeweils eigenständiger Messpunkt gemessen, um ggf. zwei Messpunkte mit unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen, aber sehr ähnlichem Fahrzeugkollektiv vergleichen zu können⁸.

An allen 28 Messpunkten wurden zudem CPX- und Textur-Messungen durchgeführt. Die CPX-Messungen wurden sowohl mit dem P1- als auch mit dem H1-Reifen durchgeführt. Die Texturmessungen wurden mit dem schnellfahrenden Texturmesssystem durchgeführt⁹.

Die SPB-Ergebnisse wurden nach DIN EN ISO 11819-1:2002-05 DIN EN ISO 11819-1:2002 ausgewertet und es wurden die mittleren Vorbeifahrtpegel bei der jeweiligen Referenzgeschwindigkeit ermittelt. Die SPB- und CPX-Ergebnisse wurden nach TP KoSD-19 ausgewertet und es wurden die Pegel-Differenzen mit deren Unsicherheiten sowie die Korrekturwerte für die Kategorie PKW und LKW ermittelt.

Aus den Texturdaten wurden die mittlere Profiltiefe (*MPD*) sowie der Gestaltfaktor (*g*) und das Textur-Spektrum der effektiven Rauigkeitstiefe berechnet.

Die SPB-Daten der Wintermesspunkte MP13 und MP14 wurden im Sinne der akustischen Eigenschaften der Deckschichten bzw. einer Belagskorrektur nicht ausgewertet, da die Randbedingungen bezüglich der Lufttemperatur hier nicht den Normanforderungen entsprechen.

2.2 CPX-Ergebnisse

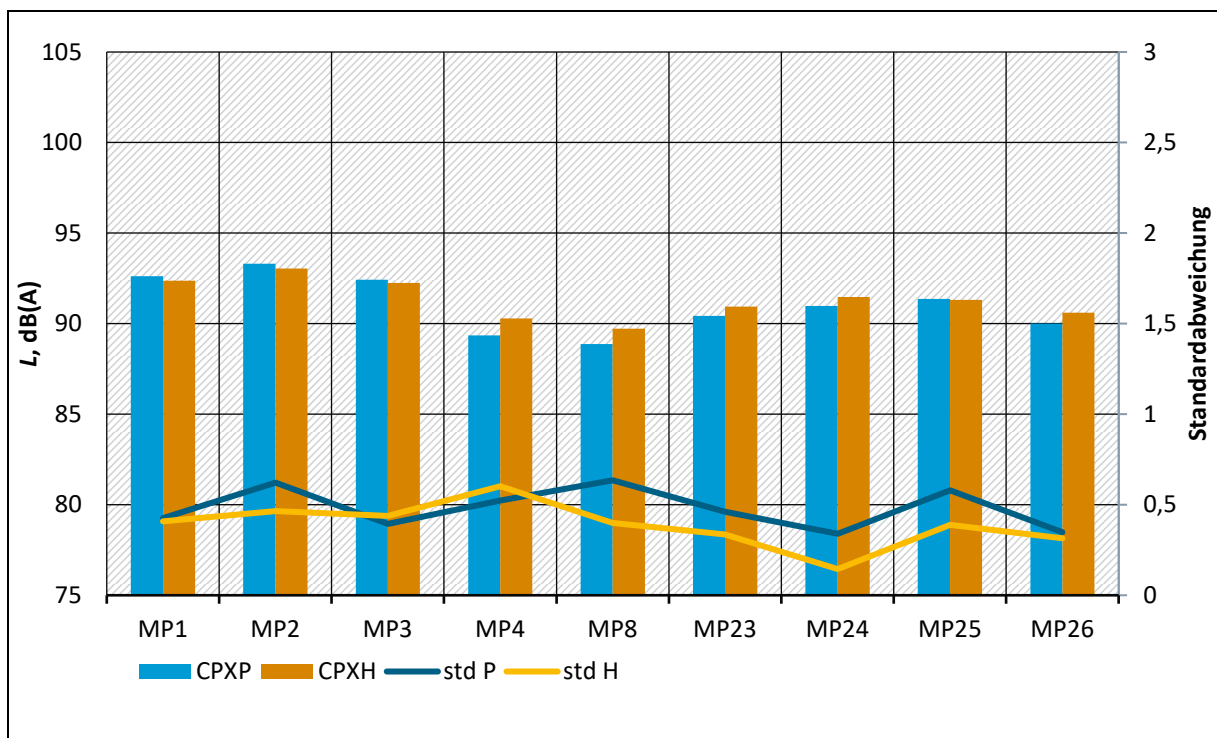
Die CPX-Ergebnisse (CPX: siehe Kapitel 1.4) zeigen den mittleren Schalldruckpegel der Rollgeräusche im Nahfeld über einen längeren Streckenabschnitt sowie dessen Standardabweichung zur Interpretation der Homogenität des Fahrbahnbelags. Die Auswertung erfolgt gemäß DIN EN ISO 11819-2:2017. In Abbildung 5, Abbildung 6 und Abbildung 7 sind jeweils für unterschiedliche Geschwindigkeitskategorien die *CPXP*- und *CPXH*-Indizes mit den jeweiligen Standardabweichungen als Balkendiagramm aufgetragen.

⁷ MP4/MP13: Sanatoriumswiese, MP12/MP14: B17 Hurlach

⁸ MP21/MP22: Jesenwang

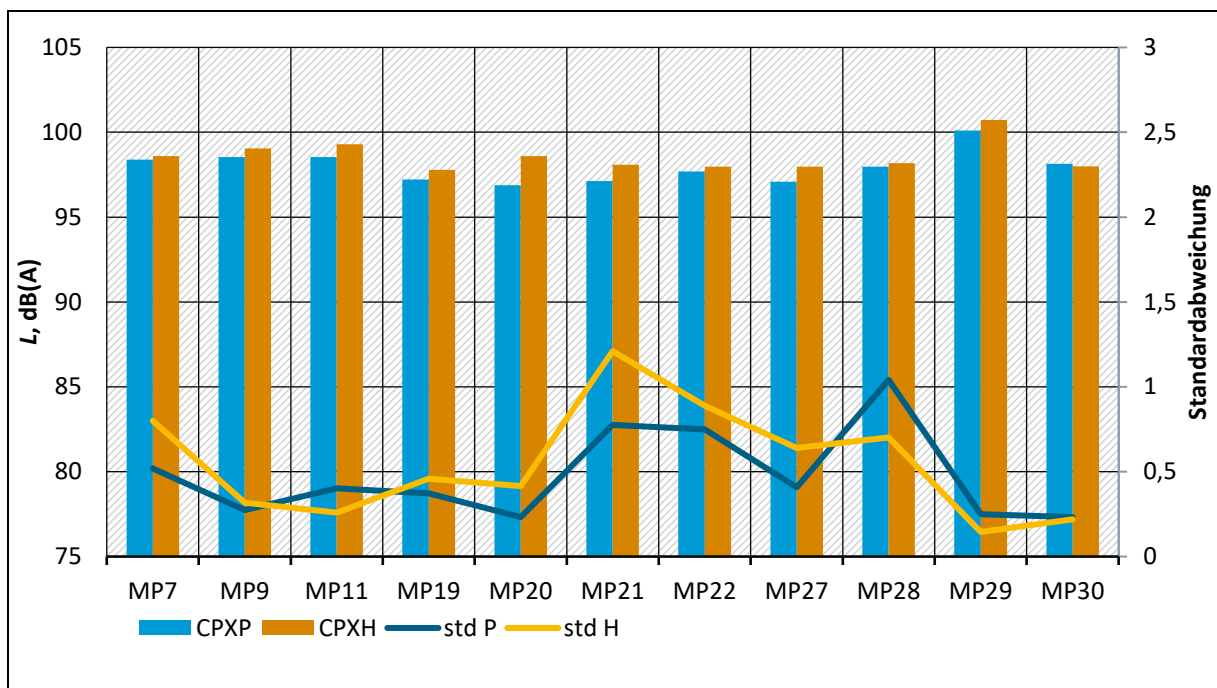
⁹ MP28: Seebruck wurde nicht mit dem schnellfahrenden System vermessen, sondern mit dem Texturmesssystem surface drone

Abbildung 5: CPX-Indizes und Standardabweichungen für $v_{\text{ref, CPX}} = 50 \text{ km/h}$ und $v_{\text{ref, SPB}} = 50 \text{ km/h}$



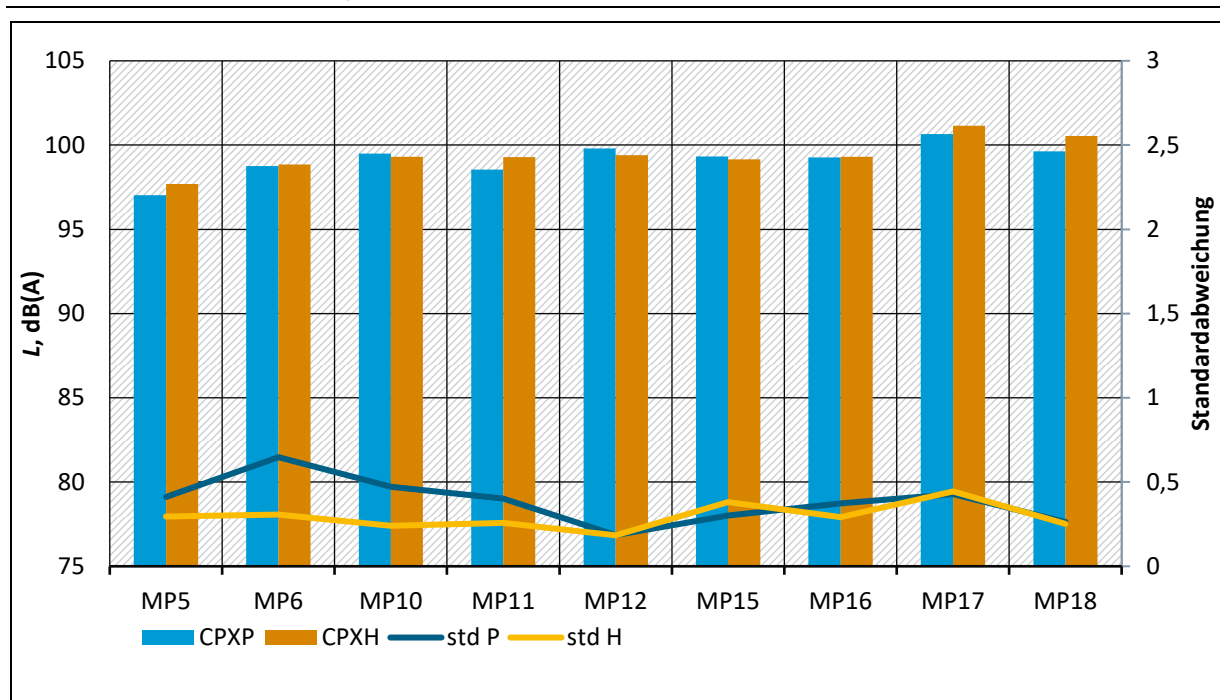
Ergebnisse der CPX-Messungen für Messpunkte bei niedrigen Geschwindigkeiten. Linke Achse: CPX-Index (Balken), rechte Achse: Standardabweichung (Linien). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 6: CPX-Indizes und Standardabweichungen für $v_{\text{ref, CPX}} = 80 \text{ km/h}$ und $v_{\text{ref, SPB}} = 80 \text{ km/h}$



Ergebnisse der CPX-Messungen für Messpunkte bei mittleren Geschwindigkeiten. Linke Achse: CPX-Index (Balken), rechte Achse: Standardabweichung (Linien). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 7: CPX-Indizes und Standardabweichungen für $v_{\text{ref, CPX}} = 80 \text{ km/h}$ und $v_{\text{ref, SPB}} = 110 \text{ km/h}$



Ergebnisse der CPX-Messungen für Messpunkte bei hohen Geschwindigkeiten. Linke Achse: CPX-Index (Balken), rechte Achse: Standardabweichung (Linien). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

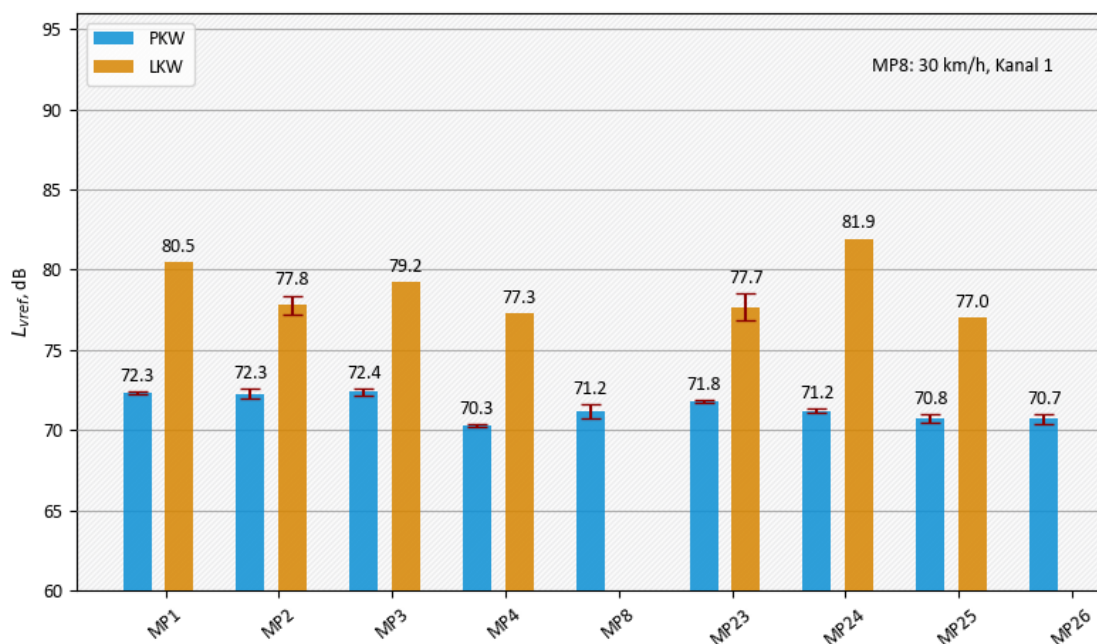
Die gemessenen CPX-Pegel, die auf die jeweilige, in dem Diagramm angegebene Referenzgeschwindigkeit bezogen sind, zeigen für einzelne Strecken auffällige Pegel:

- ▶ In der Gruppe mit einer Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h fallen die Messpunkte 1, 2 und 3 mit etwas erhöhten CPXP-Indizes auf.
- ▶ In der Gruppe mit einer CPX-Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h und einer SPB-Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h (mittleres Diagramm) fällt insbesondere Messpunkt 29 mit etwas erhöhten Pegeln auf.
- ▶ In der Gruppe mit einer CPX-Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h und einer SPB-Referenzgeschwindigkeit von 110 km/h (unteres Diagramm) fällt der Messpunkt 5 (Deckschichttyp DSH-V 5) mit niedrigen CPX-Indizes und der Messpunkt 17 mit tendenziell etwas höheren CPX-Indizes auf.

2.3 SPB-Ergebnisse

Die SPB-Ergebnisse wurden nach DIN EN ISO 11819-1:2002-05 ausgewertet. Hierbei wurden die Parameter der Regressionsgeraden (Steigung, Achsenabschnitt), mittlere Terz- und Oktavspektren sowie statistische Größen, wie die Fahrzeuganzahl oder die mittlere Geschwindigkeit, ermittelt. Die folgende Abbildung 8 zeigt die mittleren Vorbeifahrtpegel bei der jeweiligen Referenzgeschwindigkeit für die beiden Fahrzeugkategorien PKW und LKW. Vor der Bildung der Regressionsgeraden wurden jeweils die 5 % der langsamsten und schnellsten Fahrzeuge entfernt sowie die Vorbeifahrten, bei denen die Schalldruckpegel deutlich abweichen (je nach Messpunkt die lautesten 2 – 5 %) und beispielsweise von Störgeräuschen wie Motorengeräuschen beeinflusst wurden. Interessant war hierbei, dass die Fahrzeug-Kategorisierung des KBA alleine nicht genügt, um LKW im Datensatz klar zu identifizieren: Beim KBA werden z. B. auch „Handwerkerfahrzeuge“, also Kleinbusse mit einer zulässigen Gesamtmasse < 3,5 t als LKW geführt, da die Halter diese aus steuerlichen Gründen als LKW zulassen. Im Sinne der SPB-Norm oder der KoSD werden unter LKW aber erst Fahrzeuge ab 3,5 t verstanden.

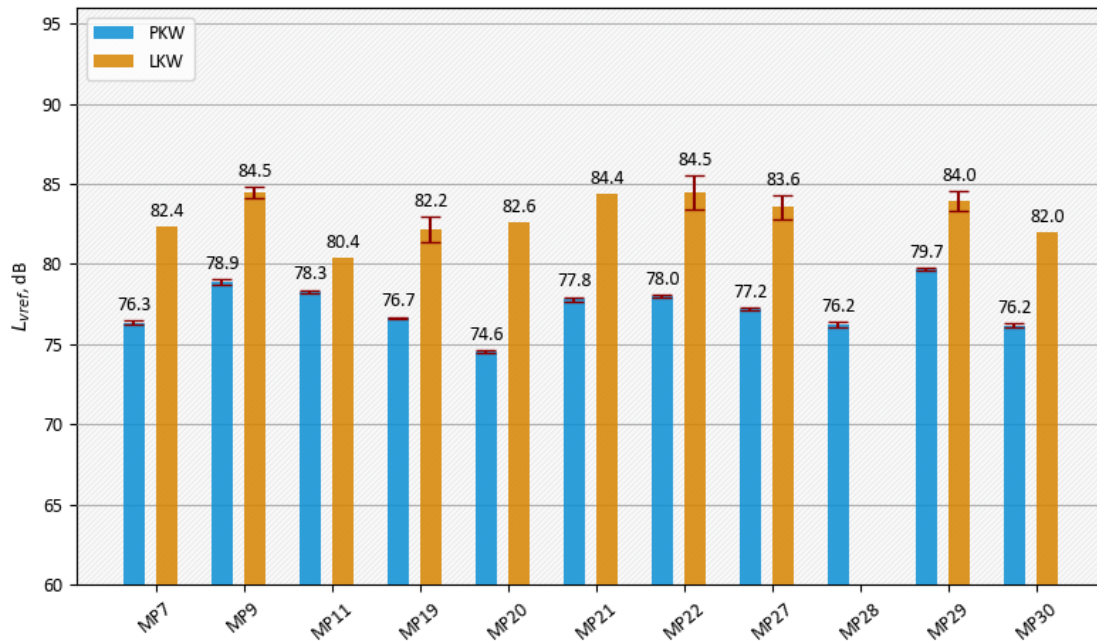
Abbildung 8: Vorbeifahrtpegel bei $v_{\text{ref, PKW}} = 50 \text{ km/h}$, $v_{\text{ref, LKW}} = 50 \text{ km/h}$ nach ISO 11819-1:2002-05



Ergebnisse der SPB-Messungen für Messpunkte bei niedrigen Geschwindigkeiten. Fehlerbalken (rot) beschreiben das 95%-Konfidenzintervall und sind nur angegeben, wenn eine Anzahl von mehr als 24 Fahrzeugen erreicht wurde. Bei fehlenden Balken (LKW) wurden weniger als zwei Fahrzeuge erfasst.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

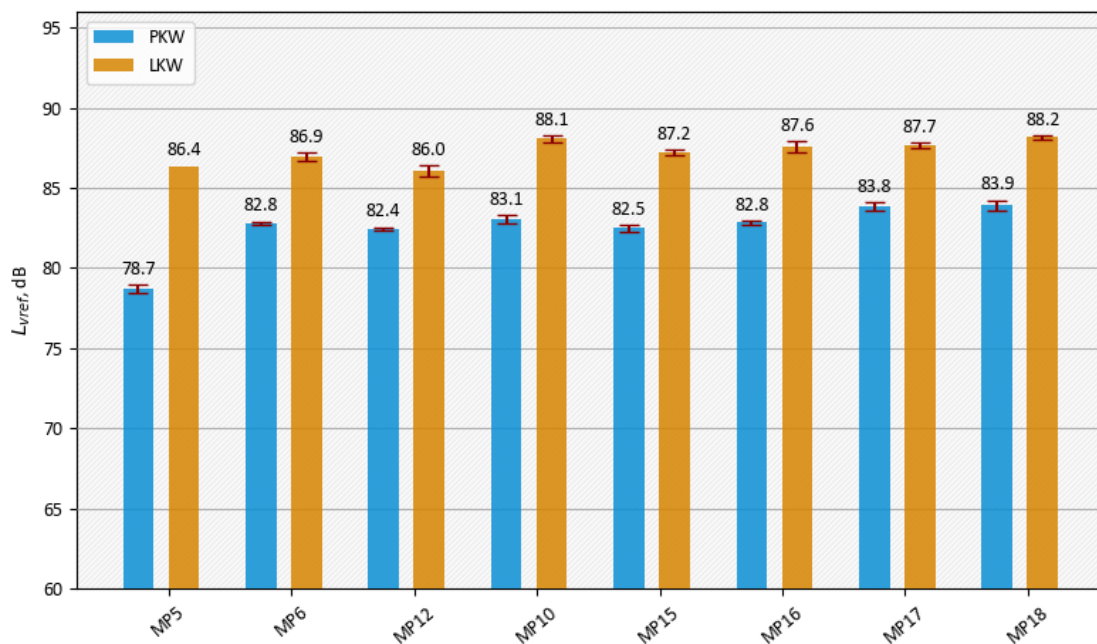
Abbildung 9: Vorbeifahrtpegel bei $v_{\text{ref, PKW}} = 80 \text{ km/h}$, $v_{\text{ref, LKW}} = 70 \text{ km/h}$ nach ISO 11819-1:2002-05



Ergebnisse der SPB-Messungen für Messpunkte bei mittleren Geschwindigkeiten. Fehlerbalken (rot) beschreiben das 95%-Konfidenzintervall und sind nur angegeben, wenn eine Anzahl von mehr als 24 Fahrzeugen erreicht wurde. Bei fehlenden Balken (LKW) wurden weniger als zwei Fahrzeuge erfasst.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 10: Vorbeifahrtpegel bei $v_{\text{ref, PKW}} = 110 \text{ km/h}$, $v_{\text{ref, LKW}} = 85 \text{ km/h}$ nach ISO 11819-1:2002-05



Ergebnisse der SPB-Messungen für Messpunkte bei hohen Geschwindigkeiten. Fehlerbalken (rot) beschreiben das 95%-Konfidenzintervall und sind nur angegeben, wenn eine Anzahl von mehr als 24 Fahrzeugen erreicht wurde.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

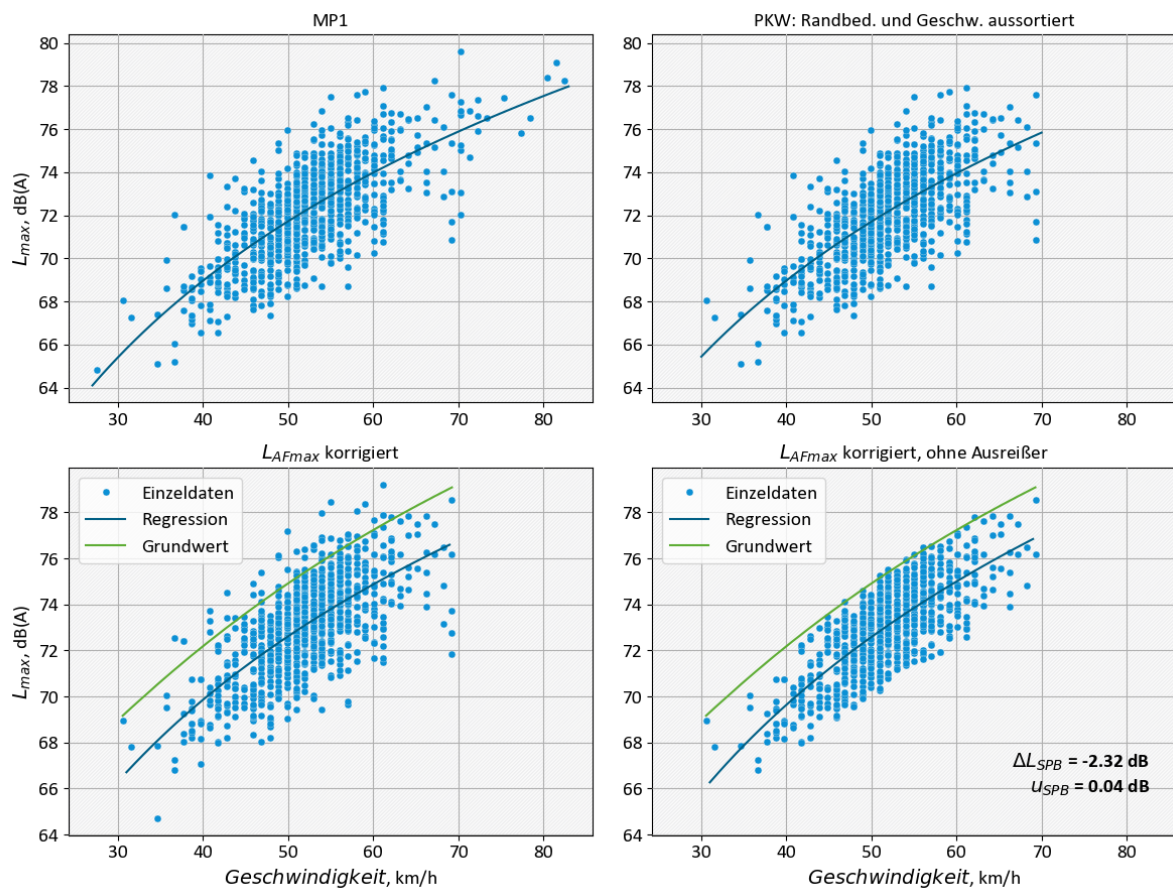
Die Auswertung der Vorbeifahrtmessungen ergibt Pegel in der typischen Größenordnung für nicht geräuschkindernde Fahrbahnbeläge. Für den Messpunkt MP5 mit DSH-V 5 ergibt sich eine deutliche Geräuschkinderung. Für die ebenfalls in DSH-V 5 ausgeführte Deckschicht am Messpunkt MP30 zeigt sich hingegen keine besonders auffällige Geräuschkinderung. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Deckschicht am MP 30 bereits stark gealtert war.

2.4 KoSD-Ergebnisse

Die Auswertung nach TP KoSD-19 sieht die Berechnung eines Korrekturwerte-Paars (ein Wert für PKW und ein Wert für LKW) zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften der jeweiligen Deckschicht vor. Hierzu werden für die SPB-Ergebnisse die Pegeldifferenzen zu einer Geschwindigkeits- und Fahrzeugklasse-abhängigen Grundwertkurve errechnet und diese gemittelt. Aus den CPX-Ergebnissen wird die Pegeldifferenz zwischen dem mittleren Pegel über die gesamte Strecke und dem Pegel im 20-Meter-Segment des SPB-Querschnitts ermittelt. Für die jeweiligen Pegeldifferenzen werden Unsicherheiten ermittelt und die Ergebnisse werden miteinander verschnitten, um schließlich einen Korrekturwert zu erhalten. Abbildung 11 zeigt beispielhaft für MP1 (Kanal 2, Messhöhe 3,0 m) den Datensatz nach verschiedenen Schritten der KoSD-Auswertung. Links oben ist der Originaldatensatz an MP1 inklusive der Regressionslinie zu sehen. Rechts oben ist der Geschwindigkeitsbereich zwischen 30 km/h und 70 km/h (Situation „innerorts“) eingeschränkt und Datenpunkte außerhalb der Gültigkeitsgrenzen für Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur sind gelöscht. Links unten ist der Datensatz mit korrigierten Schalldruckpegeln (Lufttemperatur und Mikrofonposition) inklusive der von der Fahrzeugklasse und -geschwindigkeit abhängigen Grundwertkurve aufgetragen. Rechts unten ist der Datensatz zu sehen, in dem schließlich noch die Messwerte mit den absolut gesehen 10 % größten Differenzen zur Grundwertkurve gelöscht wurden und der letztendlich für die KoSD-Auswertung herangezogen wird.

Außerdem ist die gemittelte Pegeldifferenz zur Grundwertkurve ΔL_{SPB} sowie deren Unsicherheit u_{SPB} aufgetragen. Die jeweils eingezeichnete Regressionslinie bezieht sich immer auf die nach jedem Schritt übrig gebliebene Datenpunktwolke.

Abbildung 11: Exemplarische KoSD-Auswertung



Beispielhafte Veränderung des Datensatzes (MP1) durch die Schritte der KoSD-Auswertung. Links oben: ursprünglicher Datensatz inkl. Regressionslinie, rechts oben: Geschwindigkeitsgrenzen gesetzt und Randbedingungen (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit) aussortiert, links unten: Temperatur- und Messhöhenkorrektur angewandt inkl. Grundwertkurve, rechts unten: Perzentile der Differenzen zur Grundwertkurve entfernt, entspricht dem Datensatz, aus dem ΔL_{SPB} und u_{SPB} errechnet wird. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

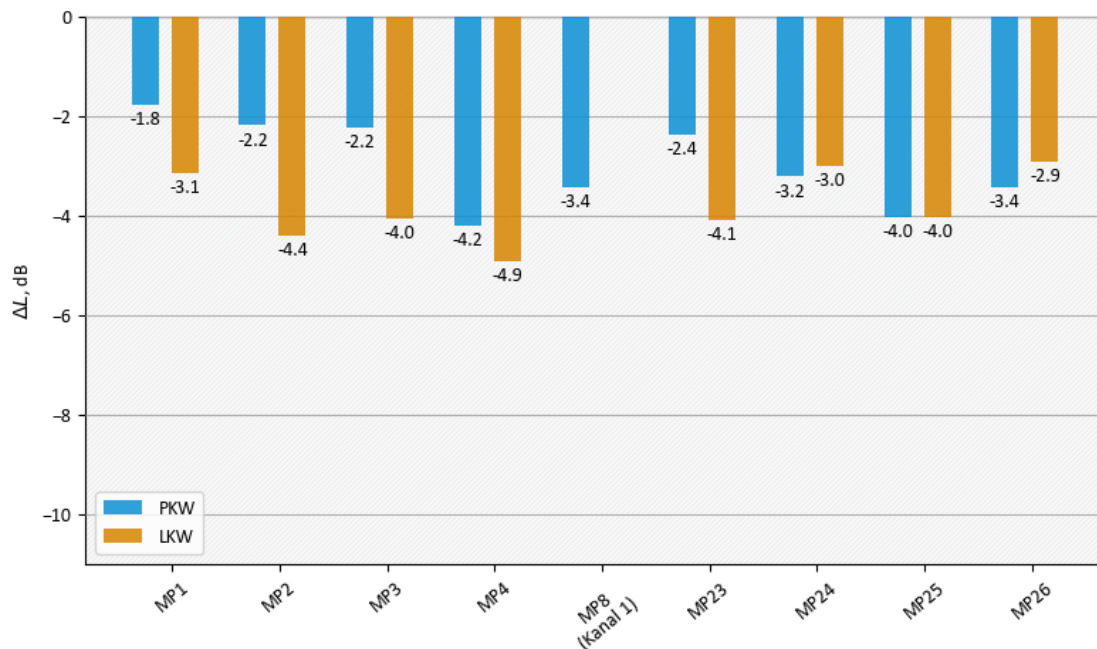
Die Pegeldifferenzen der SPB- sowie CPX-Ergebnisse und deren Unsicherheiten sind in der folgenden Tabelle 2 aufgetragen. Die Korrekturwerte können Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 entnommen werden.

Tabelle 2: SPB- und CPX-Pegeldifferenzen sowie -Unsicherheiten

Die Werte wurden aus Kanal 2 (3 m Messhöhe) ermittelt. Bei fehlenden Werten wurden nicht genügend Fahrzeuge erfasst.

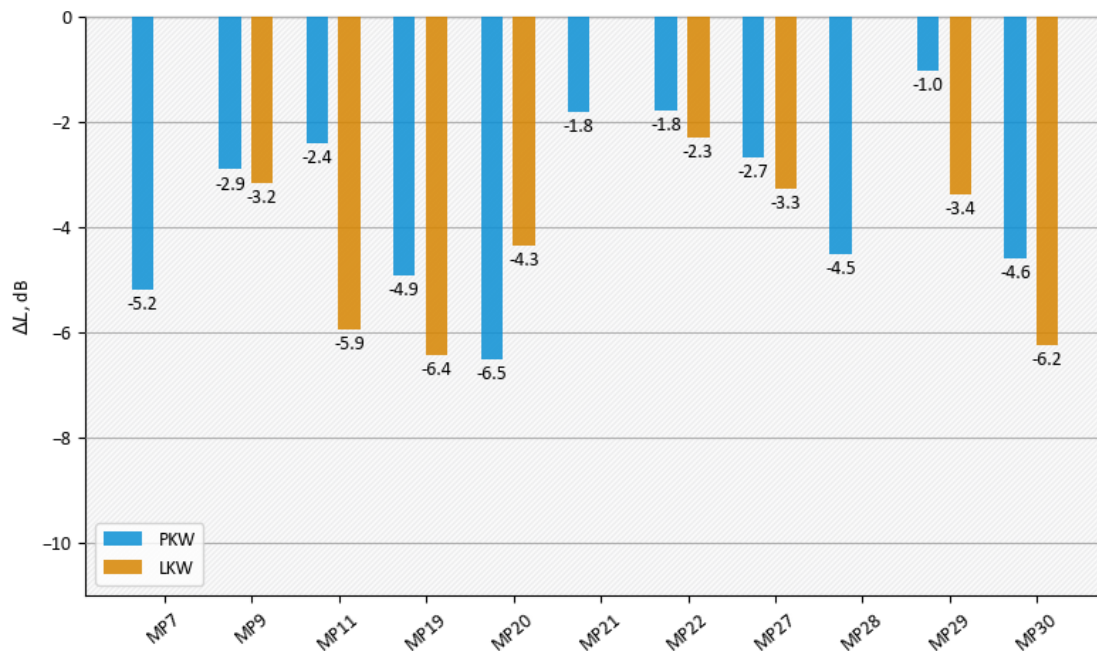
Messpunkt	$\Delta L_{SPB, PKW}$	$U_{SPB, PKW}$	$\Delta L_{SPB, LKW}$	$U_{SPB, LKW}$	$\Delta L_{CPX, P}$	$U_{CPX, P}$	$\Delta L_{CPX, H}$	$U_{CPX, H}$
MP1	-2,32	0,04	-3,25	0,30	-0,49	0,06	0,18	0,05
MP2	-2,59	0,08	-5,09	0,23	-0,30	0,09	-0,45	0,07
MP3	-2,21	0,08	-4,62	0,26	0,13	0,08	-0,30	0,09
MP4	-4,41	0,03	-5,62	0,74	-0,10	0,12	0,05	0,13
MP5	-6,44	0,05			-0,03	0,03	-0,22	0,02
MP6	-2,23	0,03	-3,74	0,07	-0,45	0,01	-0,27	0,02
MP7	-4,33	0,05	-6,23		0,95	0,09	-0,76	0,14
MP8	-2,67	0,06	-5,91		0,08	0,09	0,82	0,15
MP9	-2,67	0,04	-3,36	0,25	0,27	0,02	0,04	0,03
MP10	-2,61	0,08	-2,98	0,11	-0,39	0,01	-0,20	0,01
MP11	-2,40	0,04	-6,42	0,23	0,07	0,05	-0,26	0,03
MP12	-2,68	0,04	-5,04	0,15	0,00	0,02	-0,39	0,02
MP15	-2,61	0,06	-3,95	0,08	-0,60	0,01	-0,12	0,02
MP16	-2,20	0,06	-2,64	0,11	0,17	0,03	-0,25	0,03
MP17	-1,22	0,07	-3,66	0,06	-0,32	0,03	-0,53	0,03
MP18	-1,41	0,18	-2,95	0,07	-0,07	0,02	0,01	0,02
MP19	-4,15	0,02	-6,06	0,39	0,81	0,05	0,75	0,04
MP20	-6,28	0,03	-5,25	1,09	0,31	0,07	0,18	0,04
MP21	-2,83	0,06			-0,91	0,11	-0,96	0,06
MP22	-2,69	0,04	-3,53	0,47	-0,83	0,09	-0,78	0,07
MP23	-2,80	0,04	-3,94	0,29	-0,35	0,07	0,43	0,05
MP24	-3,33	0,04	-3,12	0,39	-0,08	0,04	0,28	0,08
MP25	-4,41	0,07	-5,55	0,59	-0,32	0,05	-0,93	0,08
MP26	-3,37	0,03	-3,85	0,46	0,13	0,06	-0,47	0,06
MP27	-3,51	0,04	-4,11	0,69	-0,77	0,07	-0,17	0,04
MP28	-4,54	0,07			0,11	0,11	0,15	0,02
MP29	-1,17	0,04	-3,64	0,40	-0,10	0,03	0,25	0,02
MP30	-4,63	0,03	-6,89	0,89	0,01	0,03	0,18	0,05

Abbildung 12: Korrekturwerte nach TP KoSD-19, $v_{\text{ref}} = 50 \text{ km/h}$



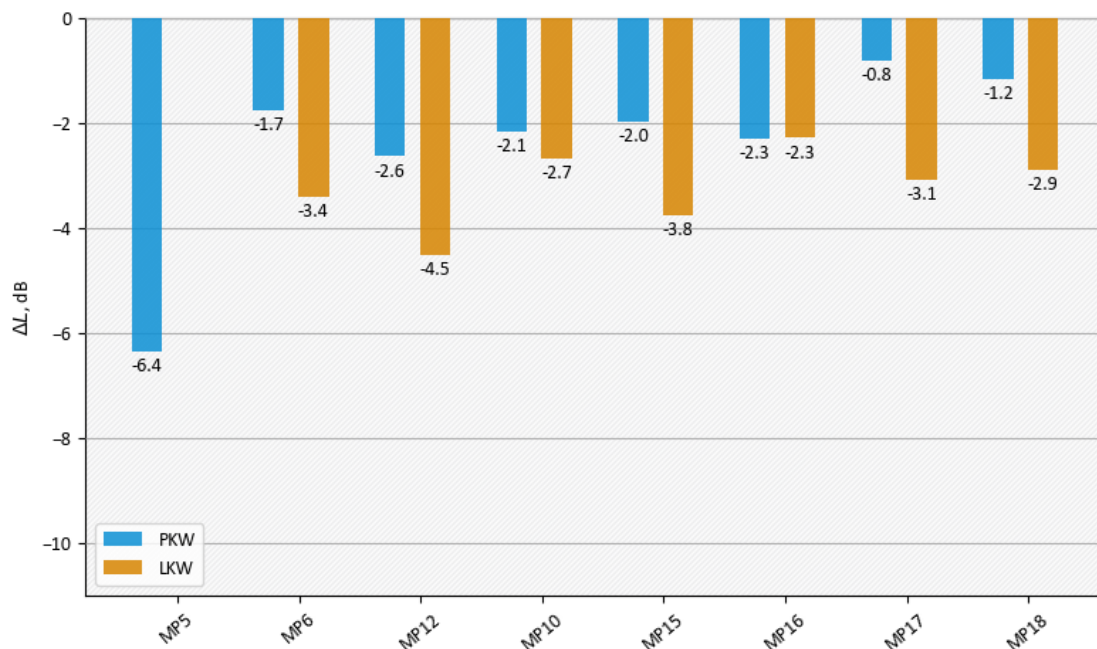
Korrekturwerte nach TP KoSD-19 für Messpunkte bei niedrigen Geschwindigkeiten, errechnet durch die Verschneidung von SPB- und CPX-Messergebnissen. Für die Auswertung wurden nur LKW mit einer zulässigen Gesamtmasse < 12 t herangezogen („zweiachsig“). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 13: Korrekturwerte nach TP KoSD-19, $v_{\text{ref}} = 80 \text{ km/h}$



Korrekturwerte nach TP KoSD-19 für Messpunkte bei mittleren Geschwindigkeiten, errechnet durch die Verschneidung von SPB- und CPX-Messergebnissen. Für die Auswertung wurden nur LKW mit einer zulässigen Gesamtmasse > 12 t herangezogen („vierachsig“). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 14: Korrekturwerte nach TP KoSD-19, $v_{\text{ref}} = 110 \text{ km/h}$



Korrekturwerte nach TP KoSD-19 für Messpunkte bei hohen Geschwindigkeiten, errechnet durch die Verschneidung von SPB- und CPX-Messergebnissen. Für die Auswertung wurden nur LKW mit einer zulässigen Gesamtmasse > 12 t herangezogen („vierachsig“). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Im Großen und Ganzen ergeben sich ΔL -Werte in der typischen Größenordnung für die untersuchten Deckschichten, bei denen es sich nach Augenschein in der Regel um SMA- oder Asphaltbeton-Oberflächen handelte. Bei den Messpunkten MP5, MP7, MP8, MP21 und MP28 wurden weniger als zwei LKW erfasst, weshalb hier keine Korrekturwerte berechnet werden konnten. Bei den Messpunkten MP1, MP3, MP11, MP20, MP22, MP24-27 und MP30 wurden weniger als zehn Fahrzeuge erfasst, weshalb die Ergebnisse der Korrekturwerte nach TP KoSD-19 nicht statistisch signifikant sind.¹⁰

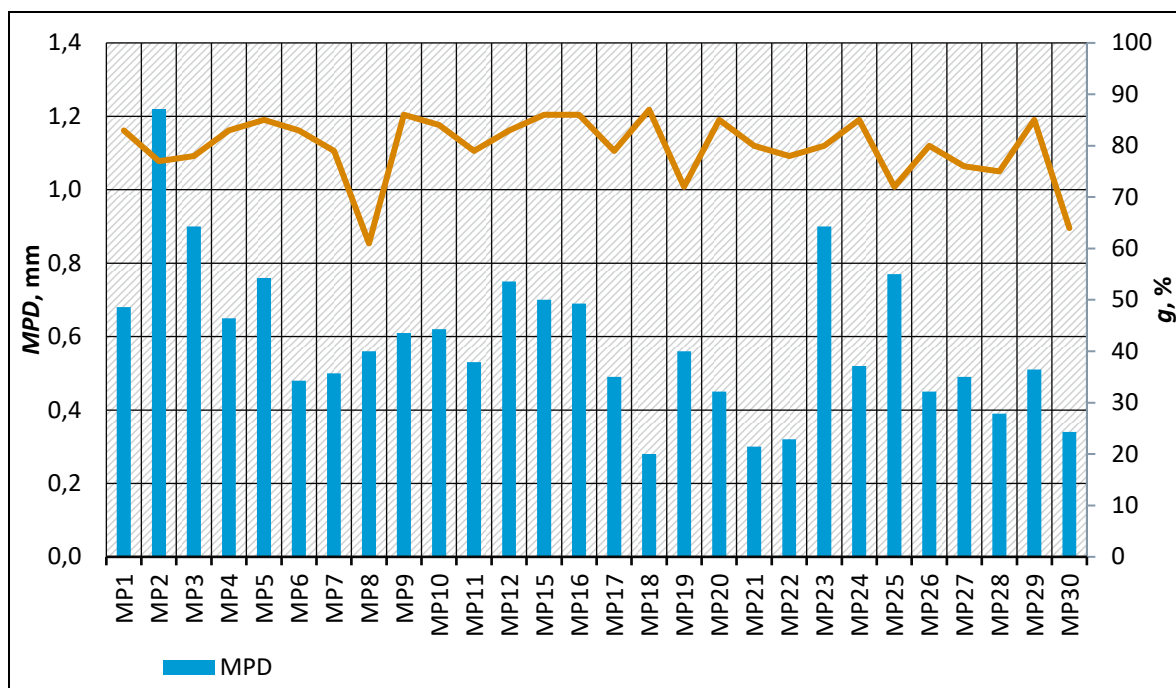
¹⁰ Nach TP KoSD-19 würden bei diesen Messpunkten zur Bestimmung des Korrekturwertes für LKW 3 dB auf den Korrekturwert für PKW hinzugefügt. Da die Korrekturwerte für LKW im weiteren Verlauf nicht verwendet werden wurde hierauf verzichtet.

2.5 Texturergebnisse

Die Texturmessung der Fahrbahn wurde zeitgleich mit der CPX-Messung durchgeführt. Hierfür wurde ein sehr schnell abtastender Lasersensor im CPX-Anhänger montiert, der direkt in der Rollspur eines der beiden Reifen ausgerichtet war.

Im Abschnitt des SPB-Querschnitts wurden die mittlere Profiltiefe *MPD* („Mean Profile Depth“) sowie der Gestaltfaktor *g* über die Strecke ausgewertet. Während die Mittlere Profiltiefe ein Parameter der Rauigkeitstiefe ist, gibt der Gestaltfaktor die Rauigkeitsform an. Werte über 60 % für den Gestaltfaktor deuten auf konkave Texturen wie Walzasphalte hin, während Werte darunter üblicherweise bei konvexen Texturen wie Gussasphalten und Waschbetonen auftreten. Bei Walzasphalten führen in der Regel höhere Werte für den Gestaltfaktor zu geringeren Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. Die Texturmessungen dienen als zusätzliche Erklärungshilfe bei untypischen SPB- oder CPX-Messergebnissen. Die folgende Abbildung 15 zeigt die ermittelten Ergebnisse für die Messpunkte.

Abbildung 15: Texturkennwerte der Messpunkte



Ergebnisse der Textur-Messungen. Linke Achse: mittlere Profiltiefe MPD in mm (Balken), rechte Achse: Gestaltfaktor in % (Linie). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Die Mittleren Profiltiefen *MPD* liegen für eine Mehrzahl der Strecken im Bereich zwischen 0,3 mm und 0,8 mm und somit in einem typischen Bereich für Walzasphalte FGSV 442. 2013. Besonders hoch sind die Mittleren Profiltiefen an den Messpunkten MP2 und MP3, an denen die Reifen-Fahrbahn-Geräusche, die mit der CPX-Methode gemessen wurden, ebenso höher lagen als die Vorbeifahrtmessergebnisse, die nach der SPB-Methode ausgewertet wurden. Die größere Rauigkeitstiefe am MP23 scheint sich hingegen nicht auf die akustischen Messergebnisse ausgewirkt zu haben.

Die Gestaltfaktoren liegen für fast alle Strecken innerhalb des typischen Wertebereichs für Walzasphalte mit $g > 70$ %. Einzig die beiden Messpunkte MP8 und MP30 fallen hier mit geringeren Gestaltfaktoren auf. Die Auswertung der Spektren der Vorbeifahrtmessungen, siehe Kapitel 4.3.4, zeigt in diesem Fall keine besondere Auffälligkeit, die auf die weniger konkave Oberflächentextur zurückgeführt werden könnte.

3 Untersuchung der erfassten Fahrzeugflotte

In diesem Kapitel wird die Fahrzeugflotte unabhängig von den akustischen Messergebnissen betrachtet. Die hier dargestellten Informationen stützen sich lediglich auf die vom Kraftfahrtbundesamt erhobenen technischen Fahrzeugdaten, welche mithilfe der erfassten Kennzeichen eingeholt werden konnten.

3.1 Allgemein

Vom Kraftfahrtbundesamt wurden folgende Daten eingeholt:

- ▶ Fahrzeugklasse-Schlüssel-Nummer
- ▶ Art des Aufbaus Schlüssel-Nummer
- ▶ Hersteller-Schlüssel-Nummer
- ▶ Typ-Schlüssel-Nummer
- ▶ Code zur nationalen Emissionsklasse
- ▶ Motorleistung in kW
- ▶ Hubraum in cm³
- ▶ Kraftstoff- oder Energiequelle
- ▶ Leergewicht Mindestwert in kg
- ▶ Leergewicht Maximalwert in kg
- ▶ technisch zulässige Gesamtmasse in kg
- ▶ Anzahl der Achsen
- ▶ Anzahl der Antriebsachsen
- ▶ Anzahl der Sitzplätze
- ▶ Anzahl der Stehplätze
- ▶ Jahr der Erstzulassung
- ▶ Fahrgeräusch in dB
- ▶ Standgeräusch in dB

Die verschiedenen Schlüssel-Nummern sind entweder Zahlenreihen oder Kombinationen aus Zahlen und Buchstaben. Die Nummern für Hersteller und Typ (Modell) des Fahrzeugs konnten automatisiert aus einer Excel-Tabelle übersetzt werden. Die Nummern für Fahrzeugklasse und Art des Aufbaus waren lediglich in einem PDF-Dokument beschrieben und mussten manuell übersetzt werden. Aufgrund der Fülle an verschiedenen (alten wie neuen) Kodierungen wurden lediglich die gängigsten Fahrzeugklassen übersetzt. Diese sind:

PKW, LKW, Transporter (Güter), Transporter (Personen), Kraftrad, Quad, Omnibus, Wohnmobil, Feuerwehrfahrzeug, Landwirtschaftliches Fahrzeug, Anhänger und Sonstige

Somit wurden 1.888 Kodierungen bzw. 4,7 % des Gesamtdatensatzes nicht übersetzt.

Es ist zu beachten, dass hier nicht alle Schlüssel-Nummern berücksichtigt wurden und dass die Kategorie „Sonstige“ eine eigene Schlüsselnummer besitzt und daher nicht alle übrigen Fahrzeuge beinhaltet, die nicht übersetzt wurden.

Mit der Art des Aufbaus der Schlüssel-Nummer können unterschiedliche Sub-Kategorien einer Fahrzeugklasse unterschieden werden, wie z. B. unter der Kategorie LKW der geschlossene Kasten, der Kipper oder der Flüssigkeitstank, um nur einige wenige zu nennen. Aufgrund der sehr detaillierten Aufteilung dieser Beschreibung wurde auf die Übersetzung der Art des Aufbaus Schlüssel-Nummer verzichtet.

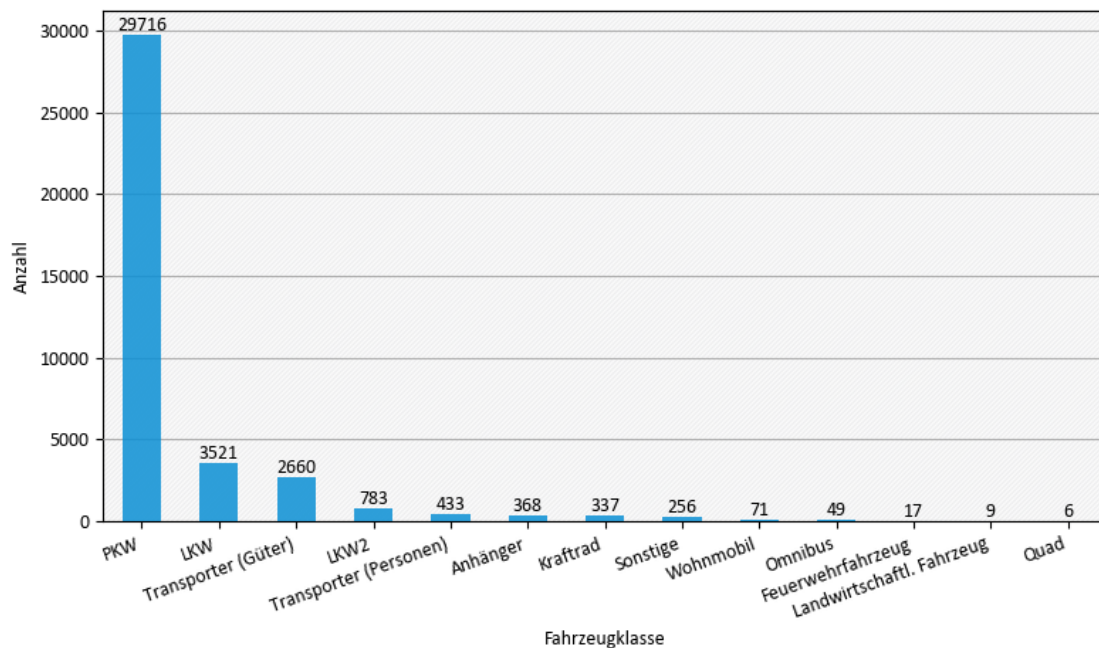
Auch der Code zur nationalen Emissionsklasse und die numerische Bezeichnung für die Kraftstoff- oder Energiequelle konnten nur dem PDF-Dokument entnommen werden. Die veralteten (nationalen) Bezeichnungen für verschiedene Emissionsklassen wurden nicht betrachtet und nur die Nummern für die Klassen *EURO4*, *EURO5* und *EURO6* übersetzt. Für die Kraftstoff- oder Energiequelle konnten alle Bezeichnungen übersetzt werden. Diese beinhalten:

Benzin, Diesel, Elektro, Hybrid Benzin/E, Hybrid Diesel/E, Plug-in-Hybrid/Benzin, Plug-in-Hybrid/Diesel, Brennstoffzelle/Benzin, Benzin/Ethanol, Vielstoff, Zweistoff LNG/Diesel, Benzin/Flüssiggas, Benzin/komprimiertes Erdgas, Erdgas NG, Verflüssigtes Erdgas (LNG) und Andere

3.2 Fahrzeugklassen

Für die Ergebnisse wurden nur die Fahrzeugklassen der übersetzten Schlüssel-Nummern betrachtet. Von insgesamt 40.114 Datenpunkten wurden somit 38.226 oder 95,3 % übersetzt. Die folgenden Prozentsätze beziehen sich auf diesen Anteil des Gesamtdatensatzes. Die übrigen 4,7 % des Datensatzes werden hier und in der folgenden Analyse nicht betrachtet. Abbildung 16 zeigt die Anzahl der jeweils erkannten Fahrzeuge unterschiedlicher Klassen.

Abbildung 16: Histogramm Fahrzeugklasse



Verteilung gemessener Fahrzeugklassen. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Der Großteil (77,7 %) des Datensatzes besteht aus PKW, während 11,2 % aus LKW und 8,2 % aus Transportern (Güter und Personen) sowie Omnibussen besteht. In der Kategorie LKW wird über die Fahrzeugklasse-Schlüssel-Nummer nicht nach zweiachsigen oder vierachsigen LKW unterschieden. Mit einer Abschätzung über die zulässige Gesamtmasse (Grenzwert 12 t) können diese beiden Kategorien voneinander getrennt werden. Hiermit ergibt sich ein Anteil an vierachsigen LKW (> 12 t) von 9,2 % und zweiachsigen LKW (< 12 t) von 2,0 %. Hierbei ist zu beachten, dass nur 50,9 % der zweiachsigen LKW eine zulässige Gesamtmasse > 3,5 t aufweisen. Knapp die Hälfte dieser Fahrzeuge sind also vermutlich betriebliche Kleinlieferwagen (Handwerkerbetriebe etc.) und werden im Folgenden der Kategorie der „Gütertransporter“ zugeschrieben.

Aufgrund des geringen Aufkommens einiger Fahrzeugklassen werden in Kapitel 4 nur die nachstehenden Fahrzeugklassen betrachtet:

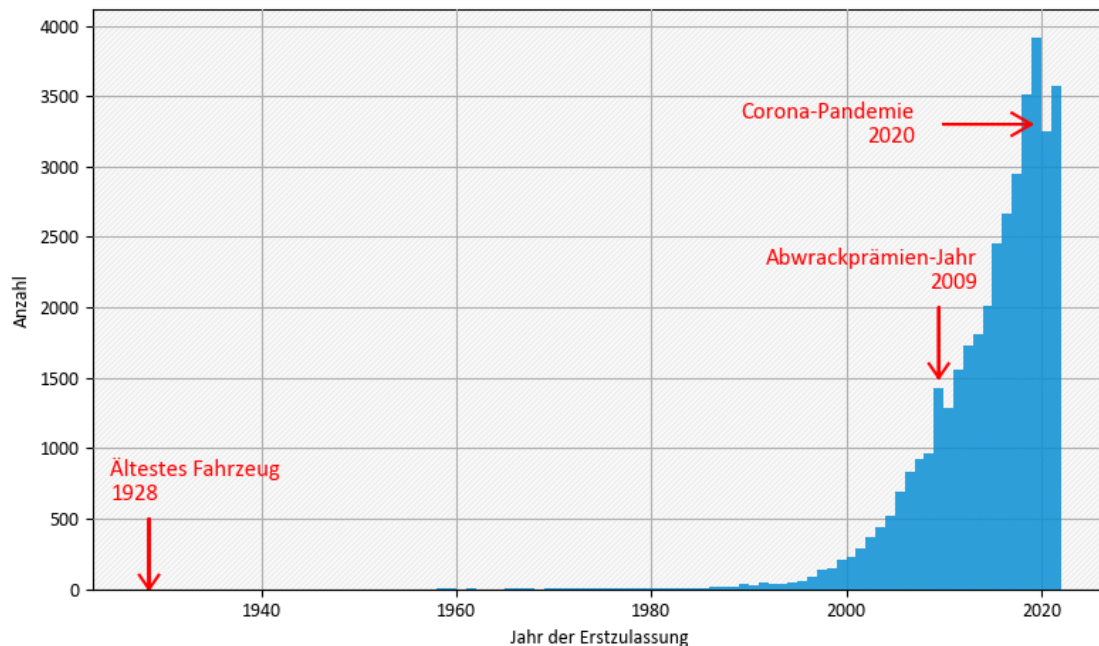
PKW, LKW (zweiachsig sowie vierachsig, auf jeden Fall über 3,5 t), Transporter (Güter sowie Personen), Krafttrad und Omnibus

Die Anzahl der gemessenen Omnibusse ist im Gesamtdatensatz sehr gering, jedoch fokussieren sich die gemessenen Fahrzeuge auf einzelne Messpunkte, wo es zusätzlich einige wiederholte Vorbeifahrten gibt (bei Linienbussen). Hier können demnach trotz der geringeren Anzahl interessante Abhängigkeiten erkannt werden (siehe Kapitel 4.3.1).

3.3 Altersverteilung

Die Verteilung des Erstzulassungsjahres der gesamten Fahrzeugflotte kann der folgenden Abbildung 17 entnommen werden. Zu 38.494 Datenpunkten (96,0 %) konnte das Zulassungsjahr ermittelt werden. Die folgenden Daten und Prozentsätze beziehen sich auf diesen Anteil des Gesamtdatensatzes.

Abbildung 17: Histogramm Zulassungsjahr



Verteilung des Alters (laut Erstzulassungsjahr) aller gemessenen Fahrzeuge. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

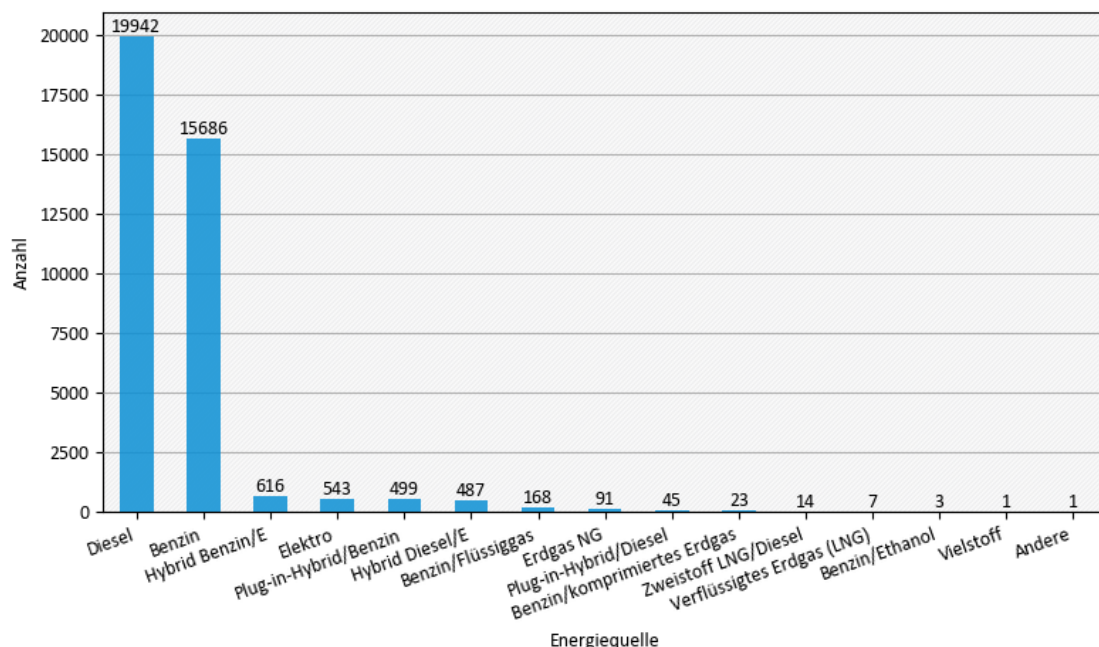
Einige Auffälligkeiten sind in der Abbildung markiert. Das älteste Fahrzeug im Datensatz wurde 1928 zugelassen. Deutlich zu erkennen ist außerdem eine lokale Überhöhung der Zulassungen im Jahr 2009. In diesem Jahr wurde aufgrund der Wirtschaftskrise das Konjunkturpaket II verabschiedet, welches die sogenannte Abwrack-Prämie enthielt¹¹. Eine der Auswirkungen war ein allgemeiner Anstieg der Anschaffungen von Neuwagen, welcher über zehn Jahre später noch zu erkennen ist. Ein gegenteiliges Verhalten zeigt sich im Jahr 2020. Hier ist ein deutlicher Einbruch der Neuzulassungen zu erkennen. Grund dafür war vermutlich der Einbruch der Wirtschaft während der Corona-Pandemie. Im Jahr 2021 entspannt sich die pandemische Lage, was eine erneute Entfaltung der wirtschaftlichen Leistung zur Folge hat und damit einhergehend einen erneuten Anstieg der Neuzulassungen.

Außerdem ist zu erkennen, dass der Großteil der Fahrzeugflotte aus Fahrzeugen besteht, die nicht älter als zehn Jahre sind. Das Maximum befindet sich mit einer Anzahl von 3.917 und einem Anteil von 10,2 % im Jahr 2019. Darüber hinaus wurden 70,3 % aller Fahrzeuge nach 2011 und 95,9 % der Fahrzeuge nach 2001 zugelassen. Demnach überlappen nur knapp 30 % der gemessenen Fahrzeuge mit dem Datensatz der Vorgängerkampagne von 2011. Dies ist bei der Interpretation der akustischen Ergebnisse im Kapitel 6 zu beachten.

3.4 Kraftstoffquellen

Die folgende Abbildung 18 zeigt die Verteilung des Gesamtdatensatzes bezüglich der Kraftstoff- oder Energiequelle. Diese Information konnte von 38.126 Datenpunkten (96,0 %) erhoben werden. Die folgenden Daten und Prozentsätze beziehen sich auf diesen Anteil des Gesamtdatensatzes.

Abbildung 18: Histogramm Kraftstoff- oder Energiequelle



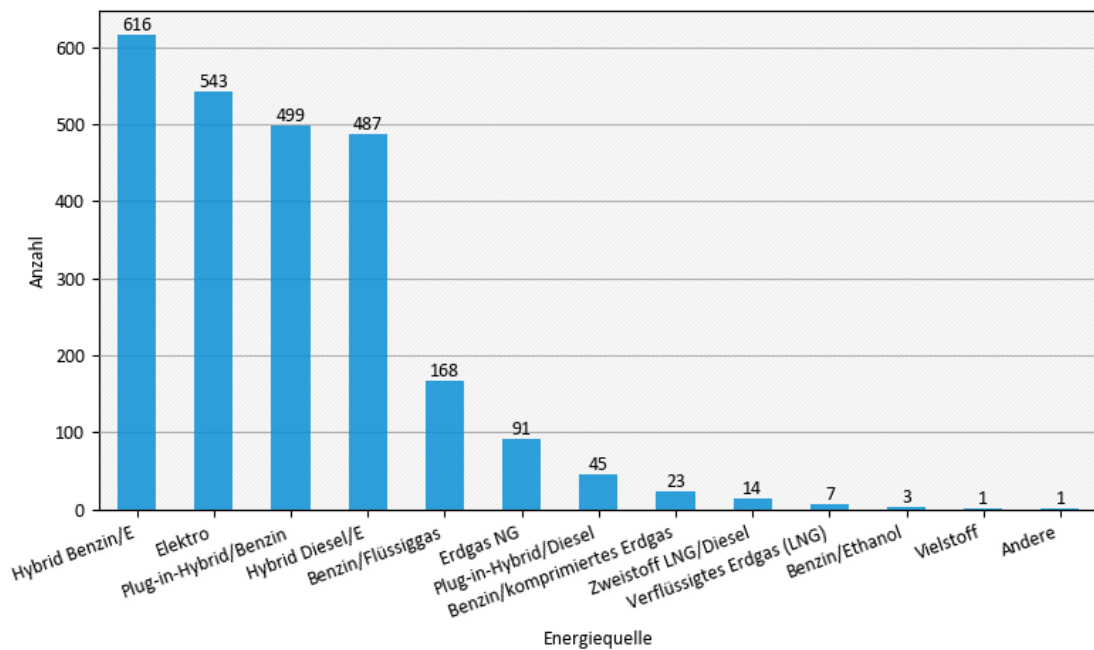
Verteilung der Kraftstoff-/Energiequellen aller gemessenen Fahrzeuge. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Etwa die Hälfte (52,3 %) der Fahrzeuge haben einen Diesel-Motor, 41,1 % der Fahrzeuge werden mit Benzin betrieben. Der Rest teilt sich hauptsächlich auf Elektro-Fahrzeuge, hybride

¹¹ https://de.wikipedia.org/wiki/Konjunkturpaket_II

Elektro-Fahrzeuge und LPG-betriebene (Benzin/Flüssiggas) Fahrzeuge auf. Für die bessere Visualisierung sind die Kraftstoffarten mit geringeren Anteilen nochmals ohne die Kraftstoffarten Diesel und Benzin in Abbildung 19 dargestellt.

Abbildung 19: Histogramm Kraftstoff- oder Energiequelle, ohne Hauptkomponenten Diesel und Benzin



Verteilung der Kraftstoff-/Energiequellen aller gemessenen Fahrzeuge ohne Benzin und Diesel. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

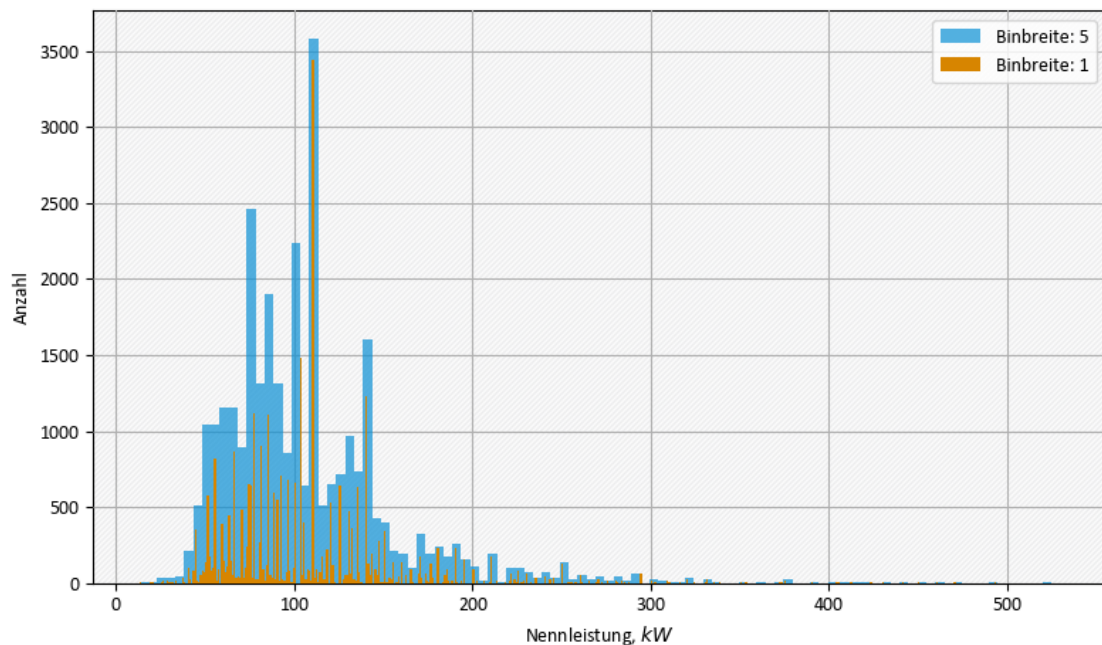
Der Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass alle hybriden Fahrzeuge gemeinsam mit einer Anzahl von 1.647 einen Anteil von 4,3 % des Gesamtdatensatzes ausmacht. Reine Elektrofahrzeuge kommen auf einen Anteil von 1,4 % (543 Fahrzeuge). Dieser Anteil entspricht sehr gut dem der Zulassungszahlen Statista, was zeigt, dass der erhobene Datensatz für das Gesamtfahrzeugkollektiv in Deutschland repräsentativ ist.

3.5 Weitere Verteilungen der Fahrzeugflotte

3.5.1 Verteilung der Nennleistung

Für die Kategorie PKW ist in Abbildung 20 die Verteilung der Nennleistung in kW aufgetragen. Zu jedem Datenpunkt der Kategorie PKW konnte der Wert der Leistung abgerufen werden (100 % des Datensatzes für PKW).

Abbildung 20: Histogramm Nennleistung PKW



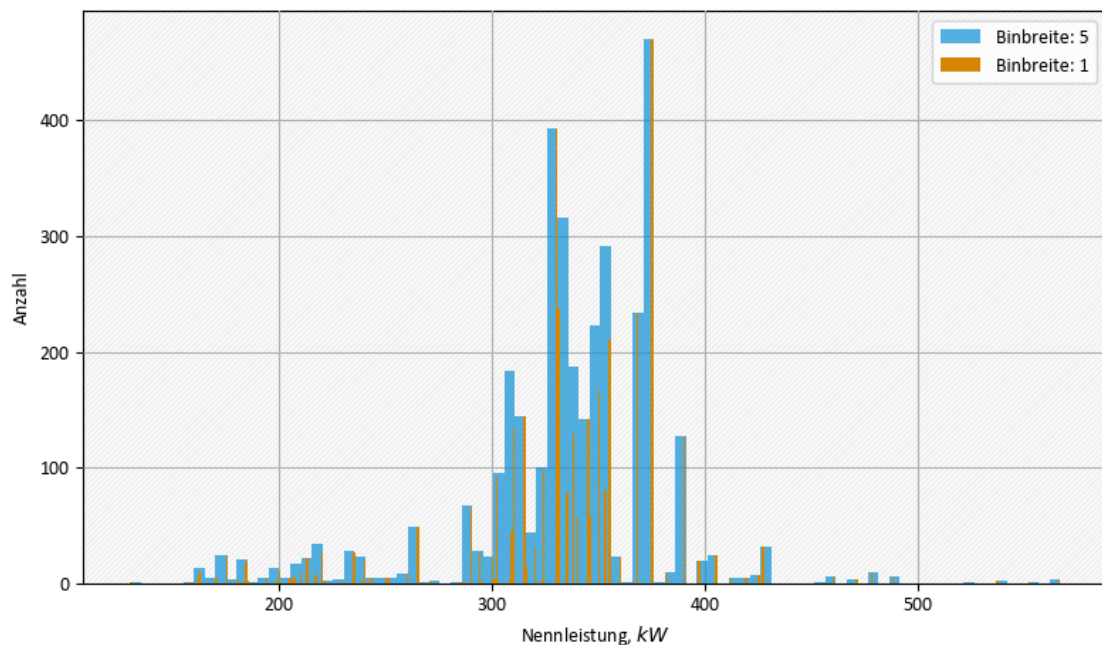
Verteilung der Nennleistung der gemessenen PKW in zwei verschiedenen Auflösungen. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Das Histogramm ist hier in zwei verschiedenen Auflösungen dargestellt. Die orangenen Balken weisen die maximale Auflösung auf. Zur Übersichtlichkeit ist die Verteilung ebenfalls mit einer größeren Klassenbreite dargestellt (blau), um Sondereffekte auszuschließen.

Es ist ein deutliches Maximum bei 110 kW (= 150 PS) zu erkennen. 3.440 von 29.716 PKW (11,6 %) weisen diesen Nennleistungswert auf. Im Bereich 20 kW bis 190 kW erkennt man eine annähernde Normalverteilung der Nennleistungen. Diese wird im Bereich über 190 kW durch einen langen Schwanz an einzelnen Extremwerten ergänzt. Die maximale Leistung eines einzelnen gemessenen PKW liegt bei 530 kW (= 720 PS) – hier wurde ein McLaren 720S erfasst. Die minimale Leistung liegt bei 13 kW (= 18 PS) – hier wurde ein Fiat 500 aus dem Jahr 1965 erfasst.

Die Verteilung der Nennleistung ist für die Kategorie LKW in Abbildung 21 aufgetragen. Auch hier konnte zu jedem Datenpunkt der Wert der Leistung abgerufen werden (100 % des Datensatzes für LKW). Es wurden nur vierachsige LKW betrachtet. Das Histogramm ist abermals in zwei verschiedenen Klassenbreiten dargestellt.

Abbildung 21: Histogramm Nennleistung LKW

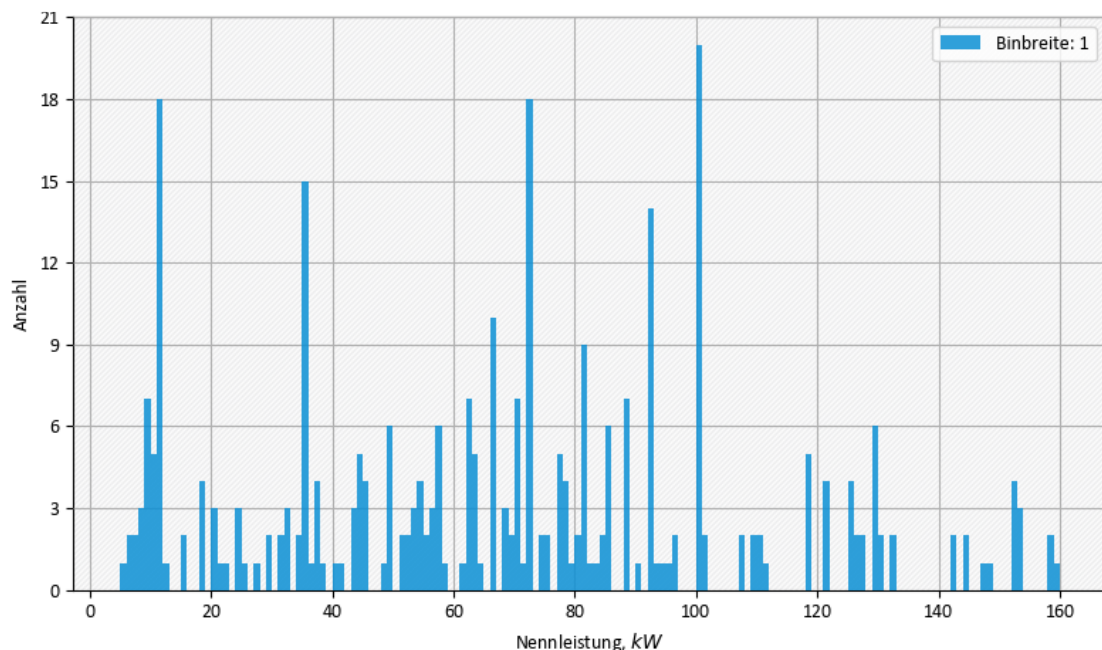


Verteilung der Nennleistung der gemessenen LKW (vierachsig) in zwei verschiedenen Auflösungen. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Das Hauptmaximum der Verteilung für LKW liegt bei 375 kW (= 510 PS), ein zweites lokales Maximum ist bei 330 kW (= 449 PS) aufzufinden. Der minimal erfasste Wert beträgt 130 kW (= 177 PS), der maximale Wert beträgt 567 kW (= 771 PS).

Im Folgenden ist zum Vergleich die Verteilung der Nennleistung für Krafträder aufgetragen. Hier konnten für 318 von 337 gemessenen Motorrädern (94,4 %) die Daten der Nennleistung abgefragt werden.

Abbildung 22: Histogramm Nennleistung Kraftrad



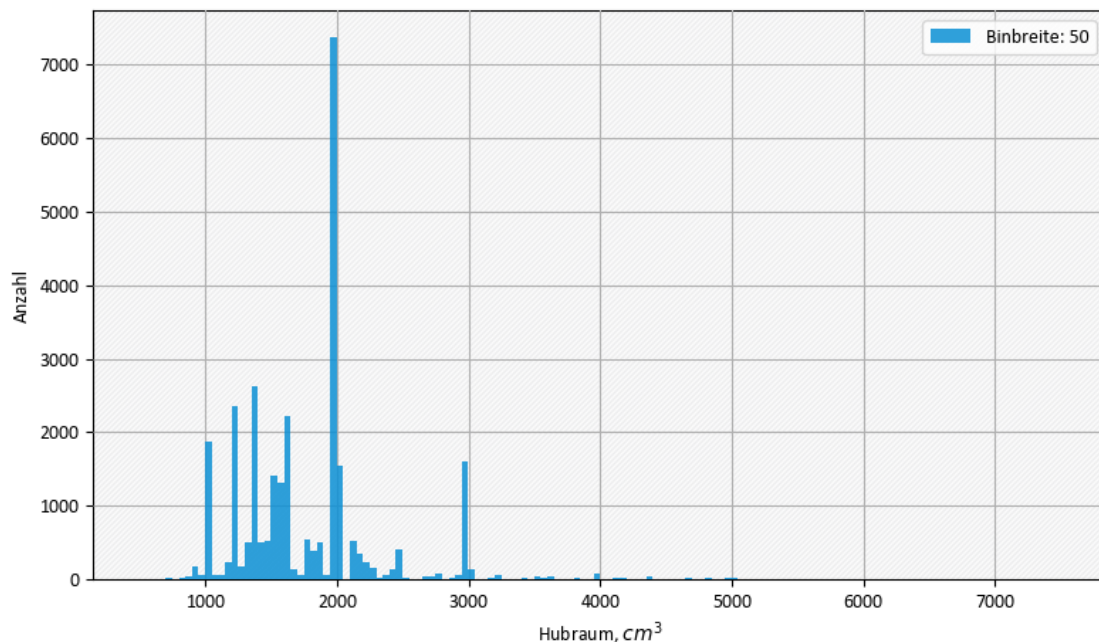
Verteilung der Nennleistung der gemessenen Krafträder. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Es ist erkennbar, dass die Verteilung der Leistung hier trotz einzelner Ausreißer sehr viel homogener ist als die für PKW. Die minimale Leistung von 5 kW (= 7 PS) wurde von einer NSU-Maschine aus dem Jahr 1959 aufgezeichnet. Die maximale Leistung von 160 kW (= 217 PS) wurde von einer Aprilia RSV4 1100 erfasst. Die Spitzen bei 11 kW (= 15 PS) und 35 kW (= 48 PS) liegen exakt an den Leistungsgrenzen, welche die verschiedenen Führerscheinklassen für Motorräder voneinander abgrenzen¹².

3.5.2 Verteilung des Hubraums

Von allen PKW konnte aus 29.205 oder 98,3 % die Information des Hubraums erfasst werden. Die Verteilung ist in Abbildung 23 dargestellt.

Abbildung 23: Histogramm Hubraum PKW



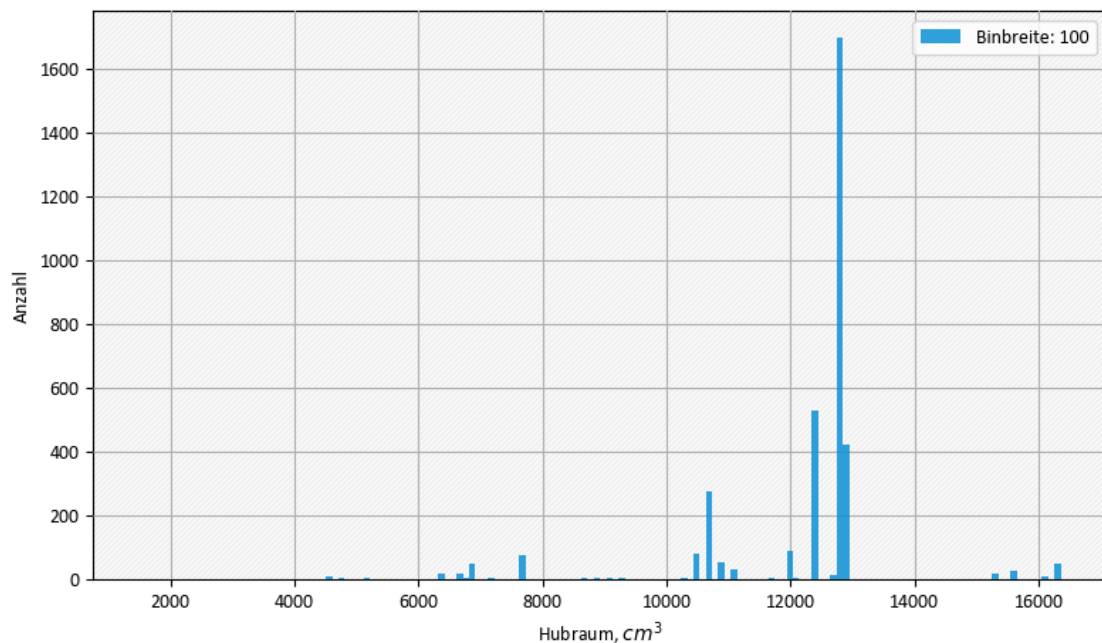
Verteilung des Hubraums der gemessenen PKW mit Verbrennungsmotor. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Es ist deutlich zu erkennen, dass die meisten PKW einen 2-Liter-Motor besitzen. Weitere typische Hubraumgrößen sind 1 Liter, 1,2 Liter, 1,4 Liter, 1,6 Liter sowie 3 Liter. Im Vergleich mit Abbildung 20 zur Nennleistung für PKW zeigt sich eine ähnliche Verteilung, da Hubraum und Leistung eng miteinander korrelieren. Der minimale Hubraum liegt bei 496 cm³ (oder 0,5 Liter) und stammt vom selben Fiat 500 aus dem Jahr 1965, der auch die minimale Nennleistung aufweist. Der maximale Hubraum von 7,5 Litern stammt von einem US-amerikanischen Ford aus dem Jahr 1978.

Von den vierachsigen LKW konnte aus 3521 (100 %) die Information des Hubraums erfasst werden. Die Verteilung ist in Abbildung 24 dargestellt.

¹² Führerscheinklasse A1 bis 11 kW und Führerscheinklasse A (neu) bis 35 kW

Abbildung 24: Histogramm Hubraum LKW

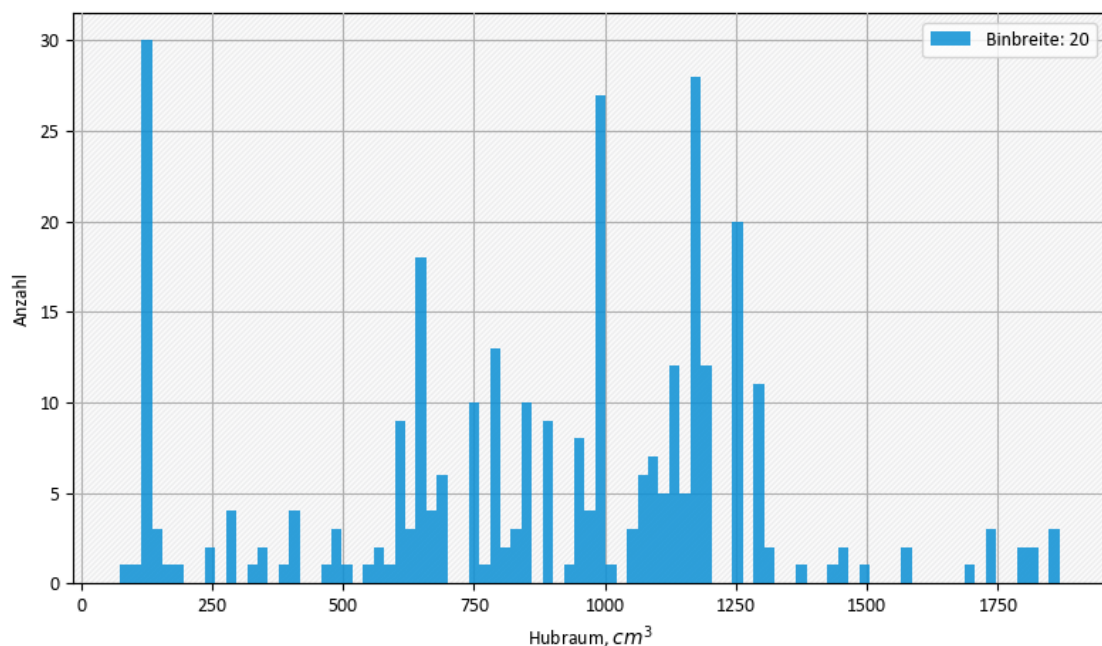


Verteilung des Hubraums der gemessenen LKW (vierachsig). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Großteil der erfassten LKW einen Hubraum von 12,8 Litern besitzen. Der minimale Wert befindet sich bei 1500 cm³, der maximale Wert tritt bei 16,3 Litern auf.

Im Folgenden ist zum Vergleich das Histogramm für Krafträder aufgetragen. Es wurden die Daten zum Hubraum für insgesamt 318 Motorräder (94,4 %) ermittelt.

Abbildung 25: Histogramm Hubraum Kraftrad



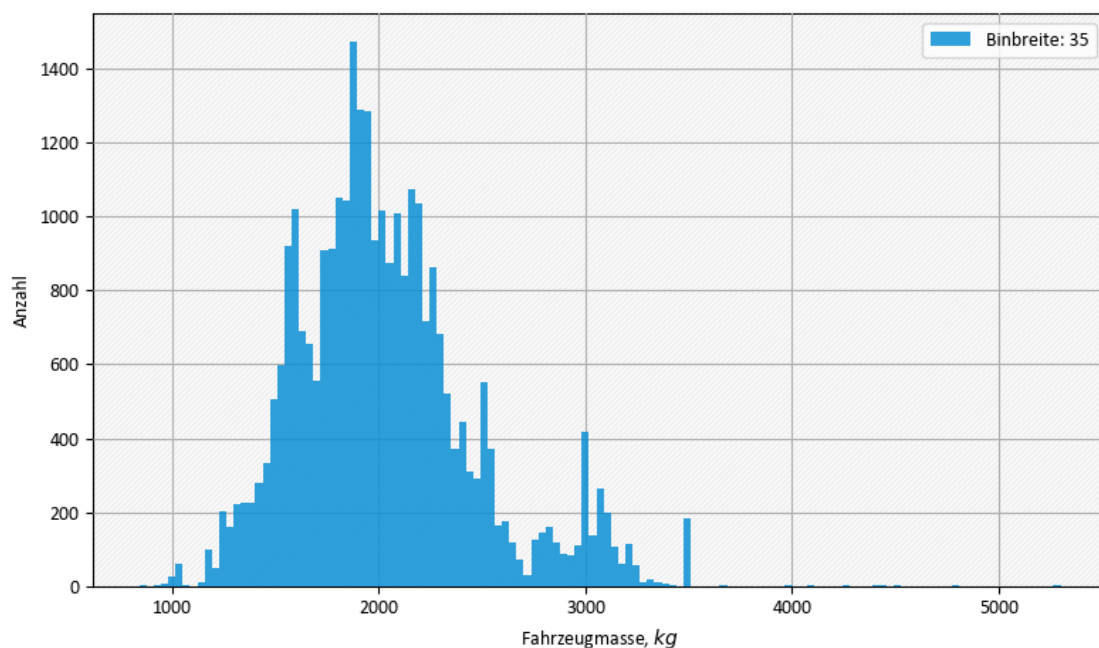
Verteilung des Hubraums der gemessenen Krafträder. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Die gängigsten Hubraumgrößen für Motorräder sind demnach 125 cm³, 800 cm³, 1000 cm³, 1100 cm³ und 1250 cm³. Auch hier erkennt man eine ungefähre Überlappung mit dem Histogramm der Nennleistung aus Abbildung 22. Die Spitze bei 125 cm³ grenzt die unterschiedlichen Führerscheinklassen voneinander ab (analog zur Grenze bei 11 kW). Die zweite Grenze (35 kW) hat jedoch keine konkrete Hubraumbeschränkung, weshalb diese Spitze hier nicht zu erkennen ist und stattdessen in mehrere Balken zwischen 500 cm³ und 750 cm³ zerfällt. Der maximale Hubraum von 1868 cm³ wurde dreimal erfasst, jeweils von unterschiedlichen Modellen des Herstellers Harley-Davidson.

3.5.3 Verteilung der Fahrzeugmasse

Von allen PKW konnte aus 100 % (29.716) die Information der technisch zulässigen Gesamtmasse erfasst werden. Die Verteilung ist in Abbildung 26 dargestellt.

Abbildung 26: Histogramm zulässige Fahrzeugmasse PKW

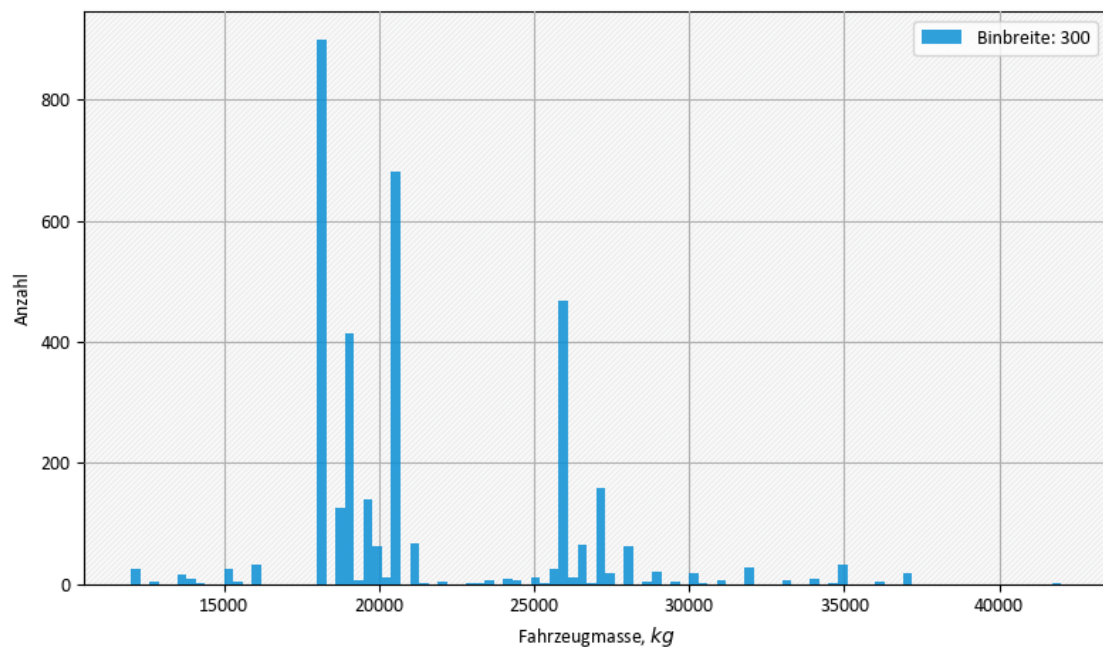


Verteilung der zulässigen Gesamtmasse der gemessenen PKW. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Im Vergleich zur Verteilung des Hubraums sind auch hier einzelne Spitzen auszumachen, jedoch sind diese deutlich weniger prominent – die Verteilung ähnelt insgesamt einer Normalverteilung. Lokale Maxima liegen bei 1,55 t, 1,9 t, 2,5 t, 3,0 t, 3,1 t und 3,5 t. Offensichtlich werden viele Fahrzeuge so konstruiert, dass sie unter der 2-t-Grenze liegen. Der minimale Wert von 840 kg stammt auch hier von dem bereits erwähnten Fiat 500 aus dem Jahr 1965.

Die zulässige Gesamtmasse wird im Folgenden für die gesamte Kategorie LKW (zweiachsige sowie vierachsige LKW) betrachtet. Von den LKW konnte aus 100 % (4304) die Information der zulässigen Gesamtmasse erfasst werden. Die Verteilung ist in Abbildung 27 dargestellt.

Abbildung 27: Histogramm zulässige Fahrzeugmasse LKW

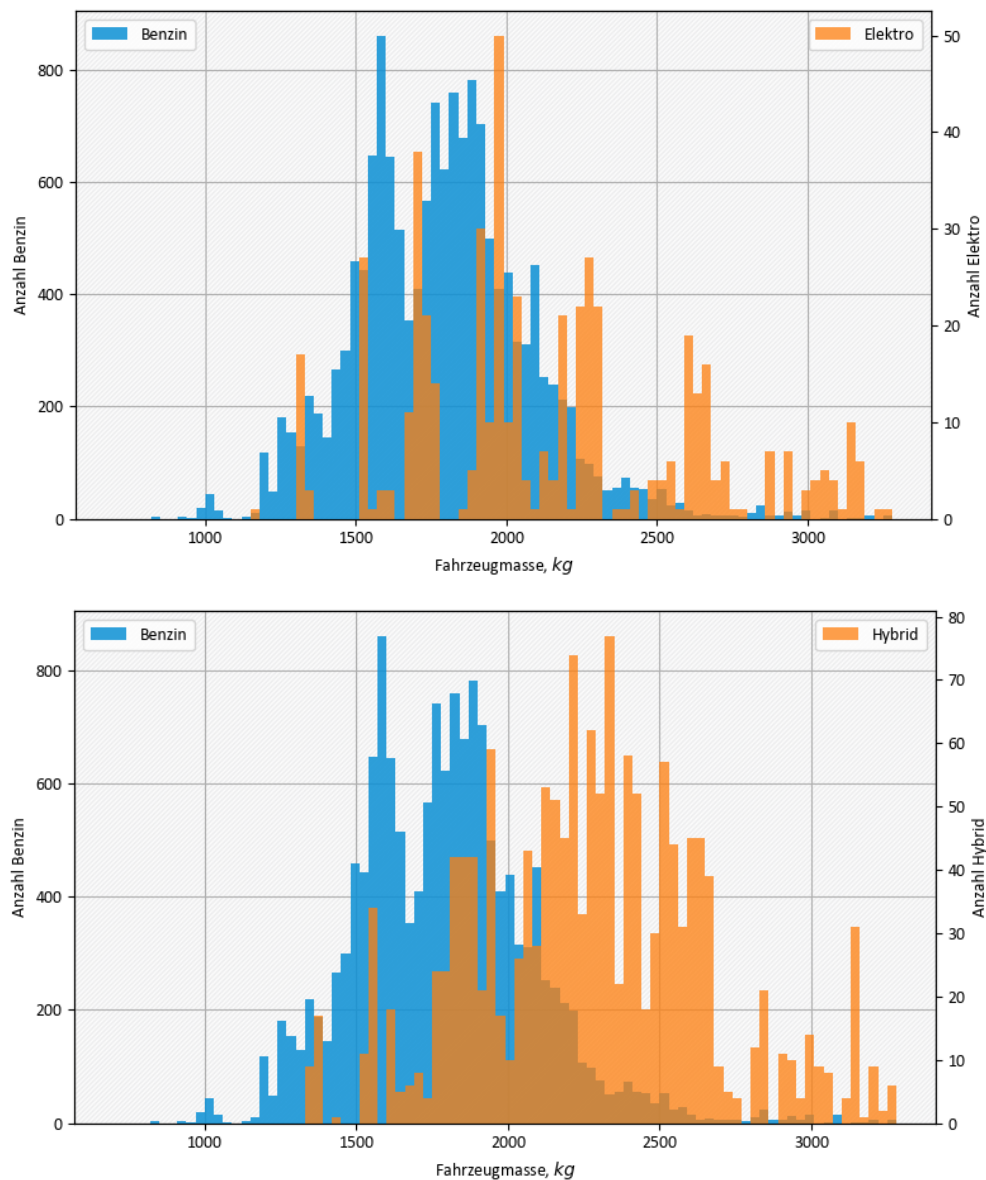


Verteilung der zulässigen Gesamtmasse der gemessenen LKW (beinhaltet zweiachsige sowie vierachsige LKW, zweiachsige LKW haben eine zul. Gesamtmasse < 12 t). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Hier erkennt man einzelne Spitzen, die wesentlich isolierter sind als beim Histogramm für PKW. Die meisten LKW haben eine zulässige Gesamtmasse von 18 t, 20 t und 26 t. Das schwerste Fahrzeug mit 42 t war ein Kipper/Baustellen-Transporter.

In der Abbildung 28 ist ein Vergleich der Histogramme der Fahrzeugmassen von Elektro-Fahrzeugen zu Benzinern (oben) bzw. zwischen Hybrid-Fahrzeugen zu Benzinern (unten) dargestellt.

Abbildung 28: Vergleich Histogramm zulässige Fahrzeugmasse (PKW)



Vergleich der Verteilungen der zulässigen Gesamtmasse zwischen PKW mit Kraftstoff-/Energiequelle „Benzin“ und „Elektro“ (oben) und „Benzin“ und „Hybrid“ (unten). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

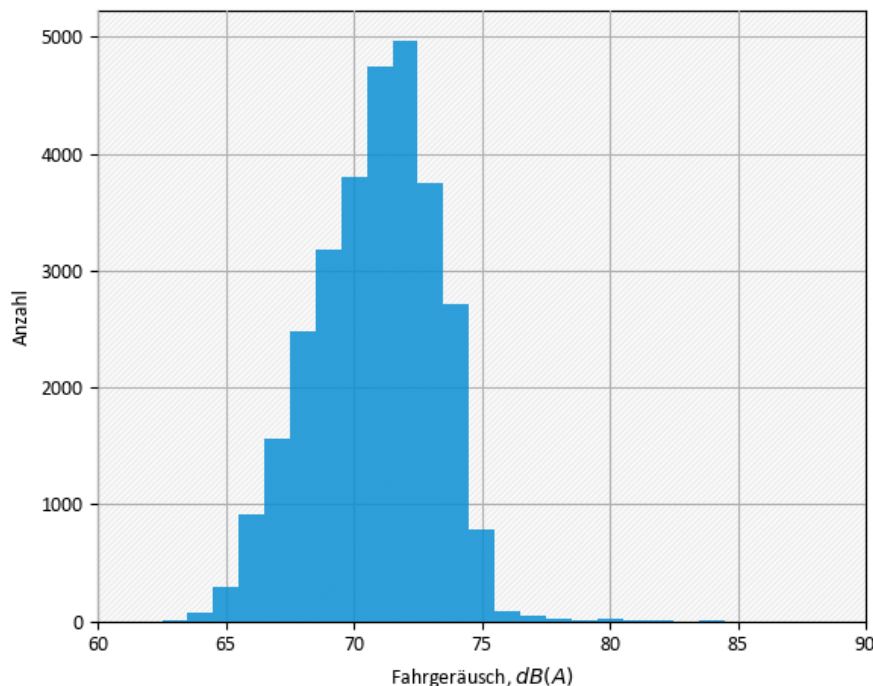
Hierbei wurde für die Anzahl der Benziner eine zweite Achse (rechts) eingefügt, um die Höhe der Histogramme in einem vergleichbaren Maß zu halten (da mehr Benziner als Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge gemessen wurden). Es ist zu erkennen, dass die Masse der E-Fahrzeuge deutlich diskreter verteilt ist, als die der Benziner. Das Maximum in der Häufigkeitsverteilung für die E-Fahrzeuge liegt bei knapp 2 t, während die breite Spitze der Benziner zwischen 1,7 t und 1,9 t liegt, also im Schnitt 200 kg unter der Fahrzeugmasse von Elektro-Fahrzeugen. Außerdem gibt es generell deutlich mehr schwere Fahrzeuge über 2 t, die einen Elektro-Antrieb haben, was an dem zusätzlichen Gewicht der Batterie liegt. Bei den Hybridfahrzeugen sehen wir eine weniger diskrete Verteilung, dafür deutlich höhere Werte der zulässigen Gesamtmasse. Dies liegt daran, dass diese Fahrzeuge zwei Motorisierungsarten (Verbrenner und Elektro) und eine extra Batterie beinhalten.

Aufgrund des geringen Einflusses der Fahrzeugmasse von Krafträdern auf den Vorbeifahrtpegel wird hier auf die Darstellung der Gewichtsverteilung verzichtet.

3.5.4 Verteilung des Typprüfwerts Fahrgeräusch

Beim Typprüfwert gibt es für ältere Fahrzeuge (besonders vor 1980) zusätzlich zum Grenzwert einen beschreibenden Buchstaben – wie „D“ für DIN-Phon-Messungen, oder „N“ für National. Später sind im Zulassungsschein nur noch Zahlenwerte angegeben. Von allen PKW wurden im Folgenden nur die „reinen Zahlenwerte“ betrachtet. Diese machen 99,2 % aus (29.488 Einträge), welche in der Abbildung 29 als Häufigkeitsverteilung dargestellt sind.

Abbildung 29: Histogramm Fahrgeräusch PKW



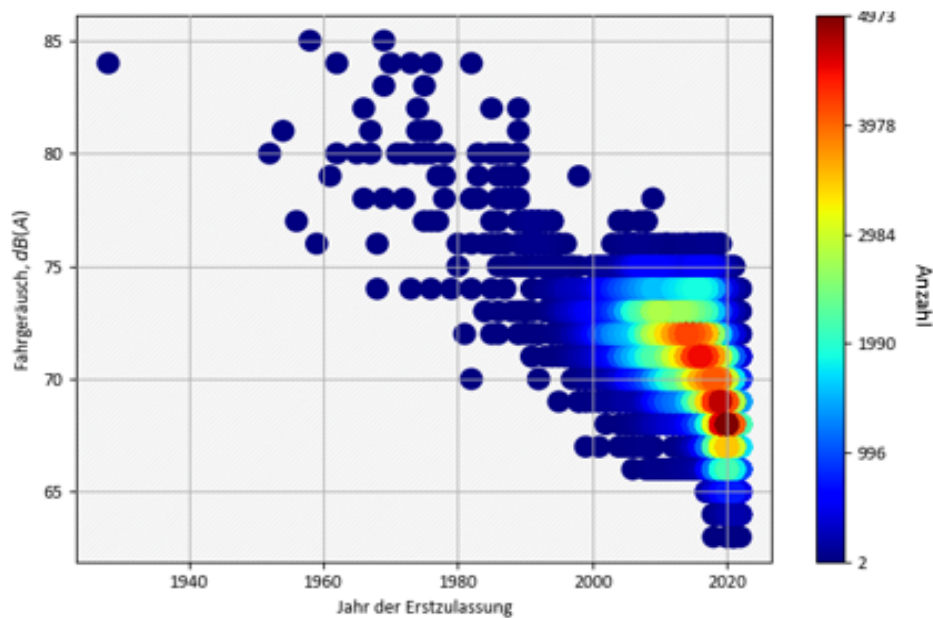
Verteilung des Typprüfwertes für das Fahrgeräusch aller gemessener PKW. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Das Maximum der Verteilung befindet sich bei 72 dB(A), was mit dem oberen Grenzwert für PKW ab dem 1. Juli 2016 mit einem Leistungs-Masse-Verhältnis von weniger als 120 kW/1000 kg übereinstimmt¹³. Abbildung 20 zeigt, dass die meisten gemessenen PKW eine Nennleistung von 110 kW oder weniger aufweisen. Wie in Abbildung 26 ermittelt, wiegt ein durchschnittlicher PKW etwa 1,8 t, womit der Großteil der Fahrzeuge in das genannte Leistungs-Masse-Verhältnis fällt. Seit dem 1. Juli 2020 ist der obere Grenzwert auf 70 dB(A) heruntergesetzt.

Generell lässt sich der Trend hin zu schärferen (niedrigeren) Geräuschgrenzwerten in der Abbildung 30 ablesen, welche die Fahrgeräusch-Verteilung in Abhängigkeit vom Zulassungsjahr darstellt. Hier ist die Verteilungsdichte farblich hervorgehoben, wobei rot eine hohe Dichte und blau eine geringe Dichte beschreibt.

¹³ https://assets.adac.de/image/upload/v1674473366/ADAC-eV/KOR/Text/PDF/geraeusche-von-pkw-adac-infoblatt_stngmi.pdf

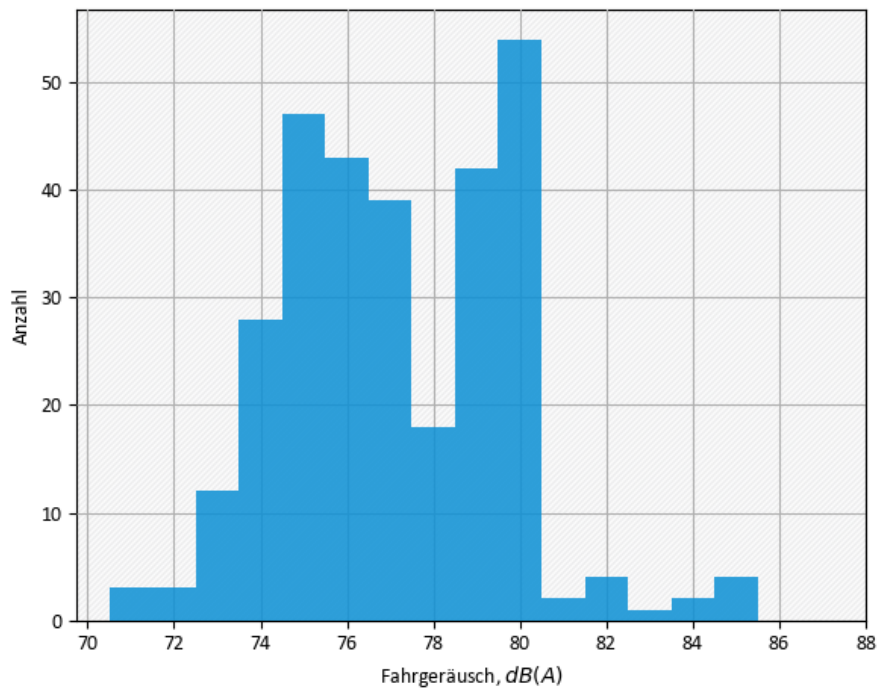
Abbildung 30: Fahrgeräusch über Zulassungsjahr PKW



Typprüfwert für das Fahrgeräusch aufgetragen über dem Erstzulassungsjahr aller gemessenen PKW. Die Verteilung oder „Dichte“ der Datenpunkte ist farblich hervorgehoben. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

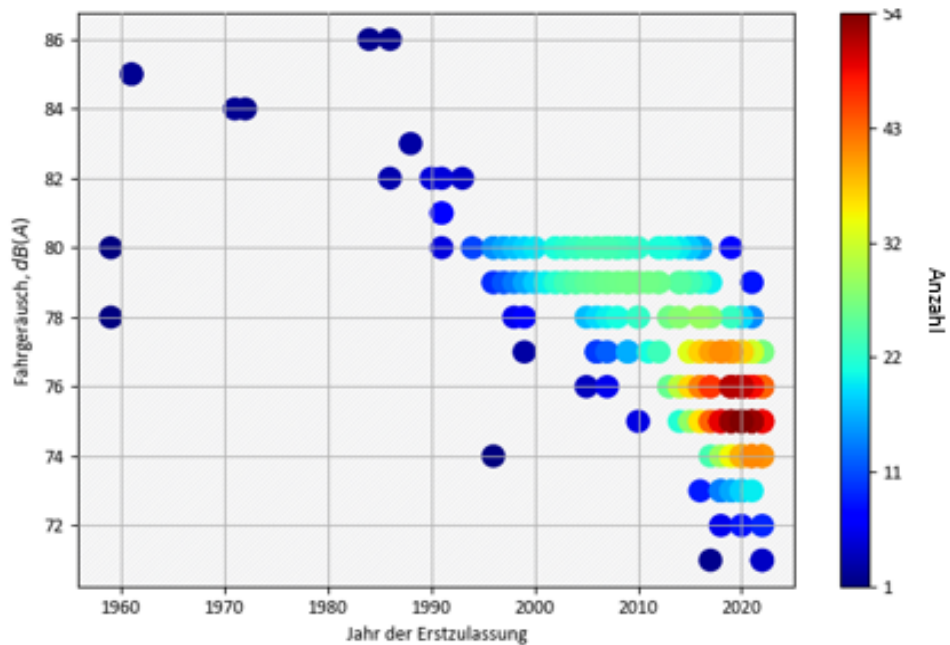
Zum Vergleich ist nachfolgend in Abbildung 31 die Verteilung des Fahrgeräusches für Motorräder aufgetragen. Der Wert für das Fahrgeräusch wurde für 302 Krafträder (89,6 %) ermittelt. Der Großteil der gemessenen Fahrzeuge befindet sich hier zwischen der 74-dB(A)- und der 80-dB(A)-Grenze – mit einer markanten Vertiefung bei 78 dB(A). Im Vergleich zur Verteilung für PKW ist die Typzulassung für Motorräder wesentlich breiter gestreut. Um die Vertiefung bei 78 dB(A) zu erklären, kann Abbildung 32 herangezogen werden, welche erneut das Fahrgeräusch über dem Zulassungsjahr darstellt. Hier bemerkt man, dass sich die Typzulassungen mit einem Fahrgeräusch von 79 dB(A) und 80 dB(A) über einen sehr breiten Zeitraum von ca. 30 Jahren erstrecken, weshalb die entsprechenden Balken im Histogramm (Abbildung 31) überproportional hoch ausfallen. Zudem sind Fahrzeuge, die nach 2010 zugelassen wurden, größtenteils mit einem Fahrgeräusch-Wert von 77 dB(A) oder niedriger zugelassen, was den Einbruch bei der 78-dB(A)-Marke erklärt.

Abbildung 31: Histogramm Fahrgeräusch Kraftrad



Verteilung des Typprüfwertes für das Fahrgeräusch aller gemessenen Krafträder. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 32: Fahrgeräusch über Zulassungsjahr Kraftrad



Typprüfwert für das Fahrgeräusch aufgetragen über dem Erstzulassungsjahr aller gemessenen Krafträder. Die Verteilung oder „Dichte“ der Datenpunkte ist farblich hervorgehoben. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4 Auswertung der Vorbeifahrtmessungen

In diesem Kapitel werden die akustischen Messergebnisse unabhängig von den technischen Fahrzeugparametern betrachtet. Es wird lediglich die Fahrzeugklasse unterschieden, insbesondere PKW, LKW (zweiachsige sowie vierachsige), Transporter, Krafträder und Omnibusse.

4.1 Allgemein

4.1.1 Bewertung der Ausbreitungsbedingungen

Die Ausbreitungsbedingungen für SPB-Messungen sind in der ISO 11819-1:2002-05 geregelt. So soll neben dem Fahrstreifen bis zu einem Abstand von 3,75 m neben der Mitte des Fahrstreifens die Bodenoberfläche eine ähnliche Schallabsorption aufweisen wie der Fahrstreifen selbst. Danach (noch näher am Mikrofon) gibt es keine Anforderung an die Bodenbeschaffenheit.

In der Praxis ist diese Anforderung in der Regel an Autobahnen und autobahnähnlichen Abschnitten einfach einzuhalten, da die genannte Fläche mit ähnlichen schallabsorbierenden Eigenschaften durch den Standstreifen gegeben ist. Innerorts und an kleineren Staats- und Bundesstraßen ist es jedoch in der Praxis nicht immer möglich, diese Anforderung einzuhalten.

Im Projekt konnte die genannte Anforderung an 23 von 27 Messpunkten komplett und an vier Messpunkten teilweise eingehalten werden.

Um ein besseres Verständnis über den Einfluss eines etwas stärker absorbierenden Streifens (z. B. aus einem Grasstreifen) zu bekommen, wurden an allen Messpunkten die beiden Mikrofonhöhen in 1,2 m und 3,0 m miteinander verglichen. Für die Messhöhe 3,0 m wird davon ausgegangen, dass sich die veränderte Oberflächenimpedanz durch den Grasstreifen nicht mehr nennenswert auf die akustischen Messungen auswirkt. Um die ermittelten Ergebnisse anschaulich darzustellen, werden im Folgenden zwei Messsituationen, nämlich die Messpunkte MP1 (optimale Ausbreitungsbedingungen) und MP2 (Ausbreitung teilweise über einen Grasstreifen) miteinander verglichen.

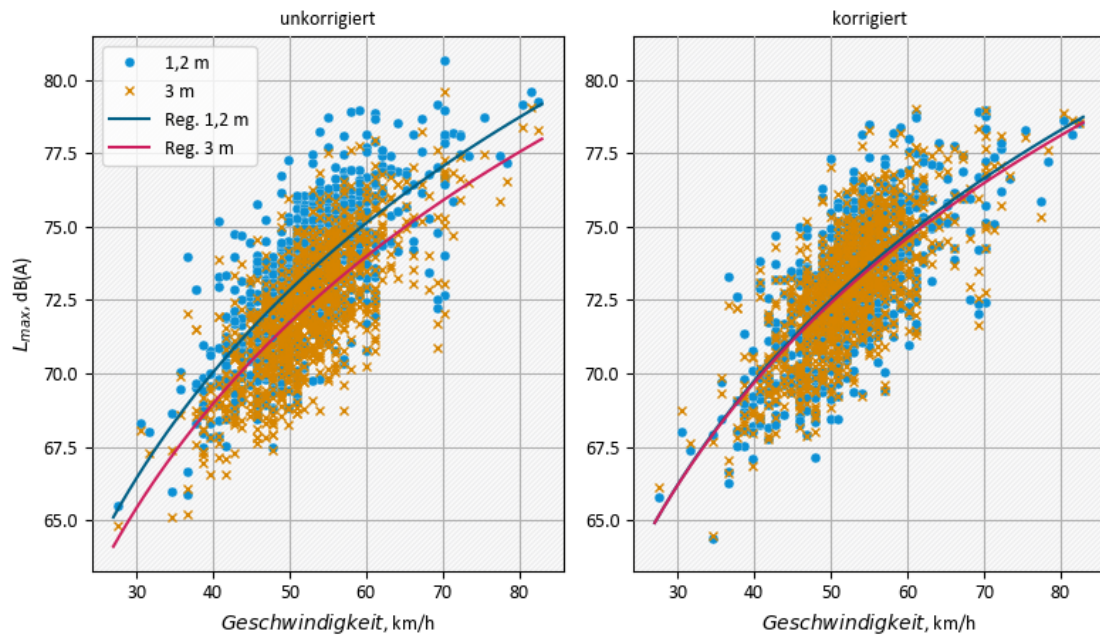
Abbildung 33: Exemplarische Messpositionen mit und ohne Bodenabsorption



Unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen: links: Schallausbreitung komplett über schallhartem Untergrund (MP1), rechts: Schallausbreitung über breite begrünte Fläche mit absorbierendem Charakter (MP2). (Quelle: eigene Aufnahme, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

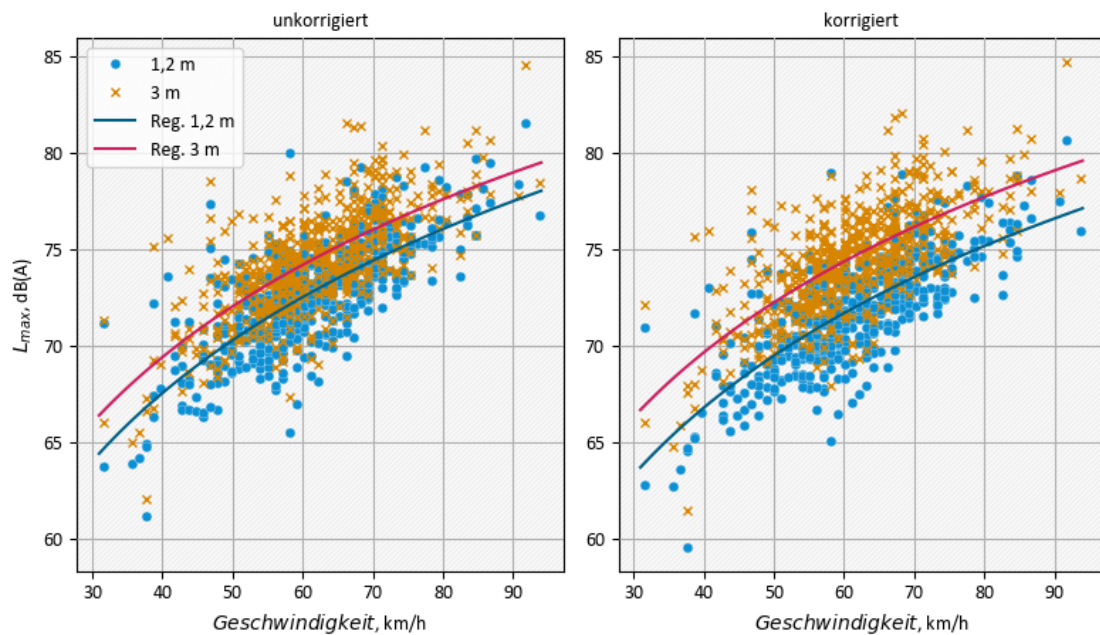
In Abbildung 34 und Abbildung 35 sind die Ergebnisse der Vorbeifahrt-Messungen gezeigt. In dem jeweils linken Diagramm sind die Messwerte für die beiden Messhöhen in 1,2 m und 3,0 m dargestellt – in dem jeweils rechten Diagramm sind die Messwerte für die Messhöhe in 3,0 m gemäß der Vorgabe in der ISO 11819-1:2002-05 korrigiert.

Abbildung 34: Messergebnisse in zwei Höhen für den MP1



Vergleich der unkorrigierten (links) und korrigierten (rechts) Schalldruckpegel der zwei Messhöhen 1,2 m und 3,0 m an MP1 (harte Schallausbreitungsfläche). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 35: Messergebnisse in zwei Höhen für den MP2



Vergleich der unkorrigierten (links) und korrigierten (rechts) Schalldruckpegel der zwei Messhöhen 1,2 m und 3,0 m an MP2 (teilweise absorbierende Schallausbreitungsfläche). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

In Abbildung 34 zum Messpunkt MP1 zeigt sich im linken Diagramm das erwartete Ergebnis: Die Schalldruckpegel liegen für die Messhöhe 3,0 m ca. 1 dB niedriger als für die Messhöhe 1,2 m. Dieser Pegelunterschied kann durch den längeren Ausbreitungsweg erklärt werden. Nach der Höhenkorrektur (rechtes Diagramm) liegen die Messwerte sehr gut aufeinander – die Regressionsgeraden sind annähernd deckungsgleich.

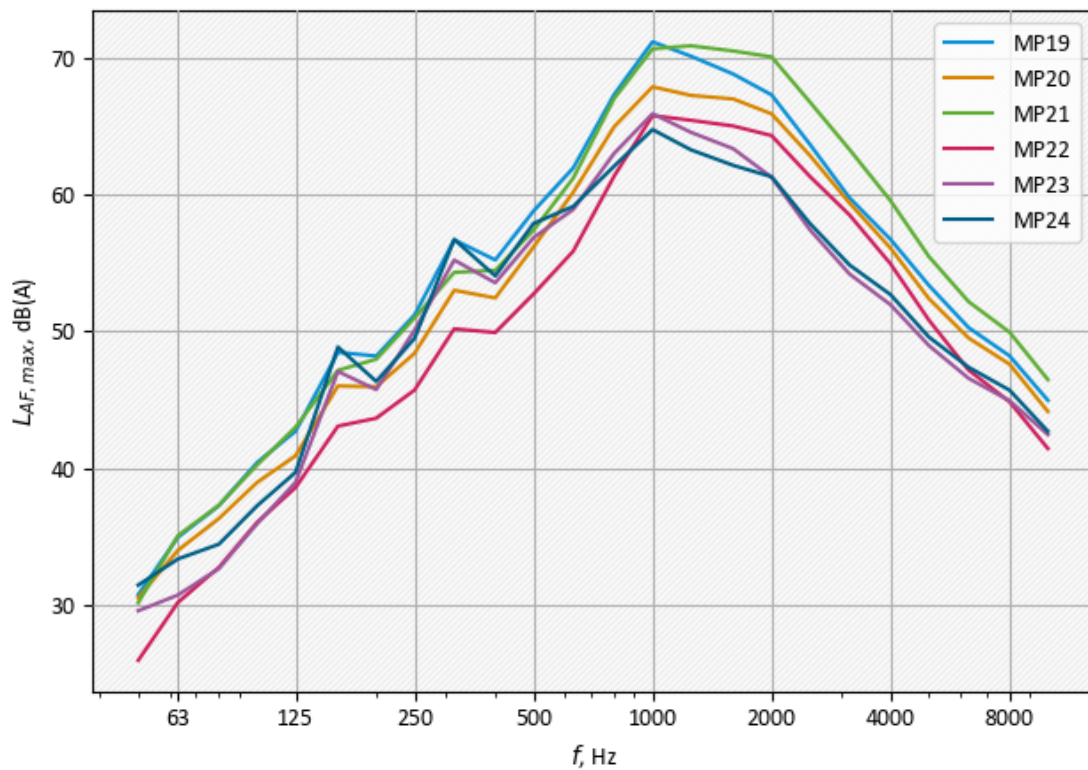
Für den Messpunkt MP2, dessen Ausbreitungsbedingungen auf dem Boden nicht normgerecht sind, liegen die Messwerte des höheren Mikrofons in 3,0 m Höhe – genau entgegengesetzt zum Verhältnis am Messpunkt MP1 – um ca. 1 dB über denen des Mikrofons in 1,2 m Höhe (vgl. linkes Diagramm in Abbildung 35). Die absorbierenden Eigenschaften scheinen also einen nennenswerten Effekt auf die Messergebnisse der niedrigeren Messposition zu haben. Wird dann noch die Höhenkorrektur der ISO 11819-1:2023 angewendet, so ergibt sich eine Differenz in den Regressionsgeraden von ca. 2,5 dB bis 3,0 dB für die beiden unterschiedlichen Höhen.

An vier Messpunkten (MP2, MP19, MP25, MP28) beeinflussten die Ausbreitungsbedingungen den gemessenen Schalldruckpegel auf 1,2 m Höhe. Nach Betrachtung der beschriebenen Unterschiede über alle Messpunkte hinweg kann die Annahme getroffen werden, dass die Messergebnisse der Messhöhe 3,0 m durchwegs stabiler sind gegenüber Störungen der freien Schallausbreitung im Vergleich zur Messhöhe 1,2 m sind und dass die Höhenkorrektur der ISO 11819-1:2023 zumindest für die hier betrachteten Fahrzeuggeräusche auf dichten Walzasphalten sehr gut funktioniert. Spektral ergeben sich in diesen beiden Messhöhen keine nennenswerten Unterschiede in den Vorbeifahrtgeräuschen (siehe Kapitel 4.3.4). Daher werden die weiteren Analysen auf Messdaten aus der Messhöhe 3,0 m aufgebaut, bei denen die Schalldruckpegel entsprechend der ISO 11819-1:2023 auf 1,2 m umgerechnet wurden. Einige Ausnahmen bezüglich der spektralen Betrachtung bei einzelnen Messpunkten werden im folgenden Kapitel begründet.

4.1.2 Anomalie einzelner Kanal-2-Spektren

Aufgrund technischer Umstände weisen die Spektren an der 3-m-Messposition (Kanal 2) an den Messpunkten MP19 bis MP24 ein Rauschen auf, was sich durch Erhöhungen bei zwei Terzen im niederfrequenten Bereich (160 Hz und 315 Hz) auswirkt. Beim spektralen Vergleich in den nachfolgenden Abschnitten wird für diese Messpunkte deshalb das Spektrum von Kanal 1 (Messhöhe 1,2 m) herangezogen. Eine Vergleichbarkeit mit den Spektren von Kanal 2 (Messhöhe 3 m) ist durch die Höhenkorrektur gegeben. Zusätzlich ist ein Vergleich der Spektren-Form zwischen Kanal 1 und Kanal 2 für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen in Kapitel 4.3.4 gegeben. Auf den Gesamtpegel hat dieses Rauschen keinen Einfluss, da die Auffälligkeiten in allen Fällen mehr als 10 dB unter dem Maximalwert liegen.

Abbildung 36: Mittlere Spektren der Maximalpegel einzelner Messpunkte

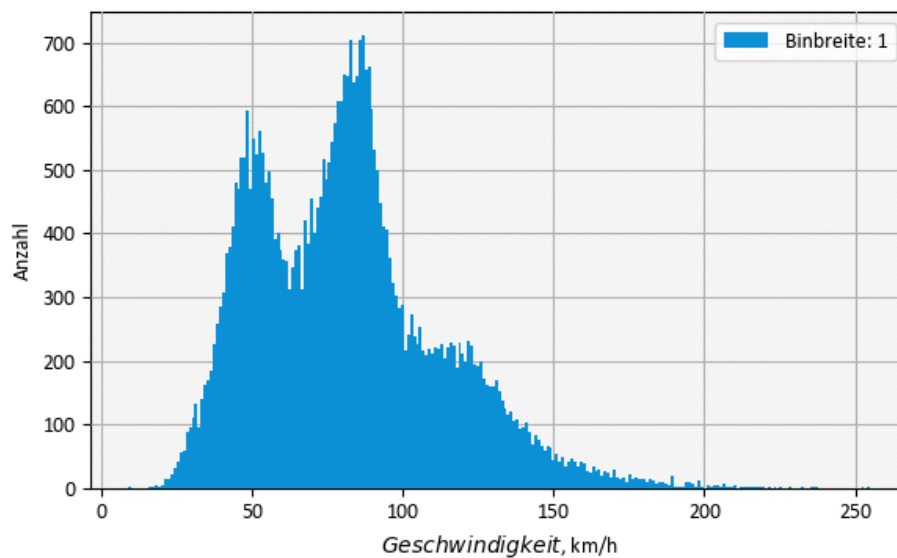


Mittlere Spektren einzelner Messpunkte zur Verdeutlichung der gemessenen Anomalie. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.2 Verteilungen des Datensatzes

Bevor auf die akustischen Eigenschaften der Messdaten eingegangen wird, sind im Folgenden die Verteilungen der Geschwindigkeit, Lufttemperatur sowie der ermittelten T_6 -Zeit des Gesamtdatensatzes dokumentiert. Die T_6 -Zeit beschreibt die Zeit, in der der Schalldruckpegel der gemessenen Vorbeifahrt um 6 dB steigt und wieder fällt und ist damit abhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit, wobei langsamere und längere Fahrzeuge eine längere T_6 -Zeit verursachen.

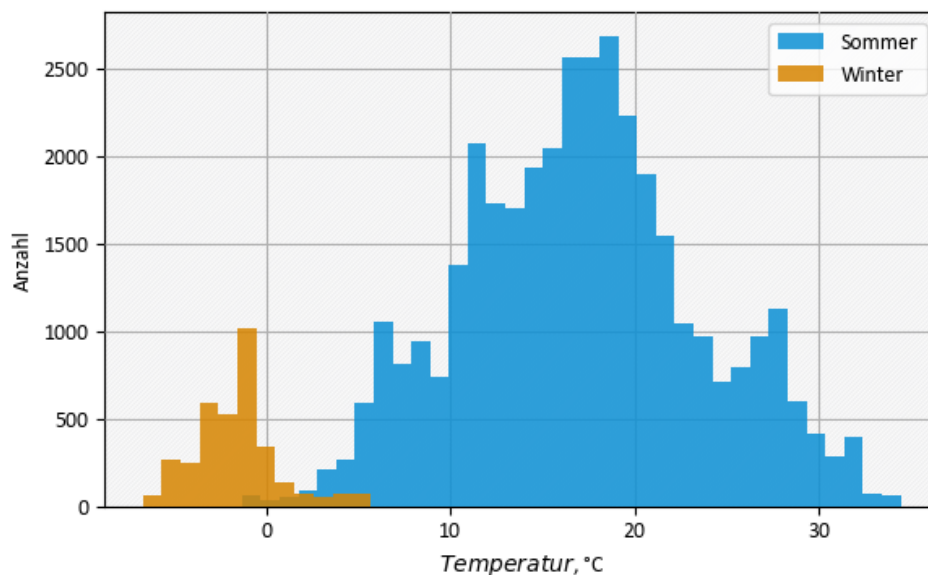
Abbildung 37: Histogramm Geschwindigkeit



Verteilung der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeiten. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Die Verteilung der Geschwindigkeit ist in 1-km/h-Schritten aufgetragen. Hier sind deutlich zwei lokale Maxima bei 50 km/h und 80 km/h zu erkennen. Außerdem ist ein breiteres Plateau zwischen ca. 110 km/h und 120 km/h zu erkennen. Diese markanten Werte fallen mit den Referenzgeschwindigkeiten der unterschiedlichen Messpunkte zusammen.

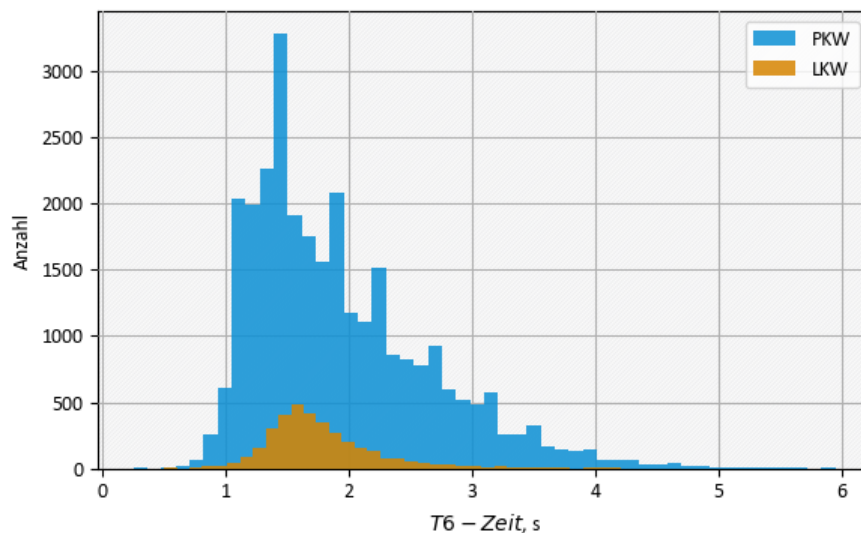
Abbildung 38: Histogramm Temperatur



Verteilung der zu jeder Vorbeifahrt gemessenen Lufttemperatur. Blau: Sommer-Messungen, orange: Winter-Messungen. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

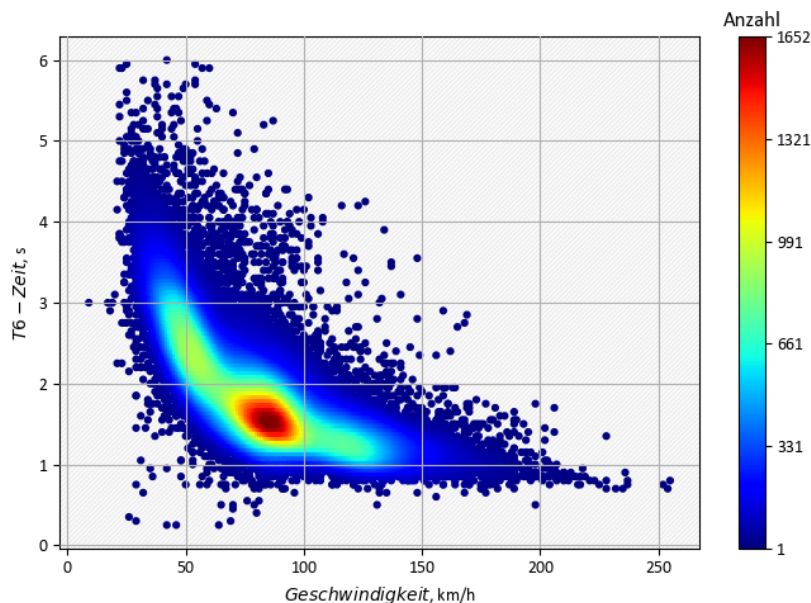
Die Verteilung der Lufttemperatur liegt hauptsächlich zwischen 10 °C und 25 °C mit einem Maximum bei 18 °C und einzelnen lokalen Nebenmaxima. Die markante Erhöhung in orange befindet sich im negativen Bereich mit bis zu -8 °C – diese Messdaten stammen von den bereits erwähnten Wintermesspunkten. Die Messwerte in den Randbereichen (0 °C – 5 °C und 30 °C – 35 °C) wurden für die Norm-konformen Berechnungen (ISO 11819-1:2002-05 sowie TP KoSD-19) ausgeschlossen.

Abbildung 39: Histogramm T_6 -Zeit



Verteilung der ermittelten T_6 -Zeit, in welcher der Vorbeifahrtpegel um 6 dB ansteigt und wieder abfällt. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 40: T_6 -Zeit über der Geschwindigkeit (Dichte farbcodiert)



Verteilung der ermittelten T_6 -Zeit über der Geschwindigkeit. Die Verteilung oder „Dichte“ der Datenpunkte ist farblich hervorgehoben. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Der Hauptanteil der ermittelten T_6 -Zeiten liegt zwischen 1 s und 2 s, was typische Werte für Vorbeifahrten zwischen 120 km/h und 50 km/h darstellt. Dies ist auch deutlich in der Dichte-Verteilung in Abbildung 39 zu sehen. Die T_6 -Zeit variiert für Vorbeifahrten unter 50 km/h hingegen stärker, weshalb ein längerer Ausläufer hin zu längeren T_6 -Zeiten im Histogramm zu erkennen ist. Insbesondere bei sehr niedrigen Fahrgeschwindigkeiten kommen lange T_6 -Zeiten vor, da dort die Emergenz des Vorbeifahrtpegelverlaufs häufig geringer ist. Analog dazu sind in Abbildung 40 bei T_6 -Zeiten > 4 s hauptsächlich Ausreißer zu erkennen.¹⁴

¹⁴ Extreme Werte von über 5 s wurden manuell betrachtet, um deren Validität zu überprüfen.

4.3 Akustische Beurteilung des Datensatzes

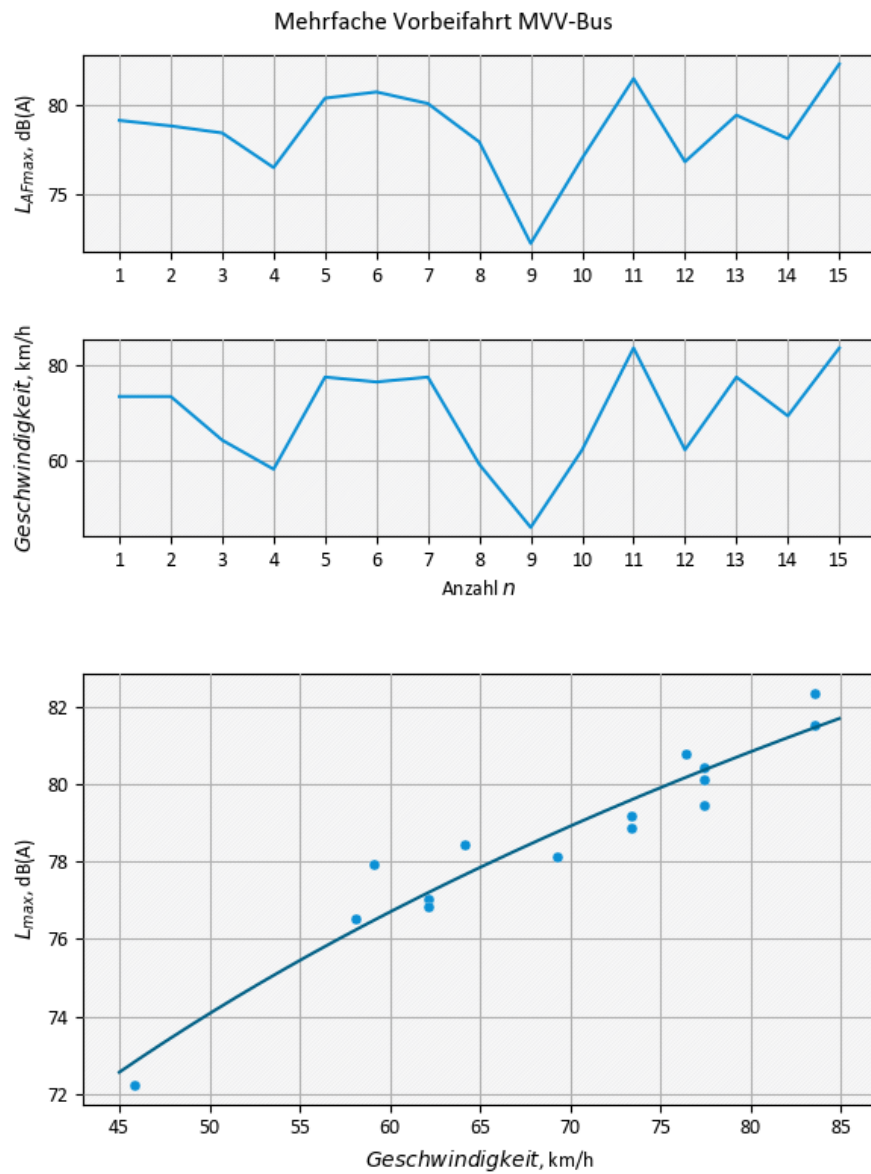
4.3.1 Akustisches Verhalten bei Mehrfachvorbeifahrten

Einzelne Messpunkte wurden von einzelnen Fahrzeugen mehrfach passiert und diese konnten auch mehrfach gemessen werden. Besonders auffällig war dies am Messpunkt MP11, an dem ein einzelner Bus des öffentlichen Nahverkehrs insgesamt 15-mal gemessen werden konnte. Über das aufgezeichnete Kennzeichen konnte sichergestellt werden, dass es sich um den identischen Bus handelte.

Die Mehrfachvorbeifahrten erlauben es, einen Eindruck zur Messgenauigkeit unter den gegebenen Feldbedingungen zu erhalten. Neben der Änderung der Lufttemperatur (die korrigiert wird) könnten auch weitere Umwelteinflüsse Auswirkungen auf die Reifen-Fahrbahn-Geräusche, die Aggregate des Fahrzeugs und deren Schallemission oder die Schallausbreitungsbedingungen haben. Zudem kann auch der Querabstand der Fahrzeuge bzw. deren Spurtreue einen Einfluss haben.

In Abbildung 41 sind die Messergebnisse des o. g. Fahrzeugs dargestellt. Die Variabilität im maximalen Vorbeifahrtpegel (oberes Diagramm) zeigt sich in ähnlicher Form auch bei der gemessenen Fahrzeuggeschwindigkeit (mittleres Diagramm). Im unteren Diagramm sind die maximalen Schalldruckpegel über der Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Bei ähnlichen Geschwindigkeiten ergeben sich Schalldruckpegel mit einer Variabilität von ca. 1 dB bis 1,5 dB. Die Standardabweichung der Vorbeifahrtpegel zur Regressionslinie beträgt dabei 0,66 dB. Diese Variabilität ist somit erwartungsgemäß etwas höher, als sie bei der Fahrzeughomologation zugelassen wäre. Wir führen dies auf die Bedingungen der Messungen zurück, insbesondere der Tatsache, dass der/die Fahrer*in weder geschult war noch von der Messsituation wusste, um möglichst gleichmäßig und z. B. mit identischem Querabstand zu fahren. Trotz dieser Umstände ergibt sich eine plausible Abhängigkeit der gemessenen Schalldruckpegel von der Geschwindigkeit.

Abbildung 41: Mehrfache Vorbeifahrt MVV-Bus



Verhalten eines einzelnen Fahrzeugs bei Mehrfachvorbeifahrten. Oben und Mitte: Schalldruckpegel und Geschwindigkeit über der Anzahl an Vorbeifahrten desselben Fahrzeugs, unten: dieselben Datenpunkte als Punktdiagramm mit Regressionslinie. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.2 Geräuschemissionen von PKW

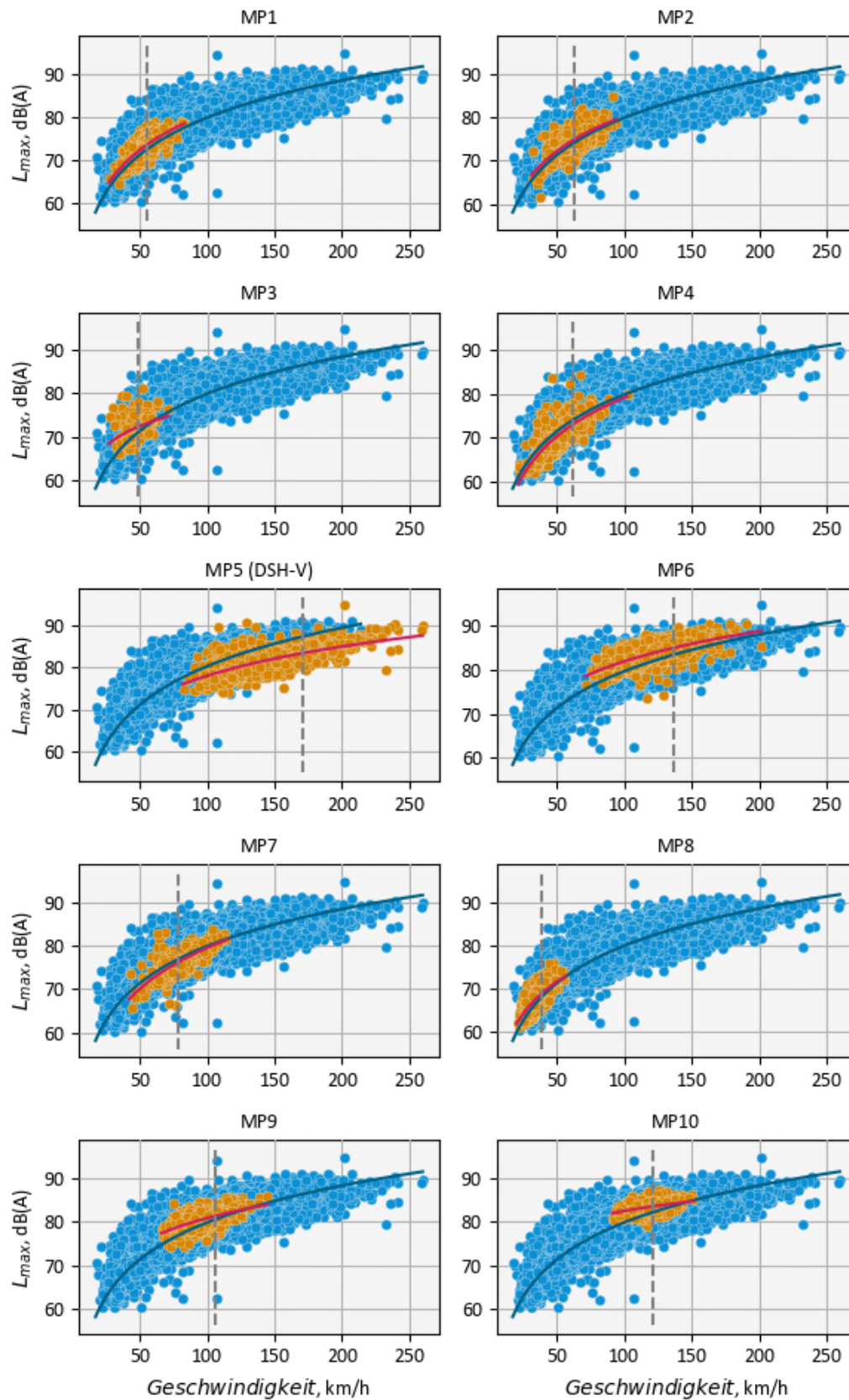
Im Folgenden werden die akustischen Messergebnisse der Fahrzeugkategorie PKW betrachtet. Hierzu ist in Abbildung 42 bis Abbildung 44 der korrigierte Schalldruckpegel über der Geschwindigkeit für jeden Messpunkt im Vergleich zum Gesamtdatensatz für PKW aufgetragen. Zusätzlich sind die Regressionslinien sowie (gestrichelt) die mittlere Geschwindigkeit an dem jeweiligen Messpunkt eingezeichnet.

Es ist zu erkennen, dass für die meisten Messpunkte die Einzelregression des Messpunktes mit der Gesamtregression aller PKW gut aufeinanderliegt. Bei einzelnen Messpunkten ergeben sich die folgenden Abweichungen:

- ▶ Bei MP5 und MP20 liegt die Regressionslinie des Messpunktes deutlich unter der des Gesamtdatensatzes. MP5 war eine DSH-V-5-Deckschicht mit geräuschkindernden Eigenschaften. MP20 weist ähnlich niedrige Vorbeifahrtpegel (und CPX-Pegel) auf. Auf Nachfrage bei den zuständigen Behörden konnte jedoch bestätigt werden, dass es sich hier tatsächlich nicht um eine DSH-V-Deckschicht, sondern um einen konventionellen Asphaltbeton handelt.
- ▶ MP17 und MP29 zeigen tendenziell höhere Vorbeifahrtpegel verglichen mit dem Gesamtdatensatz. Für die Messpunkte MP17 und MP29 haben sich in der CPX-Messung auch auffällig hohe Pegel ergeben, die das hier beschriebene Ergebnis erklären können – es handelt sich offensichtlich um Deckschichten, auf denen höhere Reifen-Fahrbahn-Geräusche emittiert werden. Zusätzlich gab es an MP29 eine leichte Steigung der Strecke.
- ▶ Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich weisen MP3, MP23 und MP25 eine tendenziell geringere Steigung der Regression auf. Dies könnte auf messpunktumgebungsabhängige Eigenschaften zurückgeführt werden. Beispielsweise ging die Strecke an MP25 leicht bergauf.
- ▶ Im höheren Geschwindigkeitsbereich weisen MP9, MP10, MP16 und MP18 eine tendenziell geringere Steigung der Regression auf. MP18 war ein Messpunkt, an dem verstärkt LKW gemessen werden sollten, weshalb die Anzahl der gemessenen PKW hier deutlich geringer ausfällt. Auch MP10 und MP16 waren Autobahn-Messpunkte und MP9 lag an einer Bundesstraße, wo verhältnismäßig mehr LKW und somit weniger PKW im Datensatz enthalten sind. Bei einem höheren LKW-Anteil ist das Umgebungsgeräusch tendenziell lauter. Leise PKW heben sich dann nicht weit genug (6 dB) vom Umgebungsgeräusch ab und gehen nicht in den Datensatz ein. Dies wirkt sich hier mutmaßlich auf eine Verringerung der Steigung der Regressionslinie aus.

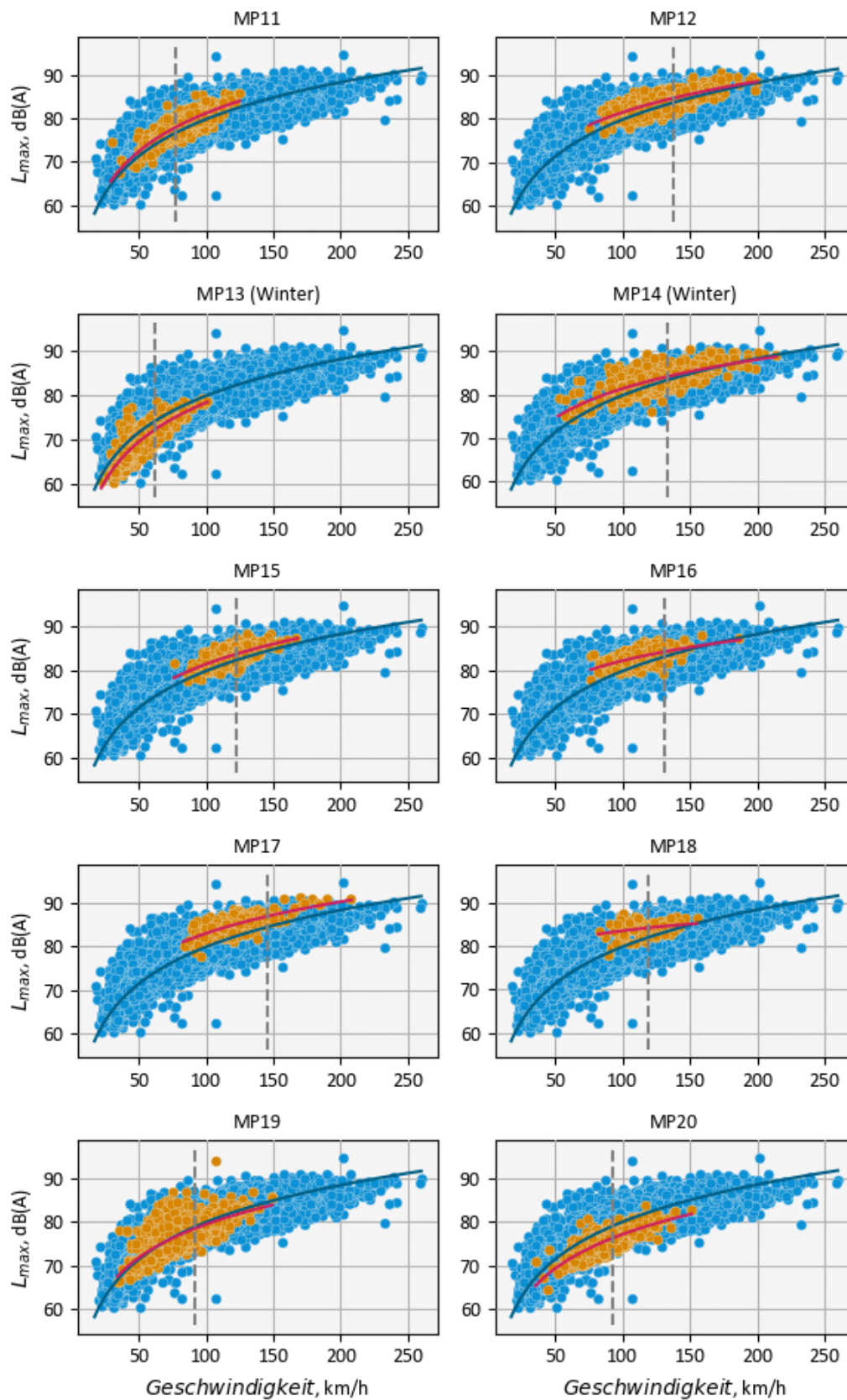
Aufgrund der guten Übereinstimmung der Regressionslinien in allen Geschwindigkeitsbereichen kann davon ausgegangen werden, dass die Regression des Gesamtdatensatzes für PKW die Situation unter Berücksichtigung einer etwas größeren Streuung gut beschreibt. Das bedeutet, dass für PKW die Geschwindigkeit und der maximale Schalldruckpegel als beschreibende Parameter der Regression genügen.

Abbildung 42: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für PKW, Messpunkte 1 bis 10



Datensätze der Messpunkte MP1 bis MP10 (orange/rot) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für PKW inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt).
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

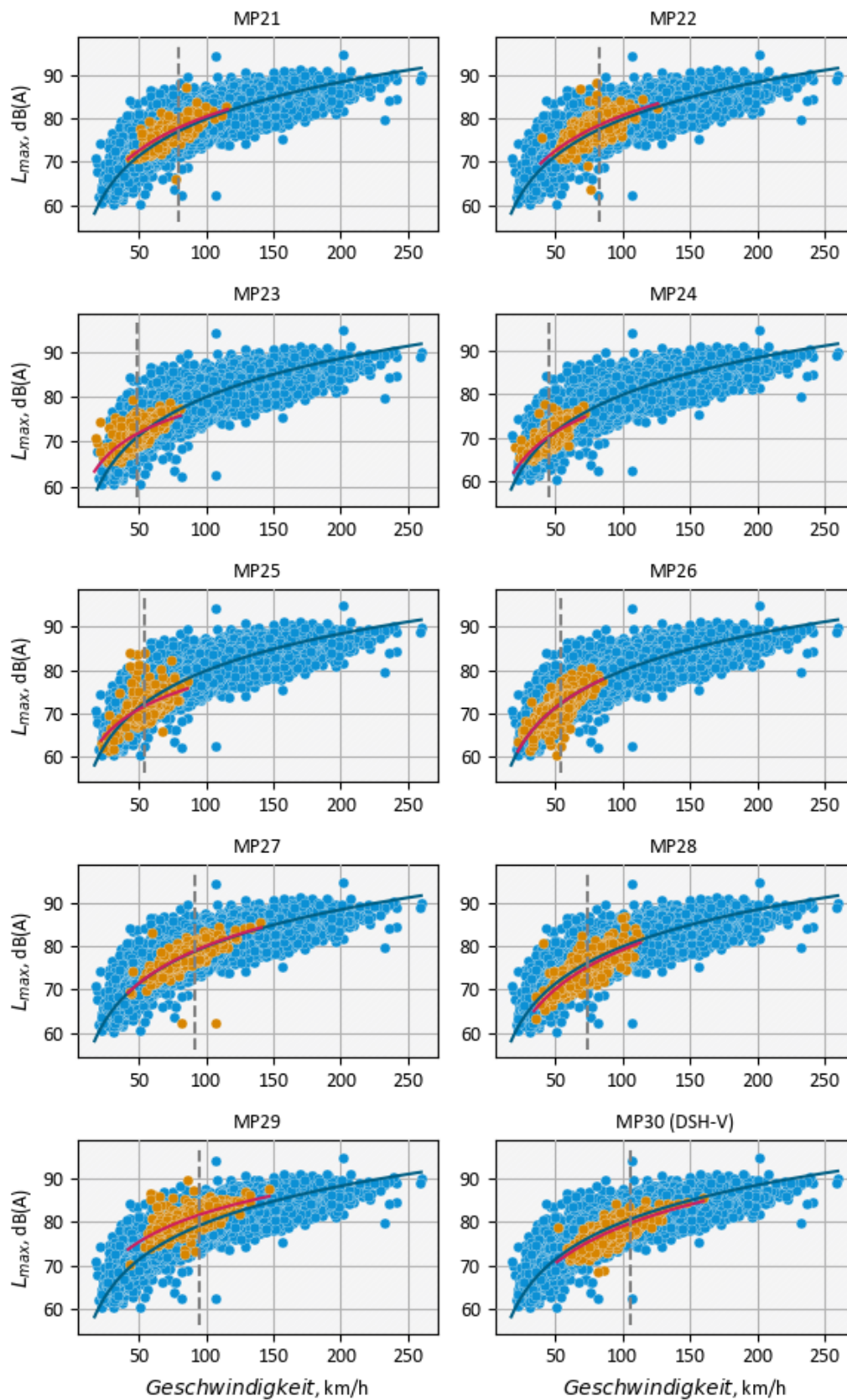
Abbildung 43: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für PKW, Messpunkte 11 bis 20



Datensätze der Messpunkte MP11 bis MP20 (orange/rot) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für PKW inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt).

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

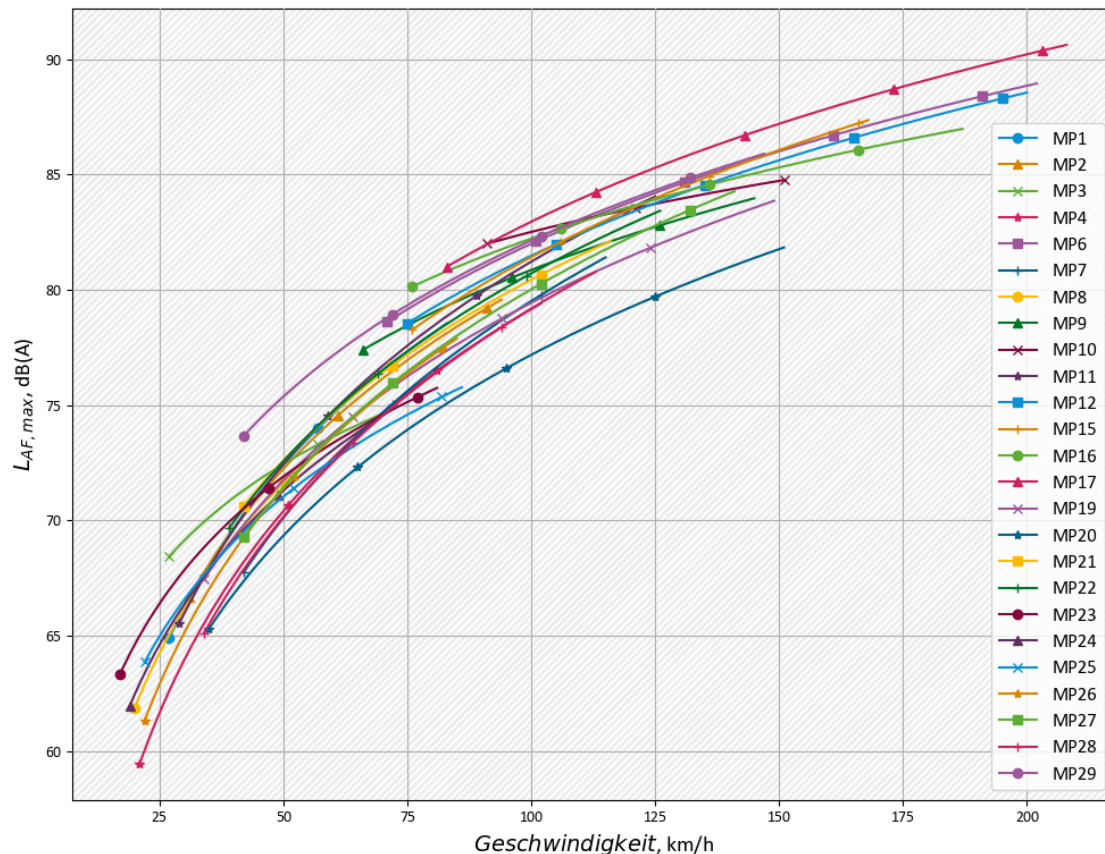
Abbildung 44: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für PKW, Messpunkte 21 bis 30



Datensätze der Messpunkte MP21 bis MP30 (orange/rot) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für PKW inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt).
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Die Einzelregressionen der unterschiedlichen Messpunkte werden in Abbildung 45 miteinander verglichen. Die DSH-V-Deckschichten (MP5 und MP30) sowie die Wintermesspunkte (MP13 und MP14) und der LKW-Messpunkt (MP18) sind hier nicht mit dargestellt. Auch hier ist erkennbar, dass beispielsweise an MP20 sehr viel niedrigere Pegel gemessen wurden, während an MP17 deutlich höhere Pegel auftraten. Die Steigungen der einzelnen Regressionslinien sind mit wenigen Ausnahmen (z. B. MP25 – Motorradmesspunkt) sehr ähnlich.

Abbildung 45: Vergleich Regressionsgeraden (PKW)

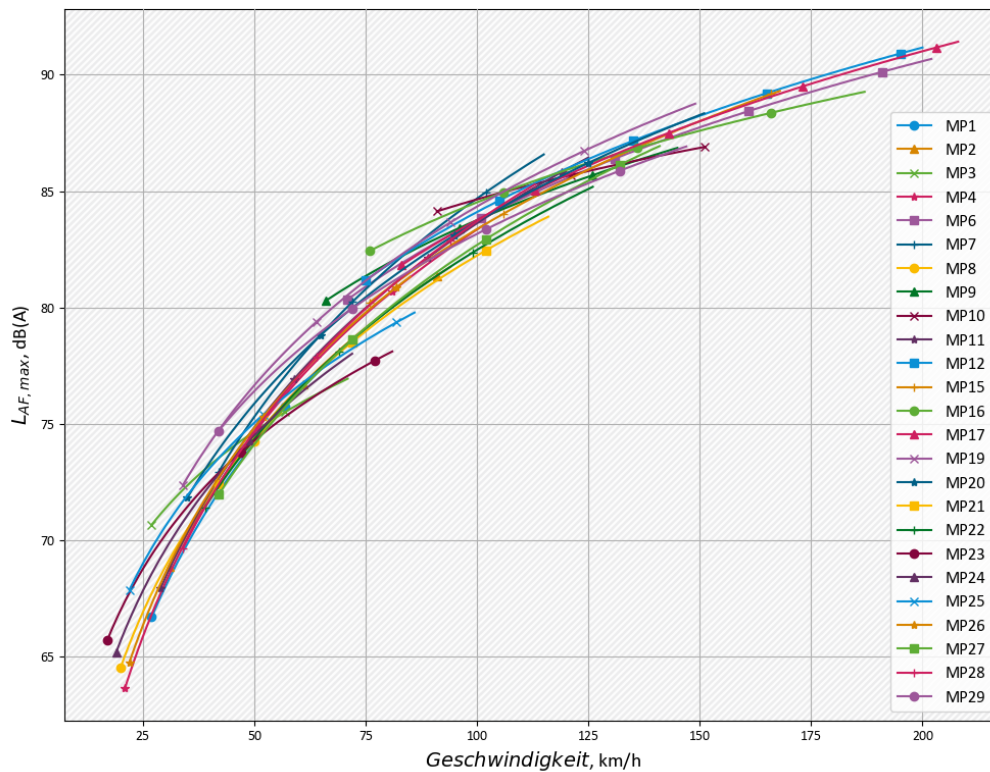


Vergleich der Einzelregressionslinien der verschiedenen Messpunkte für PKW. Sondersituationen wie DSH-V-, Winter- und LKW-Messpunkte wurden hier ausgelassen (MP5, MP13, MP14, MP18 und MP30). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Um die Fahrzeuggeräusche unabhängig von den Einflüssen der Messpunktumgebung betrachten zu können, können die oben dargestellten Regressionslinien um die mittels der TP KoSD-19 ermittelten Korrekturwerte (siehe Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14) verschoben werden. Somit ergibt sich das in der Abbildung 46 gezeigte Bild. Die Pegelunterschiede zwischen den Regressionen der Messpunkte verringern sich deutlich – die verbleibenden Unterschiede könnten möglicherweise auf das unterschiedliche Fahrzeugkollektiv und/oder Fahrprofil je Messpunkt zurückgeführt werden oder auf die gegebene statistische Unsicherheit zwischen den Datensätzen der verschiedenen Messpunkte.

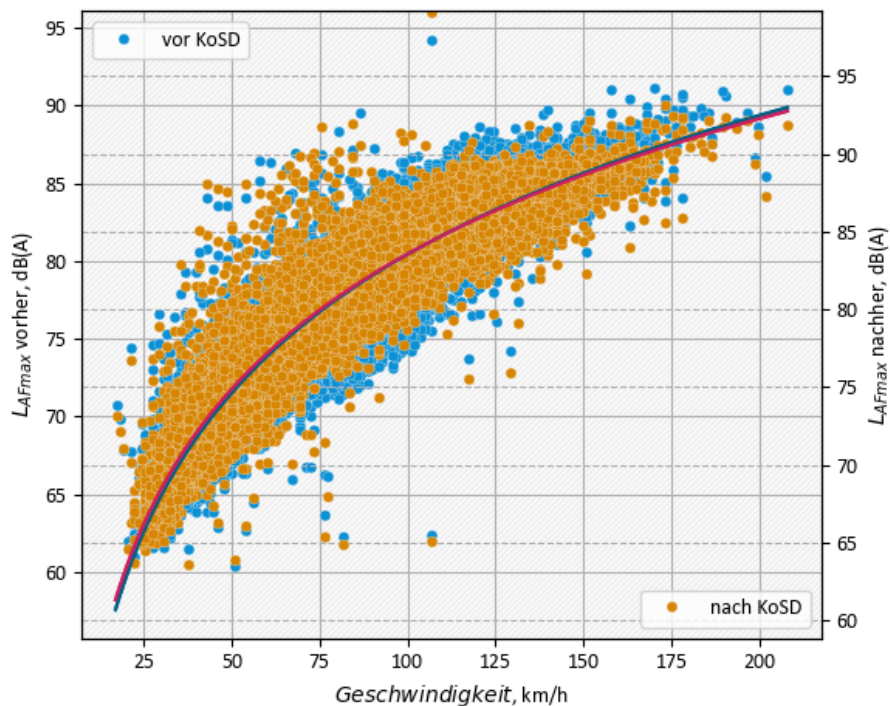
Um den Einfluss der KoSD-Korrektur auf die Gesamtregression zu beurteilen, wurde ein Vergleich des Gesamtdatensatzes für PKW vor und nach der KoSD-Korrektur in Abbildung 47 erstellt. Es ist erkennbar, dass sich die Datenwolke nach der Korrektur sichtbar zur Regressionslinie hin verschmälert, wobei sich die Form bzw. Steigung der Regressionskurve selbst nicht merklich verändert.

Abbildung 46: Vergleich Regressionsgeraden KoSD-korrigiert (PKW)



Vergleich der Einzelregressionslinien der verschiedenen Messpunkte für PKW nach Anwendung der Korrektur mit den Pegeldifferenzen aus der KoSD-Auswertung. Sondersituationen wie DSH-V-, Winter- und LKW-Messpunkte wurden hier ausgelassen (MP5, MP13, MP14, MP18 und MP30). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

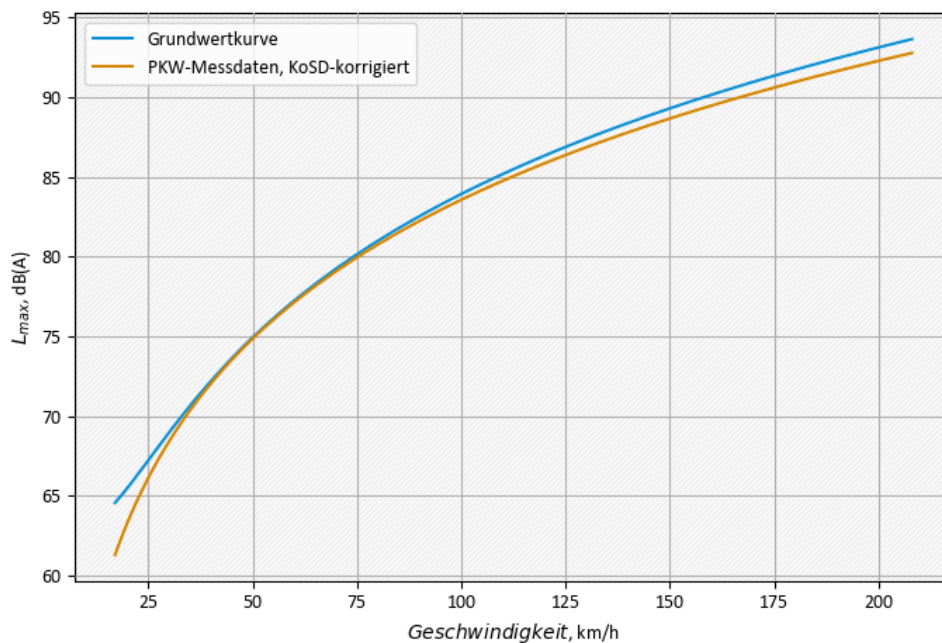
Abbildung 47: Datensatzvergleich vor und nach KoSD-Korrektur



Vergleich des Gesamtdatensatzes für PKW vor und nach der Korrektur mit den Pegeldifferenzen aus der KoSD-Auswertung. Die Datensätze sind zueinander verschoben. Für einen einfacheren Vergleich wurden sie aufeinandergelegt und es wurde eine zweite y-Achse (rechts) eingefügt. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

In Abbildung 48 ist die PKW-Gesamtregression nach der KoSD-Korrektur mit der Grundwertkurve der RLS-19 für PKW verglichen. Die beiden Kurven stimmen gut überein. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass bei der Bildung der ΔL -Werte gemäß TP KoSD-19, die zur Korrektur angewendet werden, die Grundwertkurve bereits rechnerisch eingeht und die gute Vergleichbarkeit der beiden Kurven demnach zu erwarten ist. Dennoch sind gerade in den Randbereichen Unterschiede festzustellen, die auf die unterschiedlichen Auswertekonzepte zurückgeführt werden können.

Abbildung 48: Vergleich mit der Grundwertkurve



Vergleich des Gesamtdatensatzes für PKW nach der KoSD-Korrektur mit der Grundwertkurve der RLS-19. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den Vorgängerkampagnen zu erhalten, werden in den weiteren Auswertungen die Vorbeifahrtpegel ohne KoSD-Korrektur verwendet.

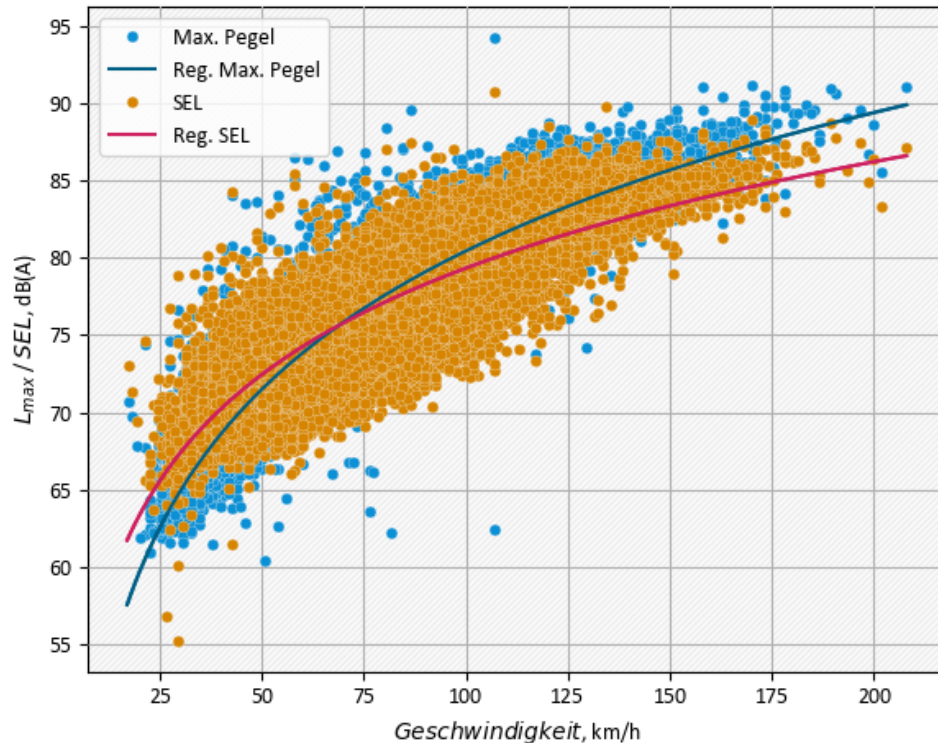
4.3.3 Sound Exposure Level von PKW

Neben dem maximalen Vorbeifahrtpegel kann auch der sogenannte Sound Exposure Level, oder SEL, zur Beurteilung der Fahrzeuggeräusche herangezogen werden. Der SEL ist definiert als der *konstante* Schalldruckpegel, der dieselbe Energie in einer Sekunde aufweist wie das ursprüngliche Geräuschereignis (welches bei der Vorbeifahrt im Pegel steigt und wieder fällt und somit nicht konstant ist). Der SEL ähnelt damit dem energieäquivalenten Schalldruckpegel L_{EQ} , da hier ebenfalls die Schallenergie über die Zeit integriert wird. Der Unterschied ist, dass nicht nur über die Messdauer gemittelt wird, sondern für den SEL 1 Sekunde als Referenzdauer herangezogen wird. Die Messdauer, über die integriert wird, um den SEL zu erhalten, wurde für jede Vorbeifahrt auf die T_6 -Zeit definiert und ist somit nicht konstant. Kürzere Schallereignisse (schnelle Vorbeifahrten, kurze T_6 -Zeit) resultieren daher in einem relativ zum Maximalpegel gesehen kleineren SEL (weniger „exposure“) während längere Schallereignisse (langsame Vorbeifahrten, lange T_6 -Zeit) einen größeren SEL-Wert, relativ zum Maximalpegel, bedeuten. Dieses Verhalten kann in Abbildung 49 wiedererkannt werden. Die Punktwolke der SEL-Werte und die resultierende Regressionslinie ist im Vergleich zum Datensatz der maximalen Schalldruckpegel gekippt, wobei bei niedrigen Geschwindigkeiten (mit längeren T_6 -Zeiten)

höhere SEL-Werte auftreten und bei hohen Geschwindigkeiten niedrigere SEL-Werte. Dies hat eine geringere Geschwindigkeitsabhängigkeit des SEL im Vergleich zum Maximalpegel zur Folge – vor allem im niedrigen Geschwindigkeitsbereich.

Ein Vorteil der Betrachtung des SEL ist, dass Ausreißer weniger stark ausgeprägt sind, da deren Maximalpegel oft auf sehr kurzen Ereignissen beruhen.

Abbildung 49: Vergleich Maximalpegel und SEL für PKW

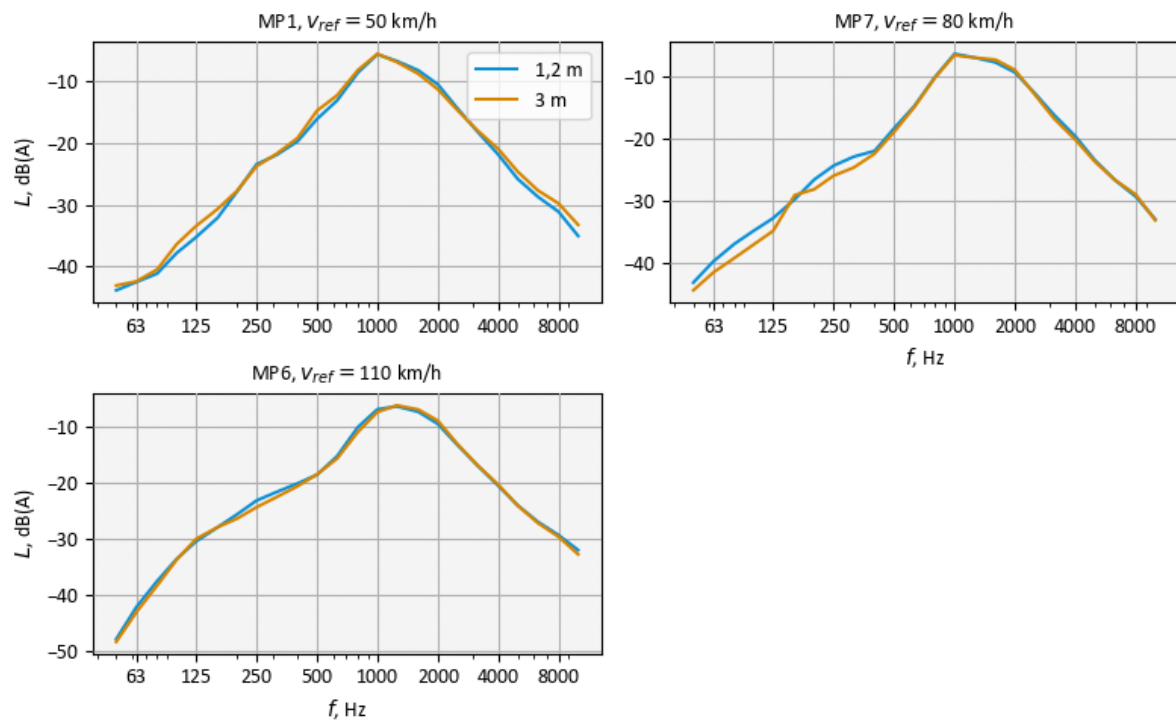


Vergleich der gemessenen maximalen Schalldruckpegel zu den ermittelten SEL für PKW. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.4 Spektren von PKW

Zusätzlich zu den maximalen Vorbeifahrtpegeln werden im Folgenden die zugehörigen mittleren Terzspektren betrachtet. Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, werden für einzelne Messpunkte nicht die Spektren von Kanal 2 (3 m), sondern von Kanal 1 (1,2 m) herangezogen. Um die Vergleichbarkeit der Spektren unterschiedlicher Messhöhen zu zeigen, sind in Abbildung 50 die Spektren beider Kanäle (normalisiert auf 0 dB bei 1000 Hz) für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen exemplarisch für einzelne Messpunkte dargestellt. Im Folgenden werden zudem alle Spektren auf den (höhen-) korrigierten mittleren Maximalpegel der Messposition auf 3 m referenziert. Hierfür werden die Terzspektren aller Vorbeifahrten einer Fahrzeugkategorie eines Messpunktes arithmetisch gemittelt. Über die Terzfrequenzen des mittleren Spektrums wird energetisch gemittelt, um die spektrale Schallenergie zu erhalten. Das mittlere Spektrum wird dann in der Höhe so verschoben, dass die Schallenergie mit dem (höhen-) korrigierten mittleren Maximalpegel bei der Referenzgeschwindigkeit der Messposition auf 3 m übereinstimmt. Demnach ist ein Vergleich von Spektren unterschiedlicher Messhöhen (Kanäle) angemessen.

Abbildung 50: Spektraler Vergleich verschiedener Messhöhen

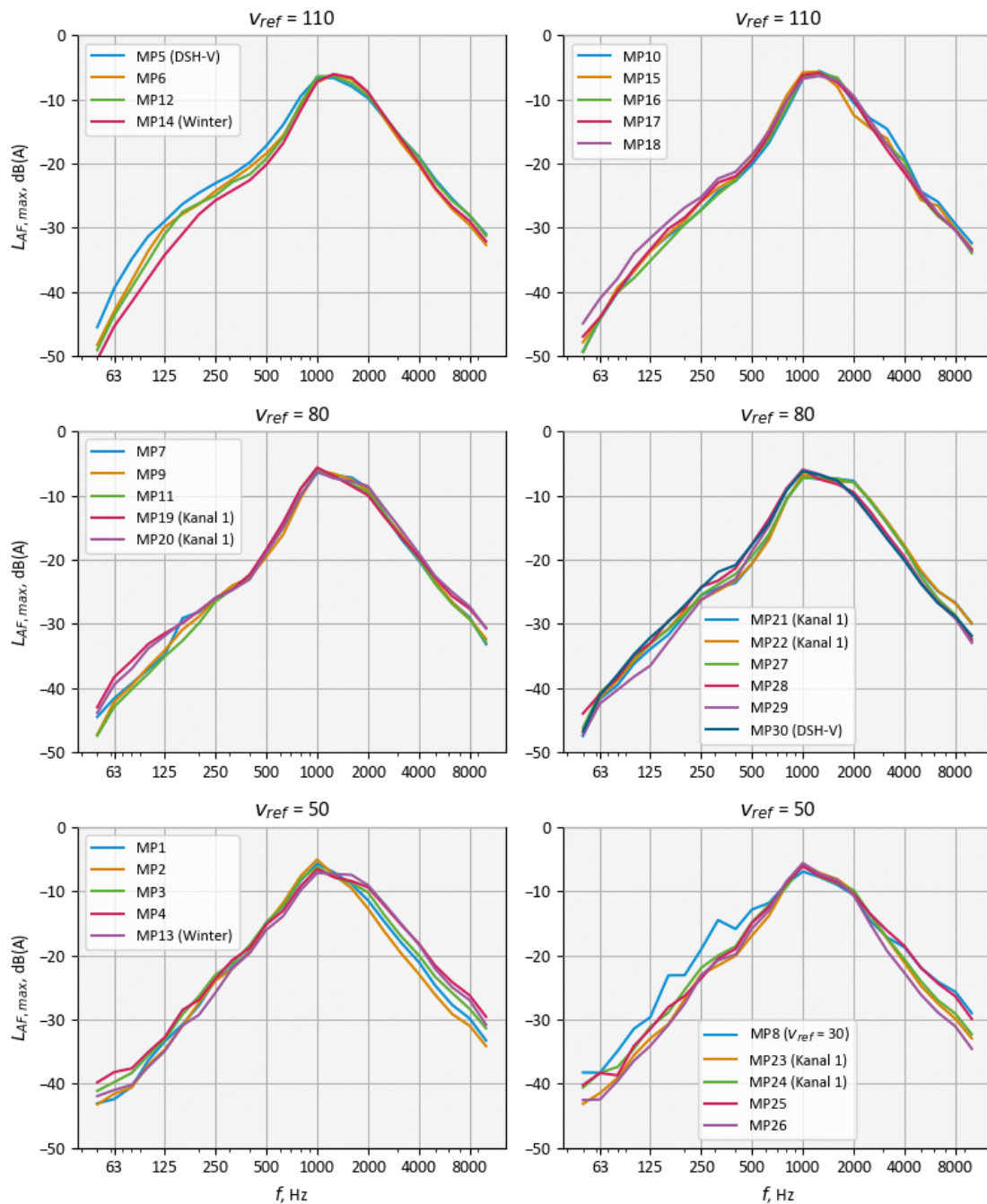


Vergleich der mittleren Terzspektren unterschiedlicher Messhöhen, auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für PKW in verschiedenen Geschwindigkeitskategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

In der folgenden Abbildung 51 sind die Spektren nach Geschwindigkeitskategorien gruppiert. Der Übersicht halber wurden pro Geschwindigkeitskategorie zwei Diagramme angefertigt. Die Spektren wurden so gruppiert, dass sie „thematisch“ zusammenpassen. So waren beispielsweise MP10, MP15 und MP16 drei Messpunkte auf der A72 und MP17 und MP18 zwei Punkte auf der A62. MP4 und MP13 sowie MP12 und MP14 waren jeweils Messpunktpaare, an denen im Sommer (MP4 und MP12) und im Winter (MP13 und MP14) gemessen wurde. In der Betrachtung der Terzspektren zeigen sich die folgenden Erkenntnisse:

- ▶ Es ergeben sich tendenziell niedrigere spektrale Pegel beim Messpunkt MP5 (DSH-V) in den höheren Frequenzen und beim Messpunkt MP20 (auffällig leiser Asphaltbeton) in den tieferen Frequenzen.
- ▶ Bei den Wintermesspunkten MP13 und MP14 ist die spektrale Energie im niederfrequenten Bereich geringer als bei denselben Messpunkten im Sommer (MP4 und MP12).
- ▶ Es ergibt sich eine Tendenz zu einer leichten Erhöhung der Spektren bei Frequenzen bis 315 Hz für Referenzgeschwindigkeiten von 30 km/h und 50 km/h.

Abbildung 51: Mittlere Spektren der Maximalpegel (korrigiert), PKW



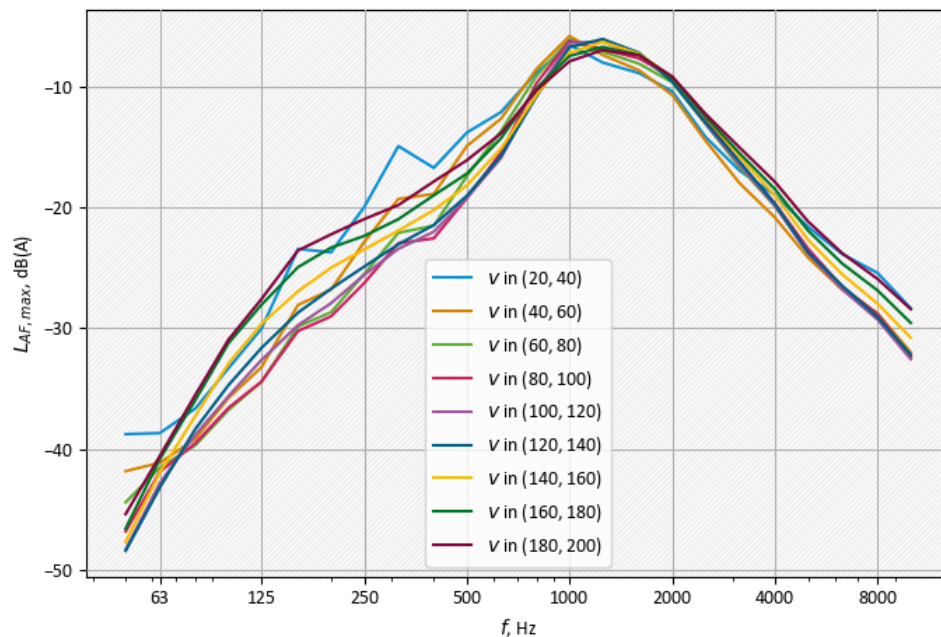
Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), nach Temperatur und Messhöhe korrigiert und auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für PKW aller Messpunkte. Die Spektren sind in Geschwindigkeitskategorien sortiert, um eine höhere Vergleichbarkeit zu erlangen. Für eine bessere Übersicht wurde eine Darstellung von zwei Diagrammen je Geschwindigkeitskategorie gewählt.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Um den Einfluss der Geschwindigkeit auf die spektrale Form deutlicher hervorzuheben, wurden in der folgenden Abbildung 52 Spektren des Gesamtdatensatzes für PKW in kleineren Geschwindigkeitskategorien (in 20-km/h-Abschnitten) dargestellt. Folgendes ist zu erkennen:

- Die Spektren für niedrige Geschwindigkeiten (20 km/h bis zu 40 km/h) weisen deutliche Erhöhungen bei den Terzfrequenzen 160 Hz und 315 Hz auf.
- Für die Geschwindigkeitsklasse von 20 km/h bis 40 km/h ergeben sich sehr hohe Pegel im niedrigen Frequenzbereich, die auf die Motorengeräusche zurückgeführt werden können. Von 40 km/h bis 80 km/h nehmen die tieffrequenten Geräusche dann ab, bevor sie mit noch höheren Geschwindigkeiten (über 160 km/h) wieder zunehmen. Dies könnte auf aerodynamische Effekte der Karosserie zurückgeführt werden.
- Im höherfrequenten Bereich ab 1000 Hz zeigt sich eine deutliche Geschwindigkeitsabhängigkeit, wobei die spektrale Energie umso höher ausfällt, je höher die Geschwindigkeit ist. Die Geschwindigkeitsklasse von 20 km/h bis 40 km/h, bei der das Reifen-Fahrbahn-Geräusch noch nicht dominant ist, folgt diesem Trend noch nicht.

Abbildung 52: Spektren in Geschwindigkeitskategorien (PKW)



Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für PKW in unterschiedlichen Geschwindigkeitskategorien.

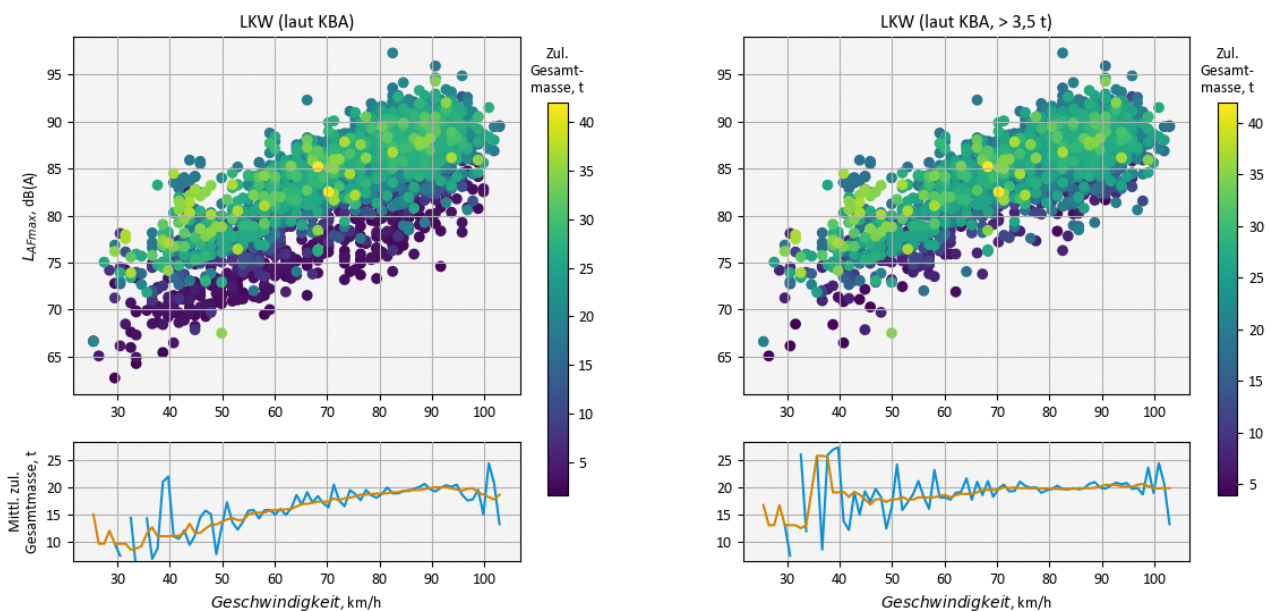
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.5 Kategorisierung von LKW

Die Geräuschemission von LKW ist stark abhängig von der Kategorisierung der Fahrzeuge. Nach DIN EN ISO 11819-1:2002-05 werden zweiachsige und vierachsige LKW unterschieden. Nach RLS-19 haben LKW eine zulässige Gesamtmasse über 3,5 t und werden in zwei „Größen“ kategorisiert, abhängig davon, ob es einen Anhänger gibt oder nicht. Da die Kennzeichen von LKW meist von vorne detektiert wurden, ist nur die Anzahl der Achsen der Zugmaschine bekannt, welche in den meisten Fällen „2“ beträgt. Im Folgenden wird die Kategorie der zweiachsigen und vierachsigen LKW daher über die zulässige Gesamtmasse abgeschätzt, wobei Fahrzeuge mit einer Masse > 12 t als vierachsige und Fahrzeuge < 12 t und > 3,5 t als zweiachsige eingestuft werden.

Laut Kategorisierung nach KBA wurden abzüglich der Messpunkte mit DSH-V und im Winter 3993 LKW detektiert. Diese unterscheiden sich jedoch stark in der zulässigen Gesamtmasse, wie in Abbildung 53 links zu sehen ist. Die Vorbeifahrtpegel für LKW sind in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dargestellt, wobei zusätzlich die zulässige Gesamtmasse für jeden Datenpunkt (jede Vorbeifahrt) als Farbcodierung dargestellt ist. Im unteren Teil der Grafik ist außerdem die mittlere zulässige Gesamtmasse (in blau, geglättet in orange) über der Geschwindigkeit aufgetragen. Hier (links unten) ist eine klare Abhängigkeit der zulässigen Masse von der Geschwindigkeit zu erkennen, wobei schwerere LKW vermehrt an Messpunkten mit höheren Geschwindigkeiten gemessen wurden und leichtere LKW vermehrt an Messpunkten mit niedrigeren Geschwindigkeiten. Allerdings ist zu beachten, dass in diesem Datensatz noch Kleintransporter (vermutlich betriebliche Fahrzeuge z. B. des Handwerks) mit einer zulässigen Gesamtmasse von weniger als 3,5 t enthalten sind. Laut RLS-19 sind die Kategorien *Lkw1* und *Lkw2* (entspricht ungefähr der Kategorisierung nach zweiachsigen und vierachsigen LKW) jedoch mit einer zulässigen Gesamtmasse > 3,5 t definiert. Die rechte Grafik in Abbildung 53 zeigt den Datensatz ohne die Fahrzeuge mit einer zulässigen Masse < 3,5 t. Werden diese Fahrzeuge aus dem Datensatz „LKW“ entfernt, so verringert sich ebenfalls die Abhängigkeit der zulässigen Masse von der Geschwindigkeit deutlich, wie im unteren Teil der rechten Grafik zu sehen ist.

Abbildung 53: LKW-Vorbeifahrtpegel über der Geschwindigkeit und zulässige Masse



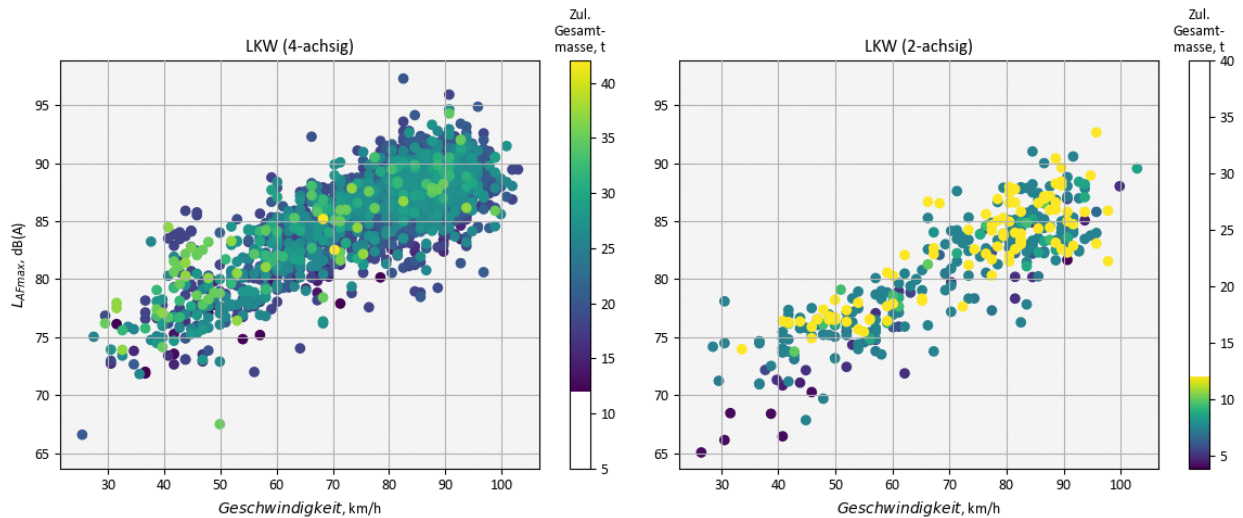
Veranschaulichung der Verteilung der gemessenen LKW über der Geschwindigkeit mit Einfluss der Masse auf den maximalen Schalldruckpegel. Oben: Datensatz für LKW, Fahrzeugmasse ist als Farbcodierung dargestellt, unten: mittlere Fahrzeugmasse über der Geschwindigkeit aufgetragen (blau) inkl. geglätteter Kurve (orange). Links: alle laut KBA als LKW kategorisierten Fahrzeuge, rechts: abzüglich der Fahrzeuge mit einer zulässigen Masse < 3,5 t.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Dieser Datensatz (Abbildung 53 rechts) vermischt jedoch immer noch zweiachsige und vierachsige LKW. Wie oben und in Kapitel 3.2 beschrieben werden diese zwei Kategorien über die zulässige Masse abgeschätzt. So werden im Folgenden Fahrzeuge der Kategorie LKW mit einer zulässigen Masse unter 12 t als zweiachsige und jene mit einer zulässigen Masse über 12 t als vierachsige LKW kategorisiert. Abbildung 54 stellt die beiden Datensätze nebeneinander dar erneut als Datenpunktwolke der maximalen Schalldruckpegel über der Geschwindigkeit und die

zulässige Gesamtmasse farbcodiert. Für die Kategorie der vierachsigen LKW verbleiben so 3295 Datenpunkte, für die Kategorie der zweiachsigen LKW nur 355. Im Folgenden wird daher verstärkt auf vierachsige LKW eingegangen.

Abbildung 54: LKW-Vorbeifahrtpegel über der Geschwindigkeit in zwei Kategorien



Veranschaulichung der Verteilung der gemessenen LKW über der Geschwindigkeit aufgeteilt in vierachsige (links) und zweiachsige (rechts) LKW. Fahrzeugmasse ist als Farbcodierung dargestellt. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.6 Geräuschemissionen von LKW

Ähnlich wie im vorherigen Kapitel werden nun die akustischen Messergebnisse für die Fahrzeugkategorie LKW (vierachsig) dargestellt.

Abbildung 55 bis Abbildung 57 zeigen die Datensätze der einzelnen Messpunkte im Vergleich zum Gesamtdatensatz für die Kategorie vierachsige LKW. Zusätzlich sind für die jeweiligen Teildatensätze die Regressionslinien und als gestrichelte Linie die mittlere Geschwindigkeit eingezeichnet. Die zulässige Gesamtmasse wurde abermals als Farbcodierung dargestellt, wobei alle Teildiagramme gleich skaliert sind. Folgendes kann festgehalten werden:

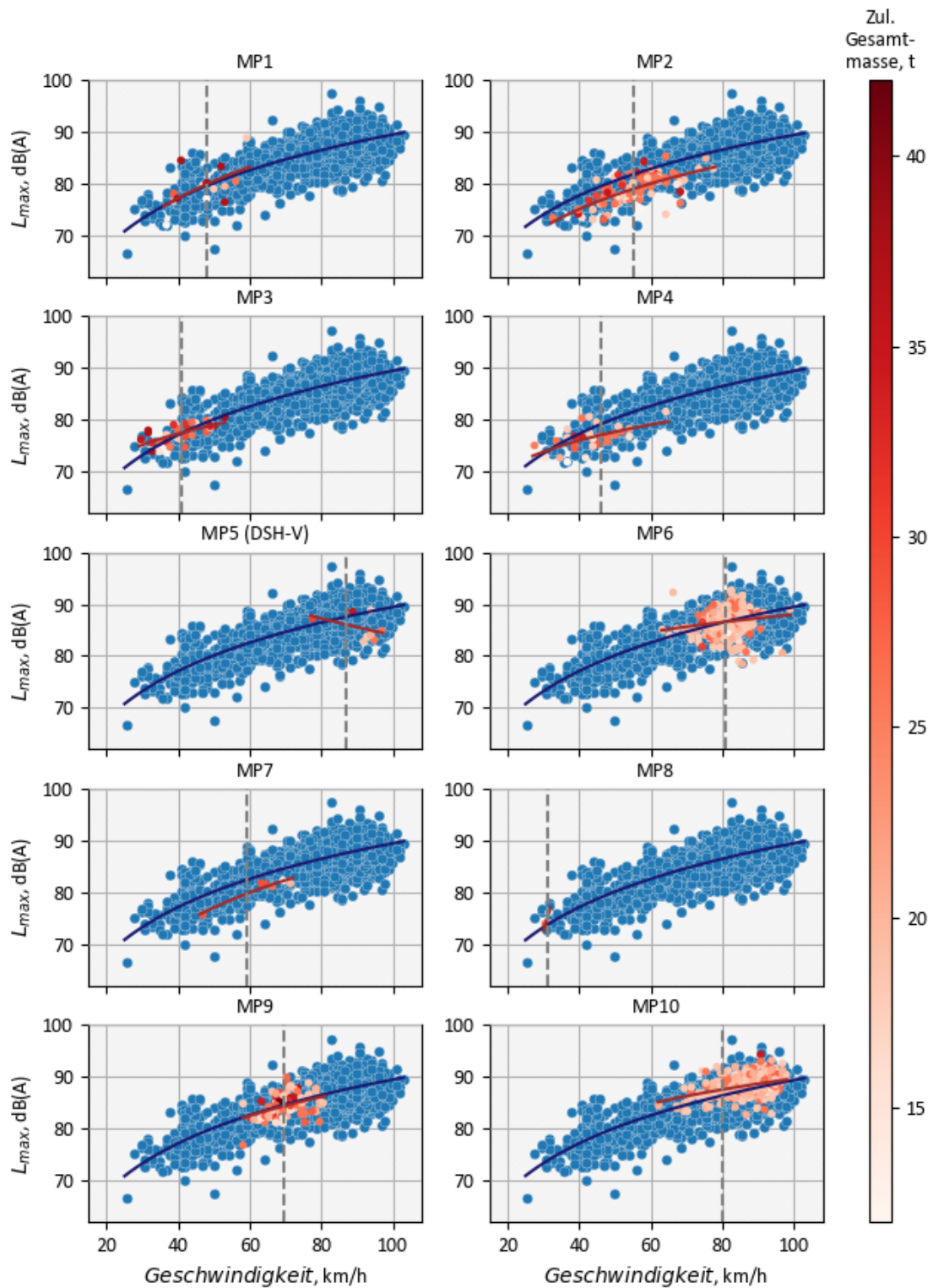
- Für etwa ein Drittel der Messpunkte (MP3, MP4, MP6, MP10, MP12, MP16, MP18, MP19, MP22 und MP30) verläuft die Regressionslinie flacher als die Regression des Gesamtdatensatzes für LKW. Vor allem Messpunkte mit einem schmalen Geschwindigkeitsband (z. B. MP6, MP12) zeigen Punktwolken, die generell „kreisförmiger“ sind als jene für PKW und weisen daher eine geringere Geschwindigkeitsabhängigkeit auf.
- Für etwa ein Drittel der Messpunkte (MP1, MP2, MP7, MP9, MP11, MP14, MP15, MP17, MP23, MP27 und MP29) verläuft die Regressionslinie mit ähnlicher Steigung – jedoch teilweise im Pegel stark versetzt zur Regression des Gesamtdatensatzes für LKW. Lediglich die Regressionen der Messpunkte MP1, MP9, MP15 und MP27 stimmen sehr gut mit der Regression des Gesamtdatensatzes für LKW überein.
- An etwa einem Drittel der Messpunkte (MP5, MP8, MP13, MP20, MP22, MP24-MP26 und MP28) ist die Anzahl der gemessenen LKW zu gering, um eine statistisch signifikante Aussage über den Geräuschtrend machen zu können.

- An MP22 tauchen vermehrt schwere, laute, Fahrzeuge im Bereich um 40 km/h auf. Diese sind mutmaßlich eine Anhäufung von LKW mit besonders hoher zulässiger Gesamtmasse des nahegelegenen Kieswerks.

Allgemein lässt sich die Aussage formulieren, dass die Regressionslinie des Gesamtdatensatzes für LKW die Realität an einzelnen Stellen nicht zuverlässig abbildet. Die Gesamtregressionslinie ist im Vergleich zu einzelnen Messpunkten tendenziell zu steil. Außerdem weisen einzelne Messpunkte einen deutlichen Unterschied im mittleren gemessenen Schalldruckpegel auf. Die Einzelregressionen sind demnach stark Messpunkt-abhängig. In der folgenden Analyse ist daher für LKW zu beachten, dass die verallgemeinernde Gesamtregression nicht zwingend die Situation an einzelnen Messpunkten beschreiben kann.

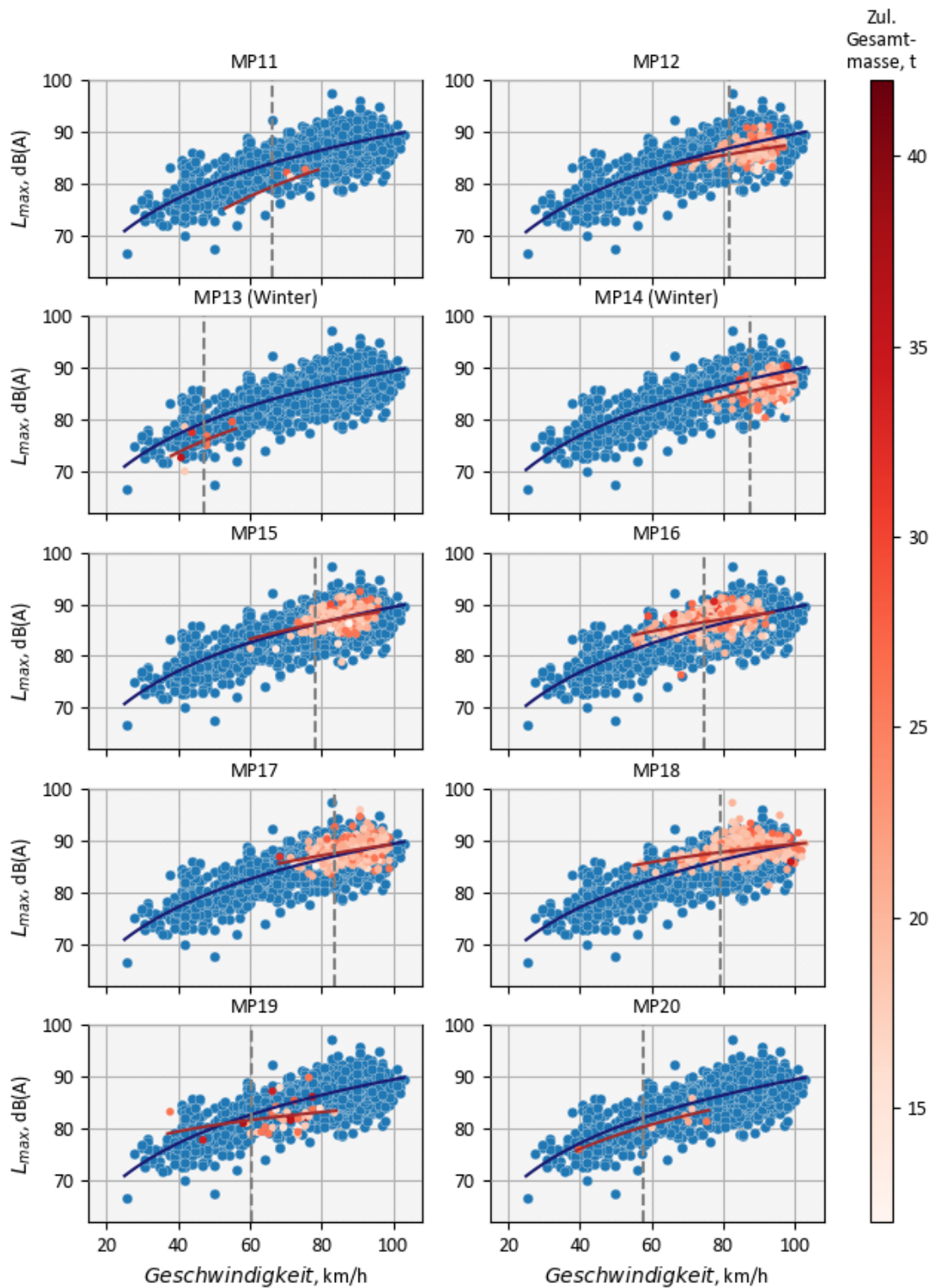
Aufgrund der geringeren Geschwindigkeitsabhängigkeit und der unzulänglichen Datenmenge einzelner Messpunkte wurde auf den Vergleich der Einzelregressionen in einer Grafik (analog zu Abbildung 45) verzichtet.

Abbildung 55: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für LKW, Messpunkte 1 bis 10



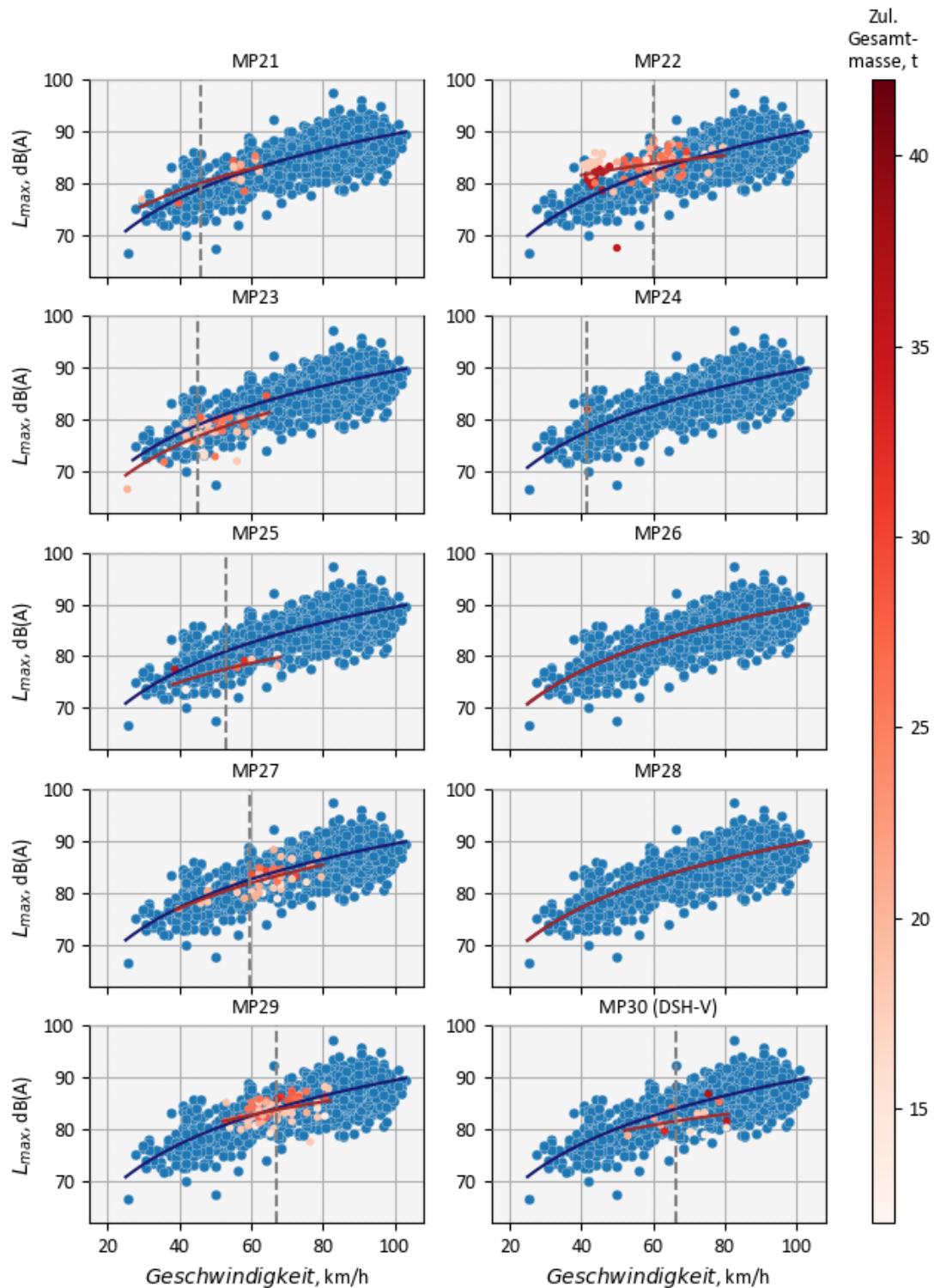
Datensätze der Messpunkte MP1 bis MP10 (roter Farbverlauf) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für LKW inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt). Die Masse der Fahrzeuge ist farbcodiert. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 56: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für LKW, Messpunkte 11 bis 20



Datensätze der Messpunkte MP11 bis MP20 (roter Farbverlauf) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für LKW inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt). Die Masse der Fahrzeuge ist farbcodiert. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 57: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für LKW, Messpunkte 21 bis 30

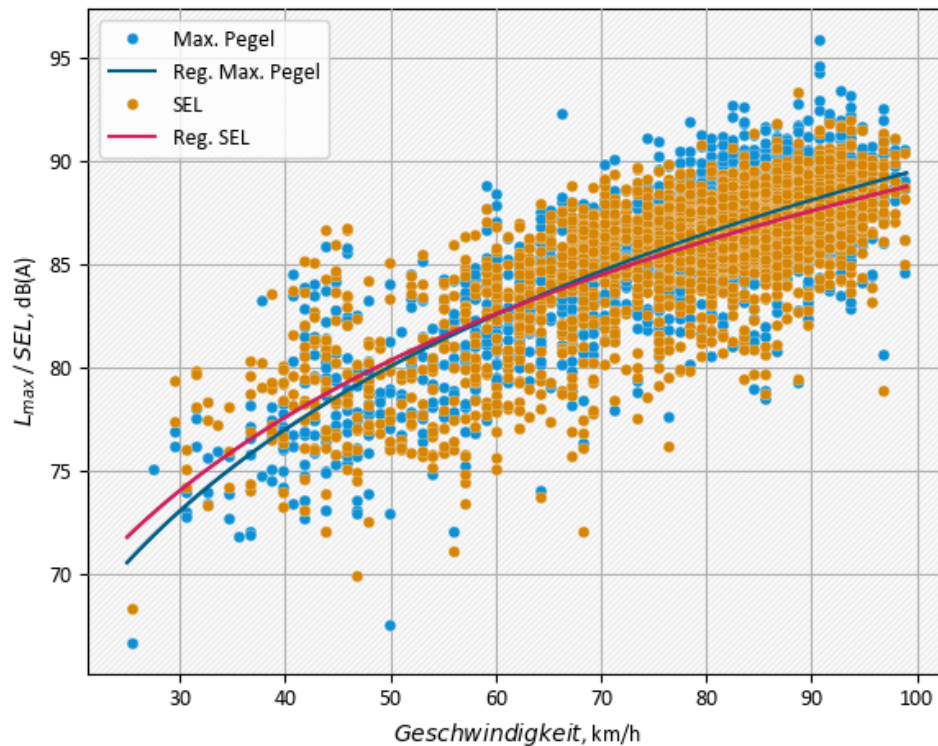


Datensätze der Messpunkte MP21 bis MP30 (roter Farbverlauf) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für LKW inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt). Die Masse der Fahrzeuge ist farbcodiert. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.7 Sound Exposure Level von LKW

In Abbildung 58 ist der Vergleich zwischen Maximalpegel und SEL für LKW aufgetragen. Im Vergleich zu Abbildung 49 (Vergleich für PKW) ist eine deutlich geringere Verkipfung des Datensatzes zu erkennen. In der Tat sind die Regressionslinien beinahe deckungsgleich. Allerdings ist auch hier zu beachten, dass – wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben – die Regressionslinie des Gesamtdatensatzes für LKW eine spezifische Situation unter Umständen schlecht abbildet (v. a. bezogen auf einzelne Messpunkte). Eine zuverlässige Interpretation dieses Ergebnisses ist daher schwierig.

Abbildung 58: Vergleich Maximalpegel und SEL für LKW

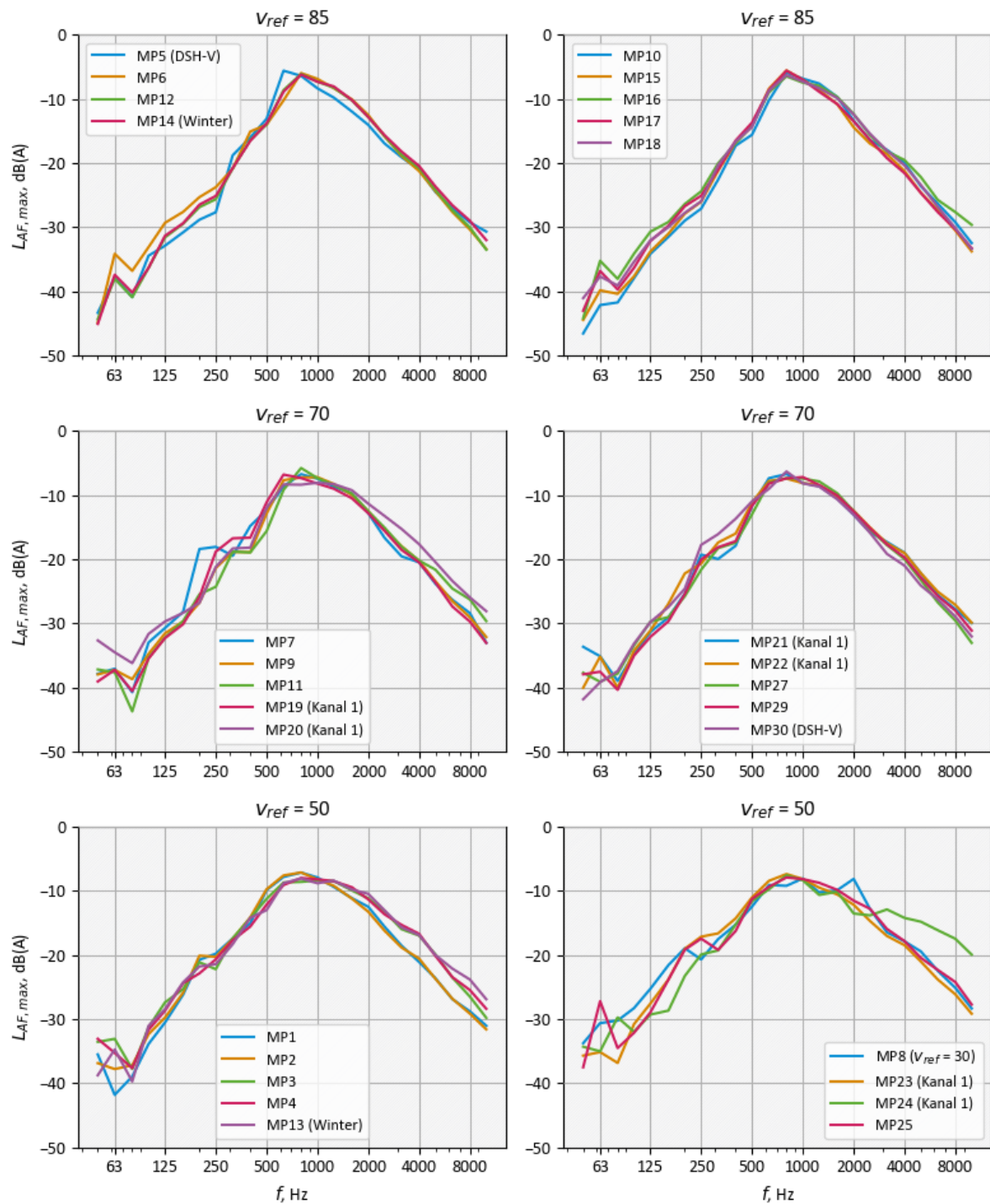


Vergleich der gemessenen maximalen Schalldruckpegel zu den ermittelten SEL für LKW. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.8 Spektren von LKW

Im Folgenden ist ein spektraler Vergleich der einzelnen Messpunkte aufgetragen, wobei abermals nach Geschwindigkeitskategorien gruppiert wurde. Im Allgemeinen streuen die Spektren (trotz Gruppierung) im Pegel deutlich stärker als bei PKW, was auf die geringere Datenmenge zurückgeführt werden kann. Lediglich bei der hohen Geschwindigkeitskategorie (in der mehr Datenpunkte aufgenommen wurden) liegen die Spektren gut aufeinander (mit Ausnahme des MP5, bei dem die Datenmenge für LKW sehr gering ist). Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich (50 km/h) sind deutlich die Motor-dominanten Anteile bei den Frequenzen 160 Hz und 315 Hz auszumachen. Im Gegensatz zu den Spektren bei PKW sind diese hier ebenfalls im mittleren Geschwindigkeitsbereich (70 km/h) zu erkennen. Es ist zu beachten, dass die Spektren der Messpunkte MP5, MP8, MP13, MP20, MP22, MP24, und MP25 aufgrund der geringen Datenmenge an diesen Messorten starken Schwankungen ausgesetzt sind. An MP26 und MP28 wurde kein einziger vierachsiger LKW gemessen, weshalb es hierzu kein Spektrum gibt.

Abbildung 59: Mittlere Spektren der Maximalpegel (korrigiert), LKW

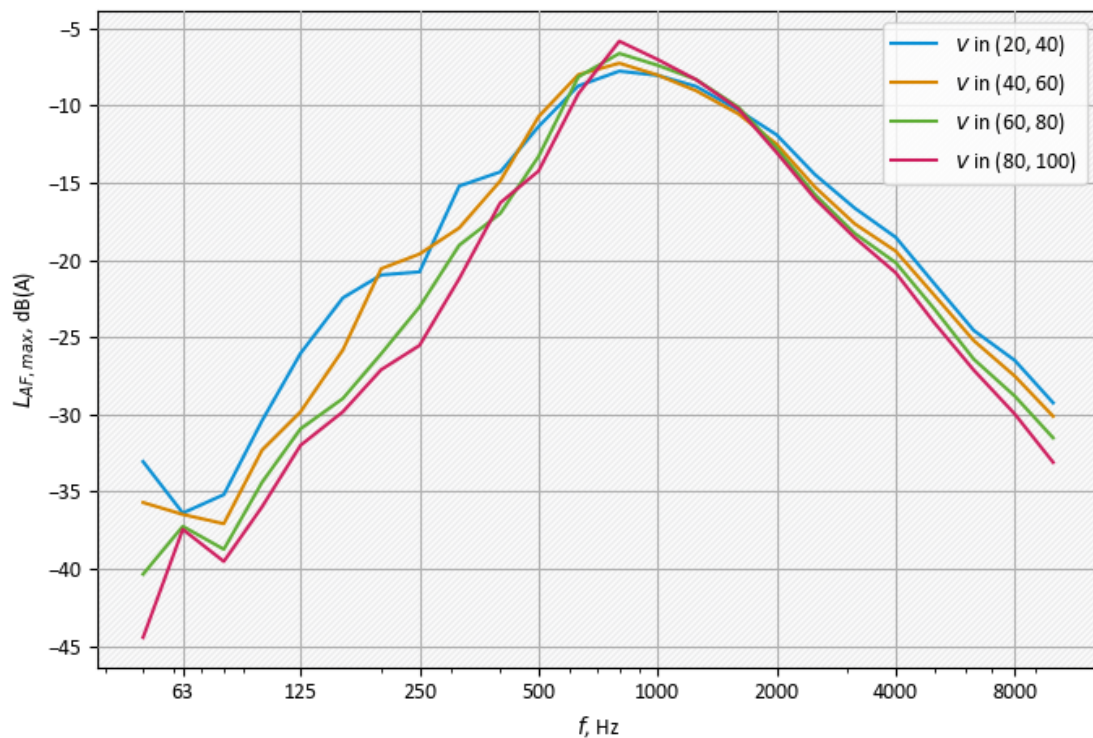


Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), nach Temperatur und Messhöhe korrigiert und auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für LKW aller Messpunkte. Die Spektren sind in Geschwindigkeitskategorien sortiert, um eine höhere Vergleichbarkeit zu erlangen. Für eine bessere Übersicht wurde eine Darstellung von zwei Diagrammen je Geschwindigkeitskategorie gewählt. MP26 und MP28 fehlen, da hier keine LKW gemessen wurden. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Um den Einfluss der Geschwindigkeit auf die spektrale Form deutlicher hervorzuheben, wurden in der folgenden Abbildung 60 Spektren des Gesamtdatensatzes für LKW in kleineren Geschwindigkeitskategorien (in 20-km/h-Abschnitten) dargestellt. Folgendes ist zu erkennen:

- ▶ Die Spektren für niedrige bis mittlere Geschwindigkeiten (20 km/h bis zu 60 km/h) weisen einen erhöhten Energieanteil bei Frequenzen unterhalb 500 Hz auf, die auf die Motorengeräusche zurückgeführt werden können.
- ▶ Bei Frequenzen zwischen 500 Hz und 2.000 Hz sind die Pegel bei tendenziell höheren Geschwindigkeiten (60 km/h bis 100 km/h) dominanter.
- ▶ Bei höheren Frequenzen ab 2000 Hz dominieren wiederum die Pegel bei niedrigeren Geschwindigkeiten. Hier zeigt sich eine deutliche Geschwindigkeitsabhängigkeit, wobei die spektrale Energie umso höher ausfällt, je niedriger die Geschwindigkeit ist. Diese Relation zeigte sich bei den PKW genau umgekehrt.

Abbildung 60: Spektren in Geschwindigkeitskategorien (LKW)



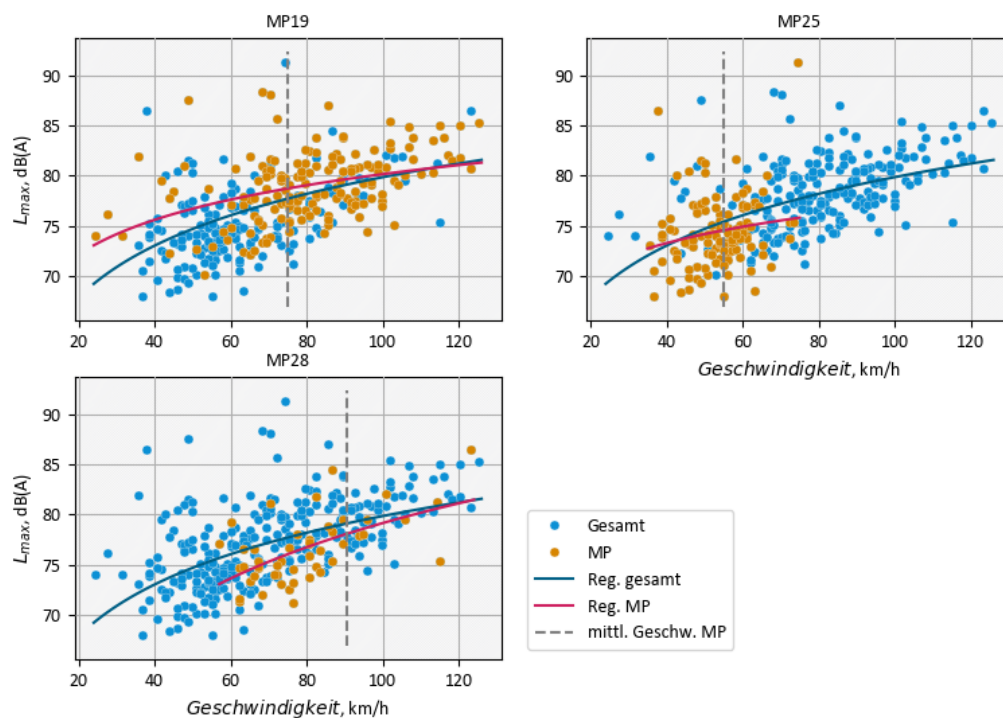
Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für LKW in unterschiedlichen Geschwindigkeitskategorien.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.9 Geräuschemissionen von Krafträdern

Analog zu den Darstellungen für PKW und LKW werden im Folgenden die Geräuschemissionen von Motorrädern betrachtet. Da Krafträder verstärkt nur an drei der 30 Messpunkte gemessen wurden, sind hier nur die Messpunkte MP19, MP25 und MP28 dargestellt. Abbildung 61 zeigt den Vergleich der Regressionen der einzelnen Messpunkte im Vergleich zum Gesamtdatensatz für Krafträder sowie jeweils die mittleren Geschwindigkeiten als gestrichelte Linie. MP19 und MP28 waren Messpunkte mit höheren mittleren Geschwindigkeiten, während MP25 eine niedrigere Geschwindigkeitskategorie hatte. Die Regressionen der einzelnen Messpunkte weisen leicht unterschiedliche Steigungen im Vergleich zur Gesamtregression auf, wobei MP19 und MP25 etwas flacher verlaufen und MP28 etwas steiler als die Regression des Gesamtdatensatzes. Unter Berücksichtigung der größeren Streuung einzelner Datenpunkte liegen die Einzelregressionen jedoch noch gut auf der Gesamtregressionskurve, welche die tatsächliche Situation daher gut abbildet.

Abbildung 61: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für Krafträder



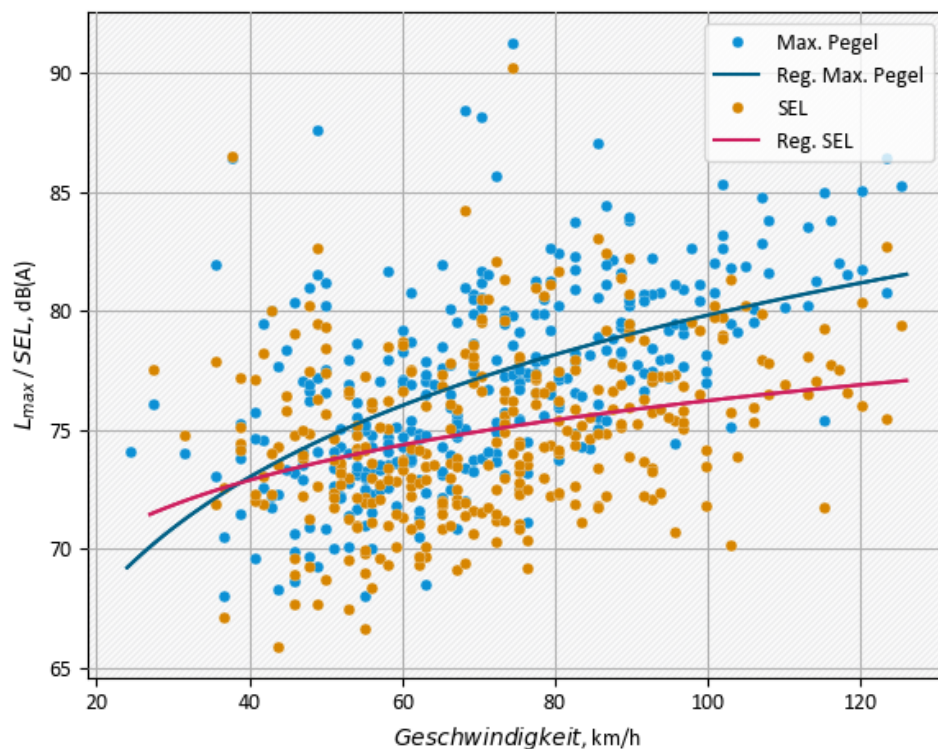
Datensätze der Messpunkte MP19, MP25 und MP28 (orange/rot) im Vergleich zum Gesamtdatensatz (blau/dunkelblau) für Krafträder inklusive Regressionslinien und mittlerer Geschwindigkeit (gestrichelt).

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.10 Sound Exposure Level von Krafträdern

In Abbildung 62 ist der Vergleich zwischen Maximalpegel und SEL für Krafträder dargestellt. Hier erkennt man im Vergleich zu Abbildung 49 (Vergleich für PKW) eine noch deutlichere Verkipfung des Datensatzes, wobei der Schnittpunkt der beiden Regressionslinien bei einer sehr niedrigen Geschwindigkeit < 40 km/h liegt. Dies ist damit erklärbar, dass Vorbeifahrten von Motorrädern typischerweise kürzere Pegel-Zeit-Verläufe generieren und eher den Charakter einer Punktschallquelle aufweisen. Vor allem bei höheren Geschwindigkeiten dominieren bei PKW die Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Diese werden an beiden Radachsen emittiert, die Gesamtschallquelle ist somit wesentlich länger als bei Motorrädern, was in einer längeren T_6 -Zeit und somit in einem größeren SEL resultiert. Hinzu kommt, dass die bei PKW dominante Schallquelle ab ca. 30 km/h die Reifen-Fahrbahn-Geräusche sind, die aufgrund des Horneffekts eine ausgeprägte Richtcharakteristik nach vorne und hinten aufweisen. All dies ist bei Motorrädern so nicht zu finden. Dementsprechend ist die T_6 -Zeit und damit der errechnete SEL bei Motorrädern vergleichsweise kleiner.

Abbildung 62: Vergleich Maximalpegel und SEL für Kraftrad

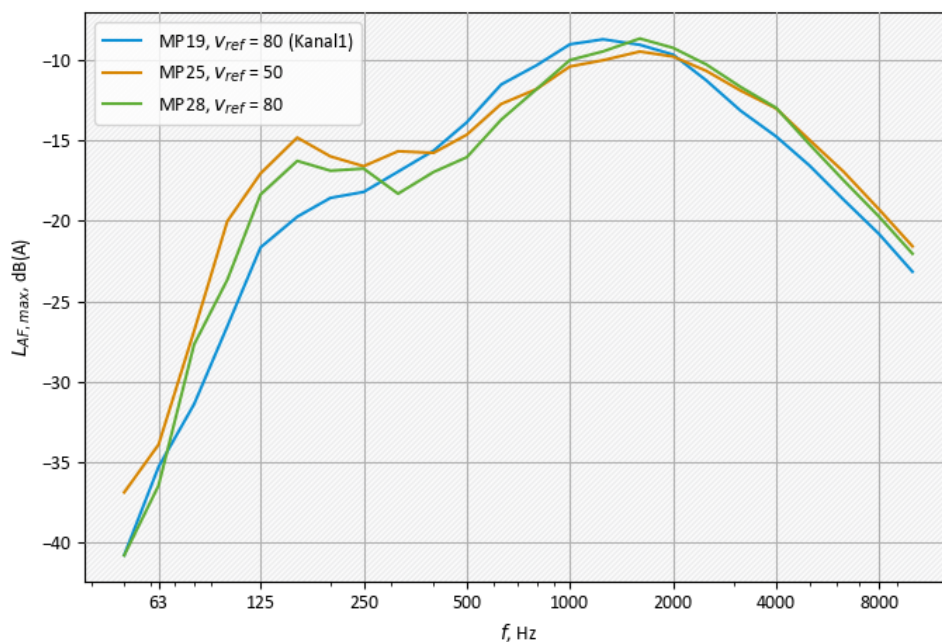


Vergleich der gemessenen maximalen Schalldruckpegel zu den ermittelten SEL für Krafträder. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.11 Spektren von Krafträdern

Die mittleren Terzspektren in Abbildung 63 zeigen im Vergleich zu PKW- oder LKW-Spektren eine deutliche Erhöhung der spektralen Energie bei Frequenzen unterhalb 400 Hz. Dies wird durch die bei Krafträdern dominanteren Motorengeräusche verursacht. Die Spektren sind auf den Pegel bei der jeweiligen Referenzgeschwindigkeit referenziert. Im Vergleich der unterschiedlichen Messpunkte zeigt sich daher ein Versatz der einzelnen Kurven, was auf die unterschiedlichen Referenzpegel zurückzuführen ist. Aufgrund der geringeren Datengrundlage für Krafträder lässt der Vergleich zwischen den Messpunkten keine eindeutige Aussage der spektralen Form hinsichtlich der Geschwindigkeit zu. Daher ist der Gesamtdatensatz für Krafträder in Abbildung 64 (analog zu Abbildung 52) in Geschwindigkeitskategorien aufgeteilt (anstatt nur die Daten einzelner Messpunkte unterschiedlicher Geschwindigkeitsklassen zu vergleichen). Hier ist ersichtlich, dass die im tieferfrequenten Bereich (< 500 Hz) angesiedelten Motorengeräusche mit zunehmender Geschwindigkeit an Dominanz verlieren.

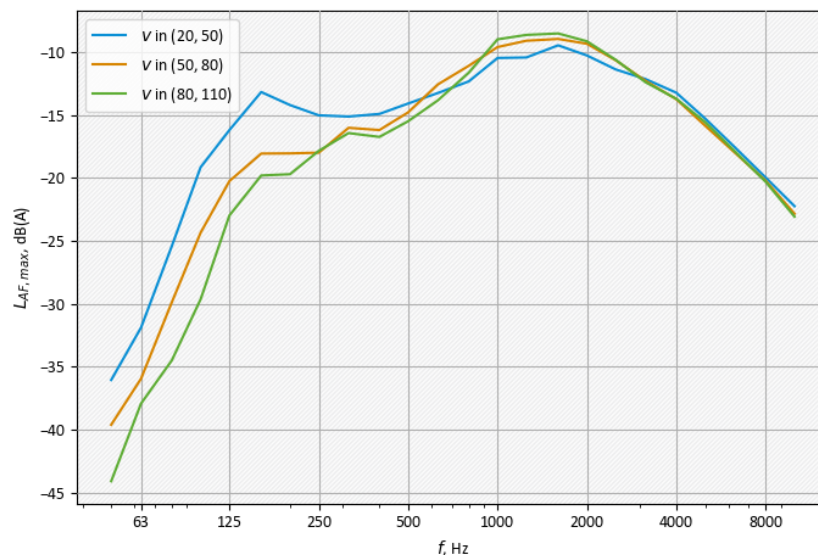
Abbildung 63: Mittlere Spektren der Maximalpegel (korrigiert), Kraftrad



Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), nach Temperatur und Messhöhe korrigiert und auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für Krafträder der Messpunkte MP19, MP25 und MP28.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 64: Spektren in Geschwindigkeitskategorien (Kraftrad)



Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für Krafträder in unterschiedlichen Geschwindigkeitskategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

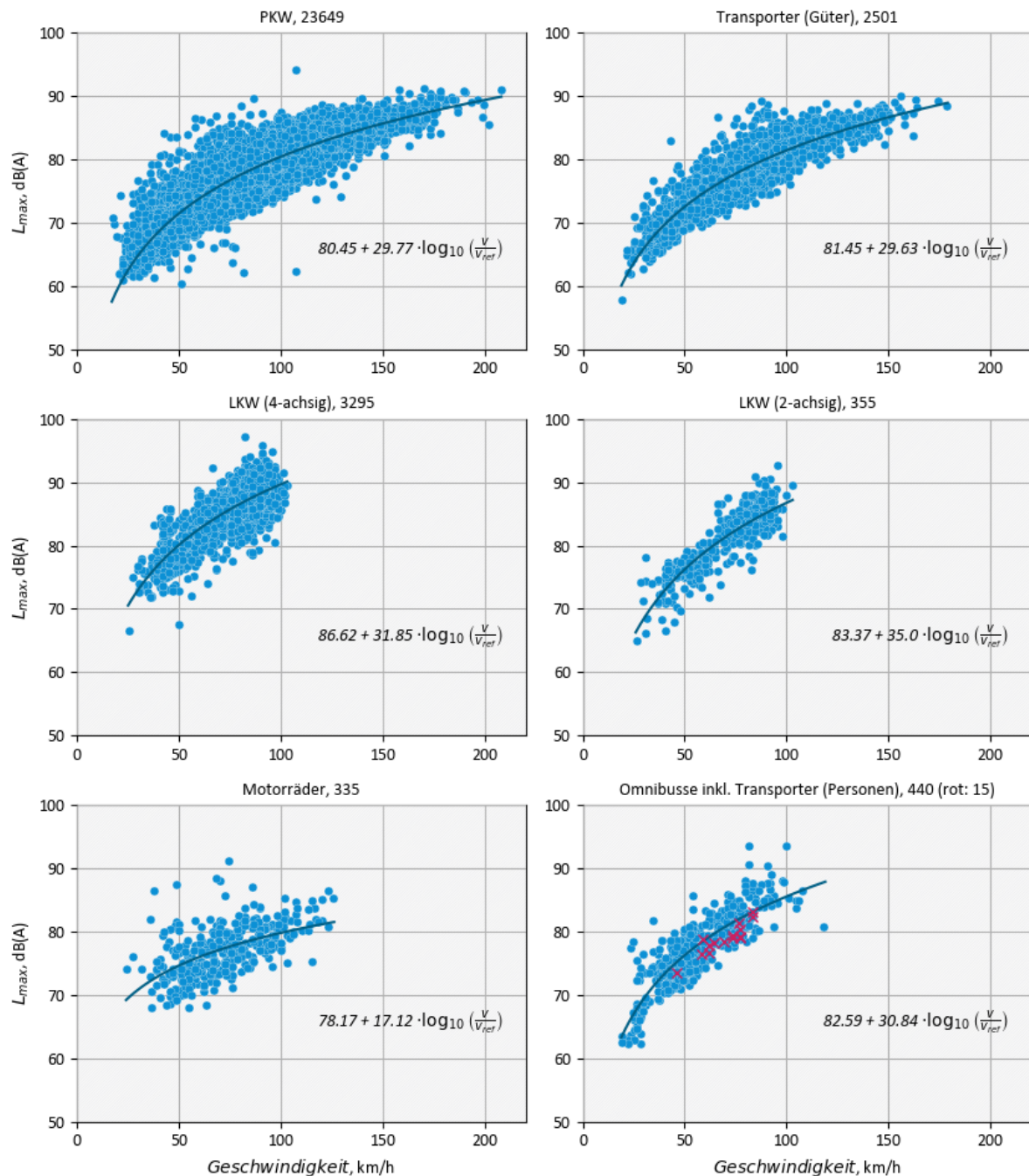
4.3.12 Regressionen verschiedener Fahrzeugklassen

In der Abbildung 65 sind die Ergebnisse der Vorbeifahrtmessungen getrennt für die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien dargestellt. Die Anzahl der Fahrzeuge ist hier geringer als in den Kapiteln 4.3.2, 4.3.5, 4.3.9, da im Folgenden nur die Messpunkte ohne DSH-V 5 und ohne die Wintermessungen ausgewertet werden, um mit einem in sich konsistenten Datensatz zu arbeiten. Die jeweilige zugrunde liegende Fahrzeuganzahl ist über den einzelnen Diagrammen angegeben. Ausreißer sind aus dem Datensatz bewusst nicht entfernt, da die Fahrzeuggeräusche im Allgemeinen betrachtet werden und nicht nur die Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Die Datensätze für die unterschiedlichen Fahrzeugkategorien unterscheiden sich neben der Anzahl an Fahrzeugen auch in den abgedeckten Geschwindigkeitsbereichen. Die Achsen sind in allen Diagrammen gleich gewählt, um sie direkt miteinander vergleichen zu können. Die Fahrzeugkategorien der zweiachsigen LKW und der Güter-Kleintransporter unterscheiden sich in der zulässigen Gesamtmasse, wobei zweiachsige LKW eine Masse $> 3,5$ t besitzen und Kleintransporter eine Masse $\leq 3,5$ t. Die Streuung der Schalldruckpegel ist für die Fahrzeugkategorien PKW, vierachsige LKW und Motorräder größer und für die Fahrzeuggruppen der Güter-Kleintransporter (N1), zweiachsigen LKW und Personentransporter (u. a. Busse) kleiner.

Der Vergleich der Regressionsgeraden in Abbildung 66 zeigt deutlich die unterschiedlichen Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Fahrzeuggruppen. Für die Motorräder ergibt sich z. B. eine flachere Kurve. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Motorräder keine nennenswerten Reifen-Fahrbahn-Geräusche aufweisen, die in den anderen Fahrzeuggruppen ab einer Geschwindigkeit von 30 km/h bis 50 km/h die dominante Schallquelle bilden und stark geschwindigkeitsabhängig sind. Für die Gruppe der zweiachsigen LKW ergibt sich hier eine

leicht größere Steigung. Allerdings ist hier die Datengrundlage mit nur 355 Datenpunkten zu gering, um eine verlässliche Aussage darüber treffen zu können.¹⁵

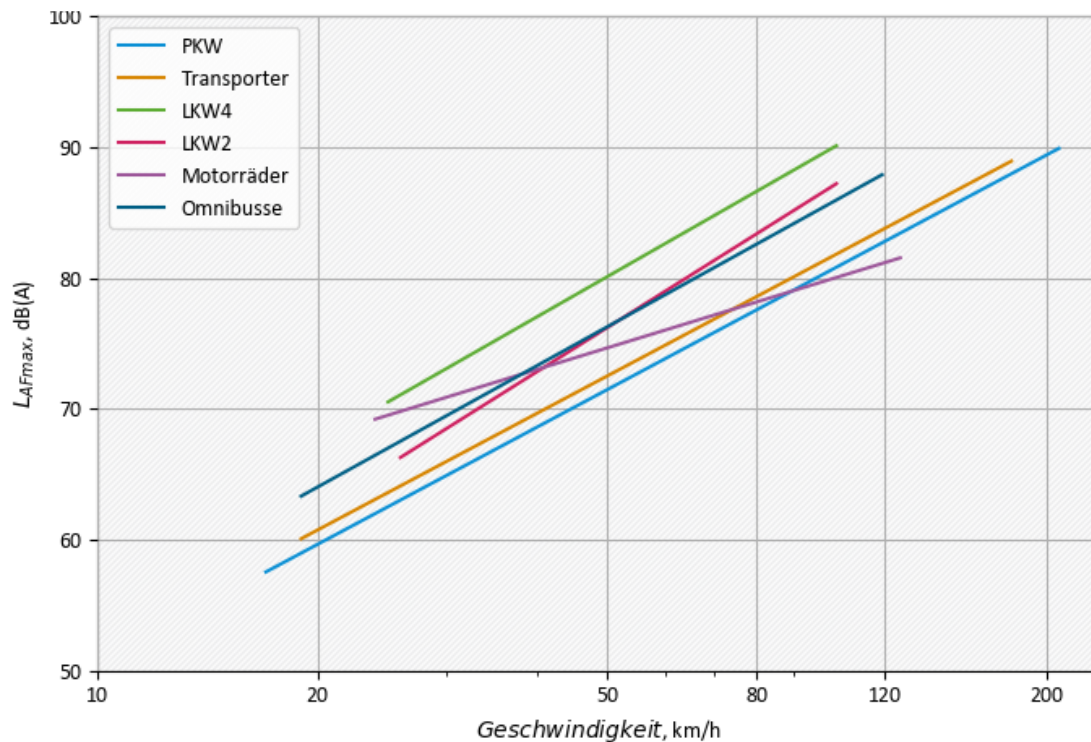
Abbildung 65: Vergleich der Datensätze nach Fahrzeugklassen



Vergleich der Datensätze inkl. Regressionsgeraden des Gesamtdatensatzes (Messhöhe 3 m, korrigiert auf 1,2 m Höhe) für unterschiedliche Fahrzeugkategorien. Die roten Kreuze (Grafik rechts unten) markieren die Mehrfachvorbeifahrten eines einzelnen Linienbusses (an MP11). Dargestellt sind die Ergebnisse der Messdaten ohne die Winter- und DSH-V-Messpunkte. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

¹⁵ In der Kategorie der Motorräder gibt es zwar ebenfalls nur 335 Datenpunkte, jedoch ist hier der Unterschied der Steigung der Regressionsgeraden verglichen mit den anderen Fahrzeugklassen sehr viel deutlicher, was eine Interpretation des Ergebnisses leichter zulässt.

Abbildung 66: Vergleich der Regressionsgeraden nach Fahrzeugkategorie



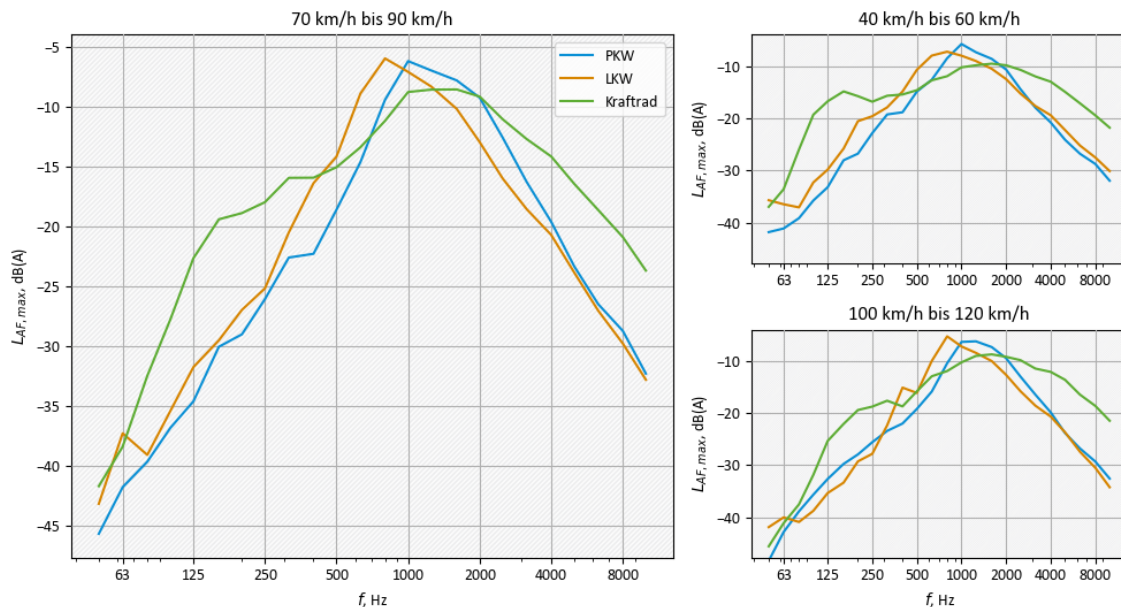
Vergleich der Regressionsgeraden des Gesamtdatensatzes (Messhöhe 3 m, korrigiert auf 1,2 m Höhe) für unterschiedliche Fahrzeugkategorien. Dargestellt sind die Ergebnisse der Messdaten ohne die Winter- und DSH-V-Messpunkte.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.3.13 Spektren verschiedener Fahrzeugklassen

Im Folgenden werden die Spektren der Fahrzeugklassen PKW, vierachsige LKW und Krafträder verglichen. In Abbildung 67 links sind die auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normierten Terzspektren dieser drei Fahrzeugklassen aus dem Geschwindigkeitsbereich zwischen 70 km/h und 90 km/h dargestellt. Das Pegelmaximum ist für PKW erwartungsgemäß bei 1000 Hz angesiedelt und für LKW bei 800 Hz. Der spektrale Pegel ist bei LKW im niederfrequenten Bereich dominanter als bei PKW. Der spektrale Pegel ist bei PKW im höherfrequenten Bereich relativ gesehen dominanter als bei LKW. Motorräder weisen bei Frequenzen unterhalb 500 Hz deutlich mehr spektrale Energie auf als PKW oder LKW, was auf die dominanten Motorengeräusche in Verbindung mit den sehr geringen Reifen-Fahrbahn-Geräuschen bei Krafträdern zurückgeführt werden kann. Auch bei Frequenzen oberhalb 2000 Hz zeigen die Terzspektren von Motorrädern deutlich höhere relative Pegel als jene von PKW oder LKW. Insgesamt kann festgestellt werden, dass Motorradgeräusche breitbandiger sind. Für den niedrigeren und höheren Geschwindigkeitsbereich, welche in Abbildung 67 rechts dargestellt sind, können nahezu die gleichen Schlussfolgerungen gezogen werden.

Abbildung 67: Vergleich der Spektren nach Fahrzeugkategorie für unterschiedliche Geschwindigkeitsbereiche



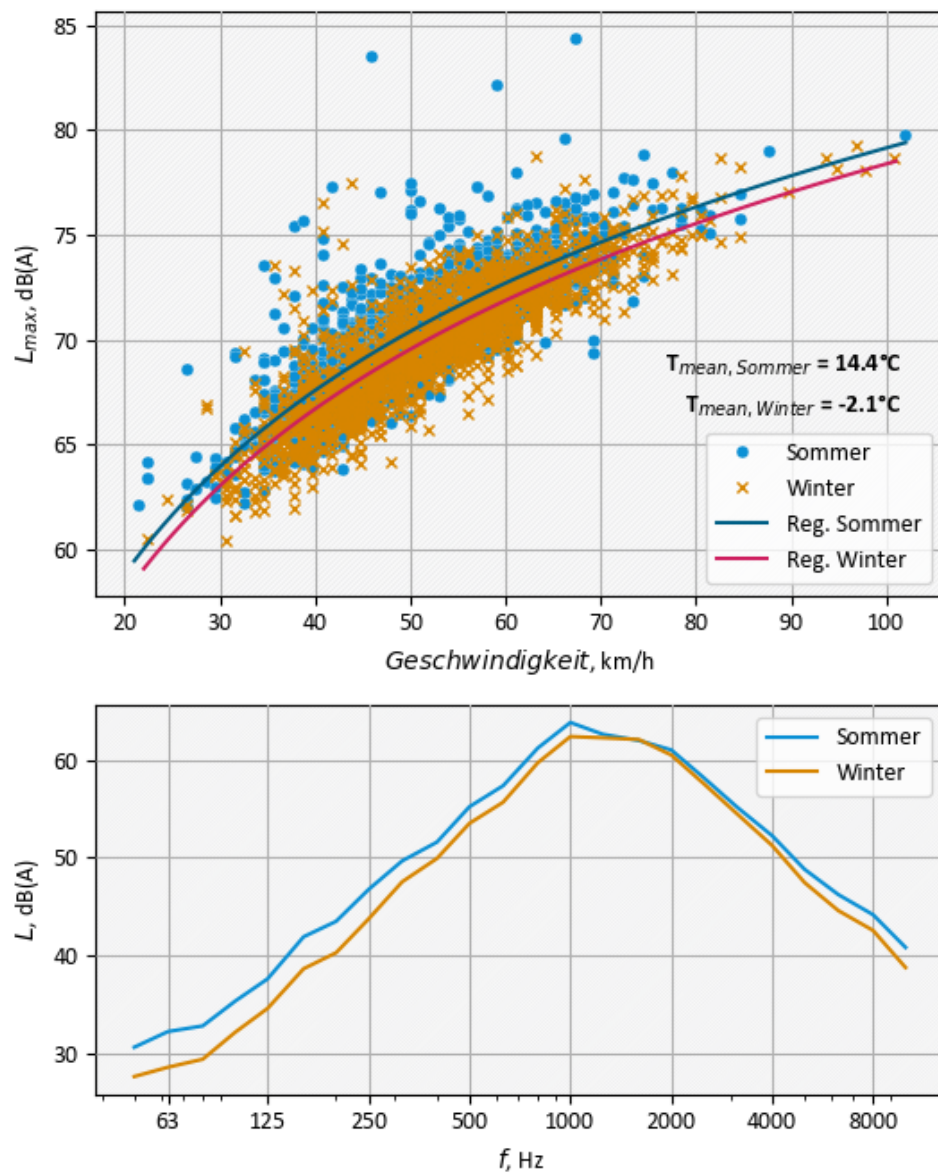
Vergleich der mittleren Terzspektren der 3-m-Messposition (Kanal 2), auf den energetisch gemittelten Gesamtpegel normiert, für die Fahrzeugklassen PKW, LKW und Krafträder in unterschiedlichen Geschwindigkeitskategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.4 Sonderauswertung – Winter

Von den 30 Messreihen wurde an zwei Messpunkten im Sommer sowie im Winter gemessen. Ziel dieser Teiluntersuchung war es, den Einfluss der winterlichen Witterungsbedingungen (insbesondere der niedrigeren Temperatur) und der anderen Bereifung der Fahrzeuge auf die Geräuschcharakteristika zu bestimmen. Abbildung 68 und Abbildung 69 zeigen einen Vergleich zwischen den Messergebnissen im Sommer und im Winter. Die Abbildungen zeigen im jeweils oberen Teil den Schalldruckpegel über der Geschwindigkeit inklusive der Regressionslinien für PKW (temperatur- und messhöhenkorrigiert) und im unteren Bereich das zugehörige mittlere Spektrum referenziert auf den mittleren Vorbeifahrtpegel bei der Referenzgeschwindigkeit. Es wurde ein Messort mit niedrigerer und einer mit einer höheren Geschwindigkeitskategorie gewählt. Bei den Wintermessungen lagen die Messtemperaturen für die beiden Messpunkte zwischen -6,7 °C und 5,7 °C. Zusätzlich sollten trockene Bedingungen herrschen. Dies war aufgrund der geringen Temperatur und der daraus resultierenden zeitweisen hohen relativen Luftfeuchte nicht zu jeder Tageszeit möglich und sollte bei der weiteren Interpretation berücksichtigt werden. Im spektralen Bereich bei Frequenzen ≤ 1000 Hz, in dem die Vibrationen der Reifen dominieren, liegt die spektrale Energie des Wintermesspunkts nach Anwendung der Temperaturkorrektur deutlich unterhalb der Kurve des Sommermesspunkts. Wir führen dies darauf zurück, dass Winterreifen eine weichere Gummimischung aufweisen, um auch bei niedrigeren Temperaturen noch eine ausreichende Griffigkeit bereit zu stellen. Dieser Effekt scheint auch bei der mittleren Messtemperatur von -2 °C bis -1 °C noch wirksam zu sein und das mutmaßlich lautere (da gröbere) Winterreifenprofil mehr als zu kompensieren. Die Geschwindigkeitsklasse scheint darauf nur einen geringen Einfluss zu haben. Es wird hier bewusst auf die Beurteilung der absoluten Differenzen verzichtet, da nicht klar ist, inwieweit die

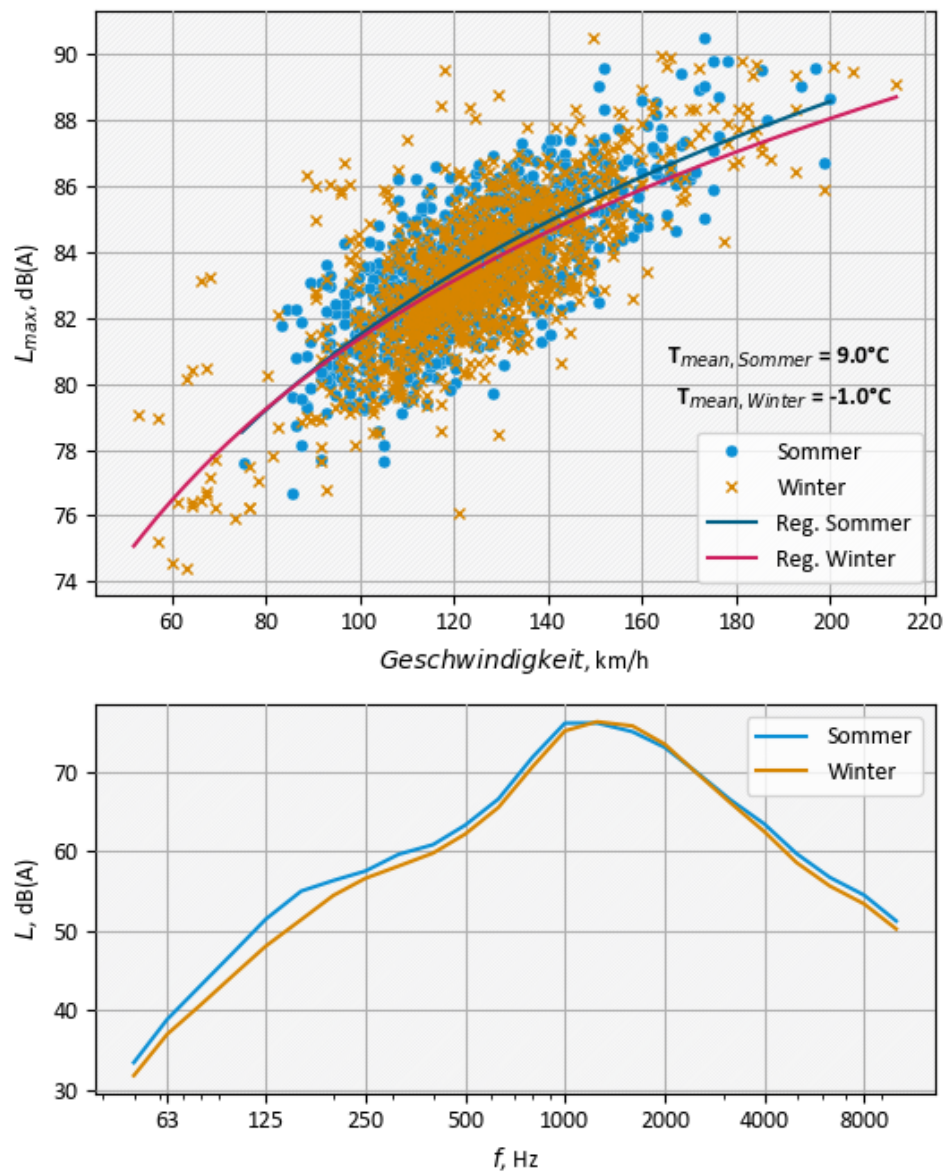
Temperaturkorrektur, die für Temperaturen zwischen 5 °C und 30 °C konzipiert ist, hier korrekte Anwendung findet.

Abbildung 68: MP4/MP13: Sanatoriumswiese (PKW, korrigierte Pegel)



Vergleich der Messwerte an der Sanatoriumswiese im Sommer und im Winter für PKW. Oben: Maximalpegel über der Geschwindigkeit inkl. Regressionslinien korrigiert nach Temperatur und Messhöhe, unten: mittlere Terzspektren. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 69: MP12/MP14: B17 (PKW, korrigierte Pegel)



Vergleich der Messwerte an der B17 im Sommer und im Winter für PKW. Oben: Maximalpegel über der Geschwindigkeit inkl. Regressionslinien korrigiert nach Temperatur und Messhöhe, unten: mittlere Terzspektren.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

4.5 Sonderauswertung – DSH-V-Messpunkte

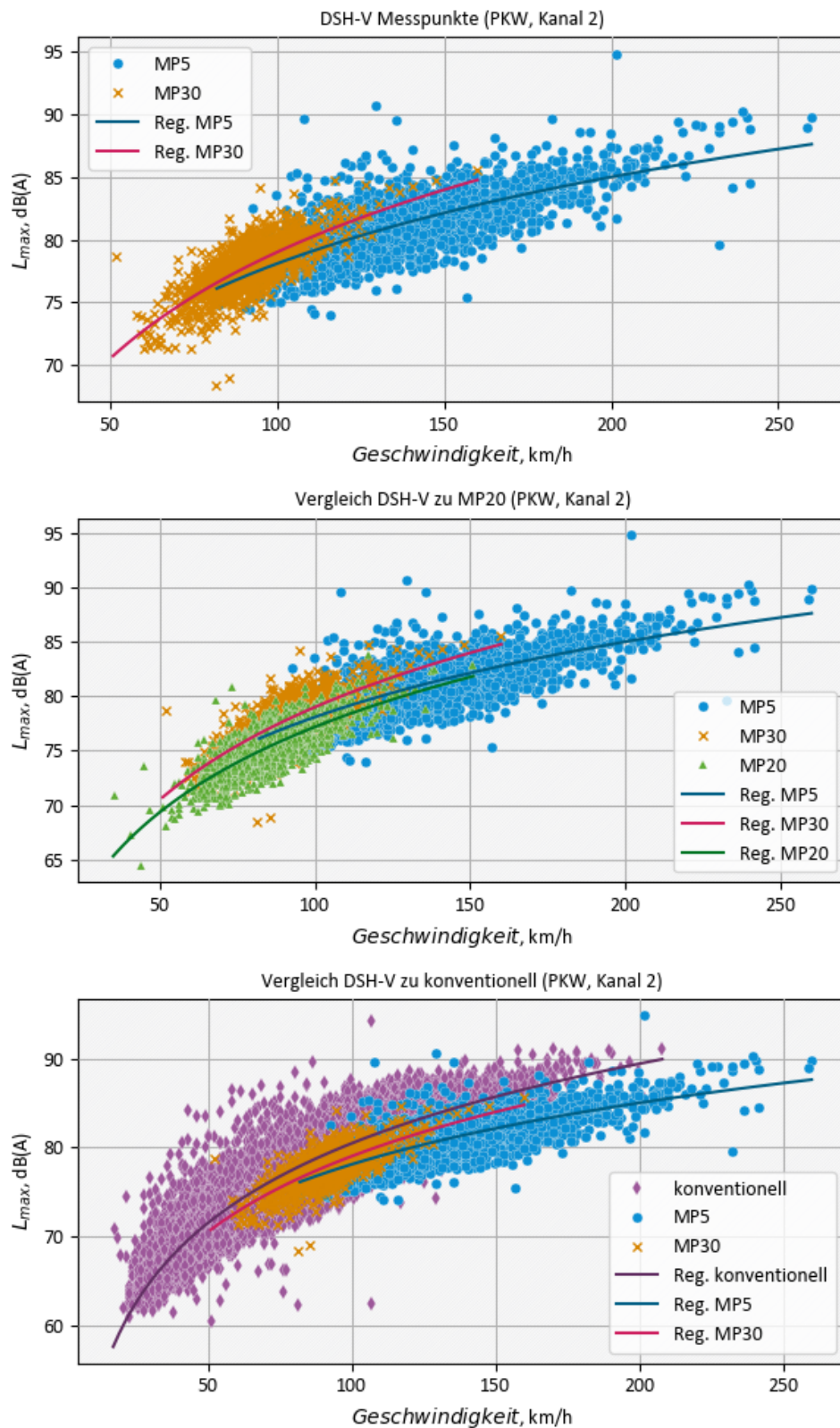
Zwei der 30 Messpunkte wurde an geräuschkindernden DSH-V-Deckschichten mit 5 mm Größtkorn eingerichtet. Einer der Messpunkte lag in Bayern (MP5), ein anderer in Sachsen (MP30). Beide Deckschichten waren mit mehr als zehn Jahren Liegedauer deutlich gealtert und weisen eine deutlich unterschiedliche Verkehrszusammensetzung auf. Während an MP5 größtenteils PKW mit hohen Geschwindigkeiten verkehren, wurde an MP30 ebenfalls Schwerlastverkehr sowie landwirtschaftlicher Verkehr bei mittleren Geschwindigkeiten gemessen.

Abbildung 70 zeigt in der oberen Grafik den Schalldruckpegel über der Geschwindigkeit inklusive der Regressionslinien für PKW für beide Messpunkte im Vergleich. Es ist zu erkennen, dass die geräuschkindernde Wirkung an MP30 deutlicher abgenommen hat als an MP5, was durch die vergleichsweise höhere Belastung durch Schwerlastverkehr erklärt werden kann.

Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, waren die gemessenen Schalldruckpegel an MP20 ebenfalls besonders leise, obwohl dieser Belag nicht planmäßig geräuschkindernd eingebaut wurde. Im mittleren Diagramm in Abbildung 70 wurden die Datenpunkte und die Regressionslinie von MP20 zum Vergleich zu den beiden Punktwolken der DSH-V-Messpunkte hinzugefügt. Es ist deutlich erkennbar, dass die Geräuschpegel auf dieser konventionellen Deckschicht aus Asphaltbeton im selben Bereich liegen wie bei den beiden geräuschkindernden DSH-V-Deckschichten – teilweise sogar darunter.

Schließlich sind im unteren Diagramm in Abbildung 70 die beiden DSH-V-Messpunkte noch im Vergleich zum Gesamtdatensatz für PKW auf den konventionellen SMA- und Asphaltbeton-Deckschichten dargestellt. Hier wird der Effekt der geräuschkindernden Eigenschaften der Deckschichten nochmals verdeutlicht, da die Einzelregressionen von MP5 und MP30 jeweils konsequent unterhalb der Gesamtregression liegen.

Abbildung 70: Ergebnisse auf den DSH-V-Deckschichten



Vergleich der DSH-V-Messpunkte für PKW. Oben: verglichen miteinander (MP5 und MP30), Mitte: verglichen mit unüblich leisem MP20 (kein DSH-V), unten: verglichen mit dem Gesamtdatensatz für PKW auf SMA- und Asphaltbetonoberflächen (konventionell). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

5 Einfluss der Fahrzeugparameter

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln miteinander vereint. Hierbei werden die akustischen Daten in Abhängigkeit von den Fahrzeugparametern beschrieben.

5.1 Einfluss des Antriebstyps

Abbildung 71 zeigt den Schalldruckpegel über der Geschwindigkeit des Gesamtdatensatzes für PKW getrennt für verschiedene Antriebsarten. Zusätzlich zur Regressionsgeraden sind die mittleren Pegel in Geschwindigkeitsintervallen von 5 km/h aufgetragen. Hier wird ersichtlich, dass die Regressionslinie von den mittleren Pegeln des jeweiligen Geschwindigkeitsintervalls abweicht, wobei der mittlere Pegel vor allem bei höheren Geschwindigkeiten sichtbar über der Regressionslinie liegt. Dies gilt für alle Antriebsarten – dieser Effekt ist also mutmaßlich nicht auf den Antriebsstrang zurückzuführen, sondern könnte beispielsweise durch aerodynamische Effekte bei hohen Geschwindigkeiten zustande kommen.

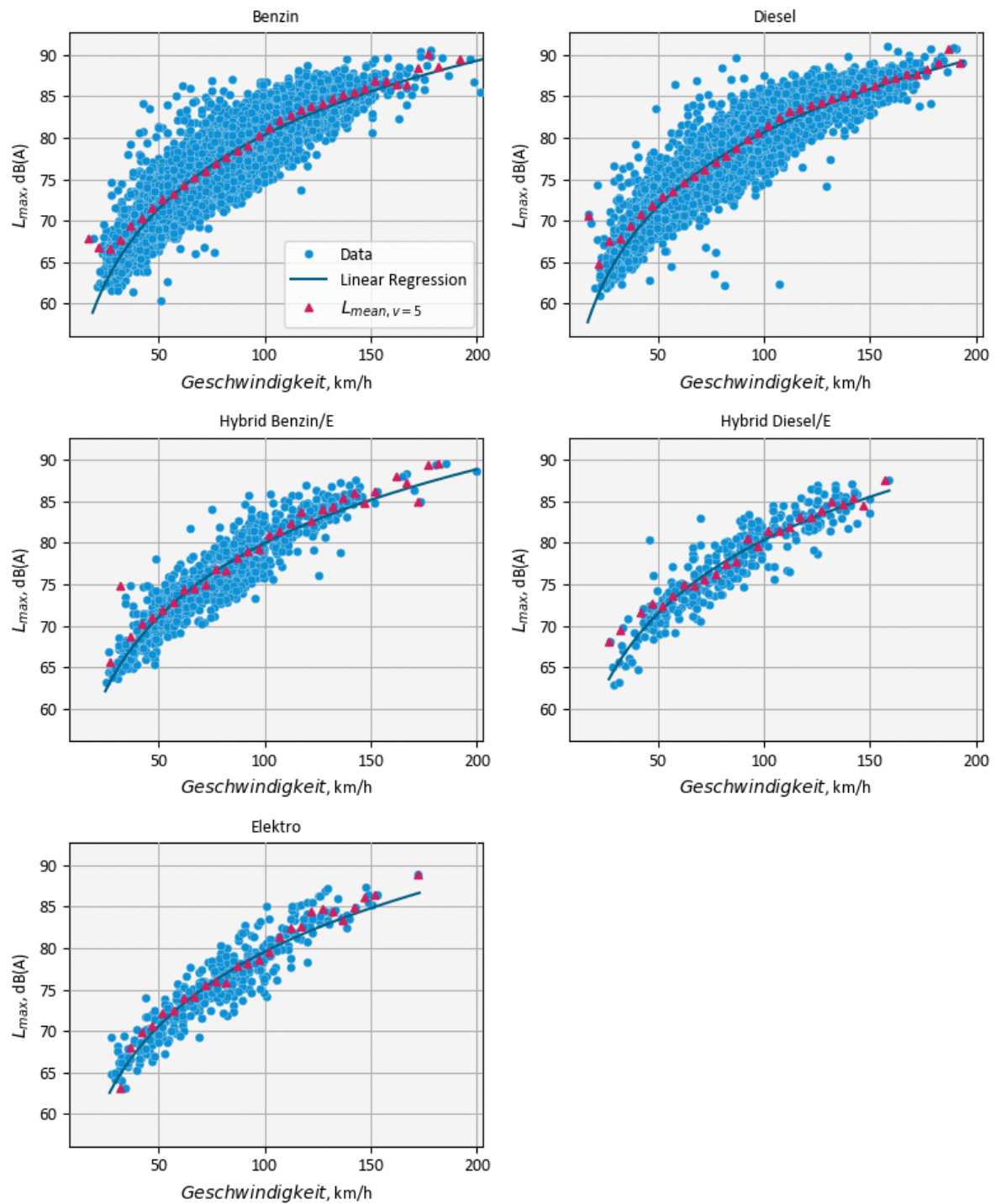
Um den Unterschied zwischen den Motortypen besser erkennen zu können, wurden in Abbildung 72 die Regressionsgeraden der verschiedenen Antriebsarten über einer logarithmischen x-Achse (Geschwindigkeiten) direkt gegenübergestellt. Auf der linken Seite ist zu erkennen, dass die Steigung für alle Motortypen parallel verläuft und sich ein leichter Offset zwischen den Geraden ergibt. Um den Abstand zwischen den Geraden besser erkennen zu können, ist dieser auf der rechten Seite der Abbildung für die Geschwindigkeit 80 km/h grafisch dargestellt. Die Reihenfolge der Antriebsarten *von lauter zu leiser* ergibt sich zu:

Diesel → Hybrid/Diesel → Benzin → Hybrid/Benzin → Elektro

Elektrofahrzeuge sind dabei ca. 0,5 dB leiser als die nächstlautere Antriebsklasse der hybriden Benzin- und ca. 1,2 dB leiser als Dieselfahrzeuge. Dies bedeutet, dass die zunehmende Elektrifizierung der Fahrzeugflotte zwar zu einer leichten Verringerung der Schallemissionen führen kann, diese jedoch geringer ausfällt als dies möglicherweise an vielen Stellen vermutet/erhofft wird. Der Grund hierfür ist, dass die maßgebliche Geräuschquelle ab ca. 30 km/h die Reifen-Fahrbahn-Geräusche sind, die auch bei Elektrofahrzeugen in ähnlicher Ausprägung vorhanden sind. Bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h, wo eine größere Differenz der maximalen Schalldruckpegel erwartet werden könnte, sind keine Messdaten vorhanden.

Schließlich sind in den Diagrammen in Abbildung 73 die mittleren Terzspektren verschiedener Antriebstypen in unterschiedlichen Geschwindigkeitskategorien dargestellt. Hier kann erkannt werden, dass es keinen signifikanten spektralen Unterschied zwischen den Fahrzeugen verschiedener Antriebstypen gibt. Dies kann durch die Dominanz der Reifen-Fahrbahn-Geräusche erklärt werden. Dieses Ergebnis zeigt sich auch im niedrigeren Geschwindigkeitsbereich von 50 km/h.

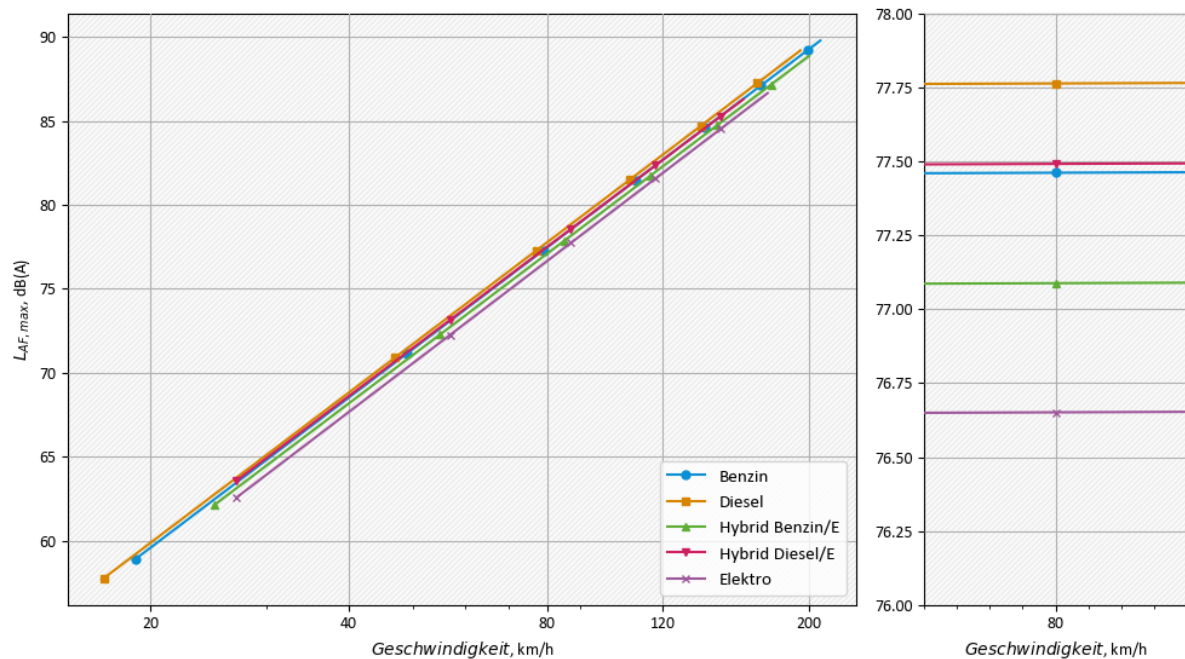
Abbildung 71: Vorbeifahrtmessergebnisse im Detail für verschiedene Antriebstypen (PKW)



Vergleich der Datensätze des Gesamtdatensatzes für PKW (Messhöhe 3 m, korrigiert) inkl. Regressionsgeraden und mittlerem Maximalpegel für unterschiedliche Kraftstoff-/Energiequellen.

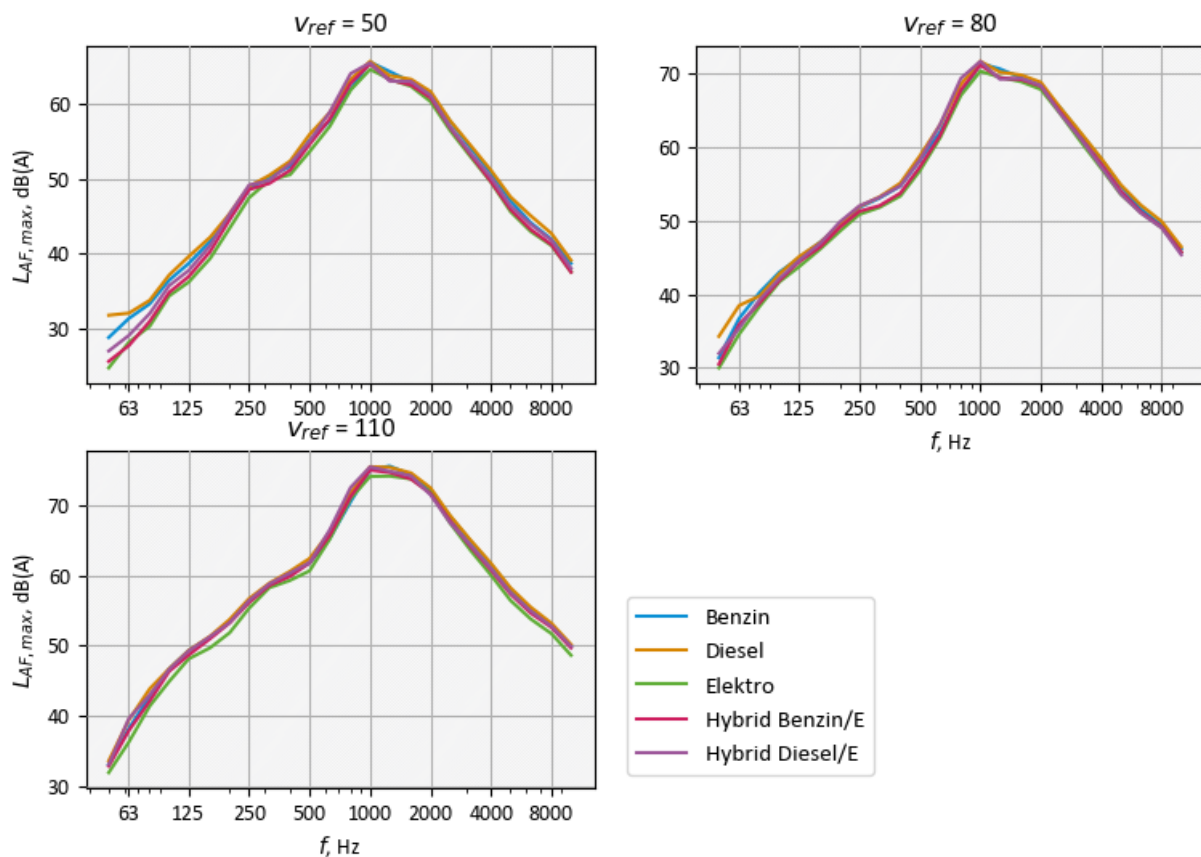
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 72: Einfluss der Antriebstypen (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch



Vergleich der Regressionsgeraden für PKW unterschiedlicher Kraftstoff-/Energiequellen. Links: über der Geschwindigkeit, rechts: für 80 km/h. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 73: Spektraler Einfluss der Antriebstypen

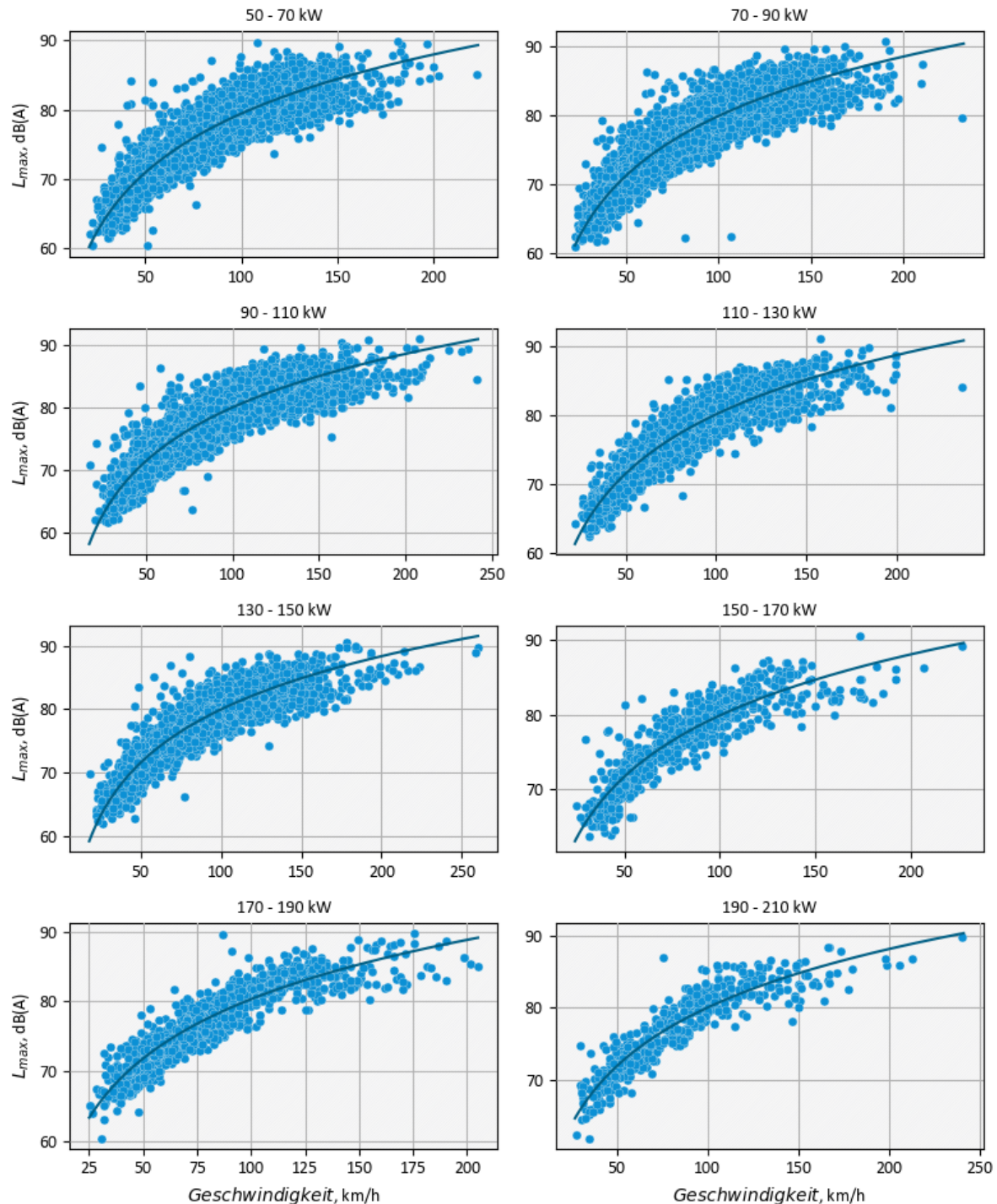


Vergleich der Spektren für PKW unterschiedlicher Kraftstoff-/Energiequellen in verschiedenen Geschwindigkeitskategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

5.2 Einfluss der Nennleistung

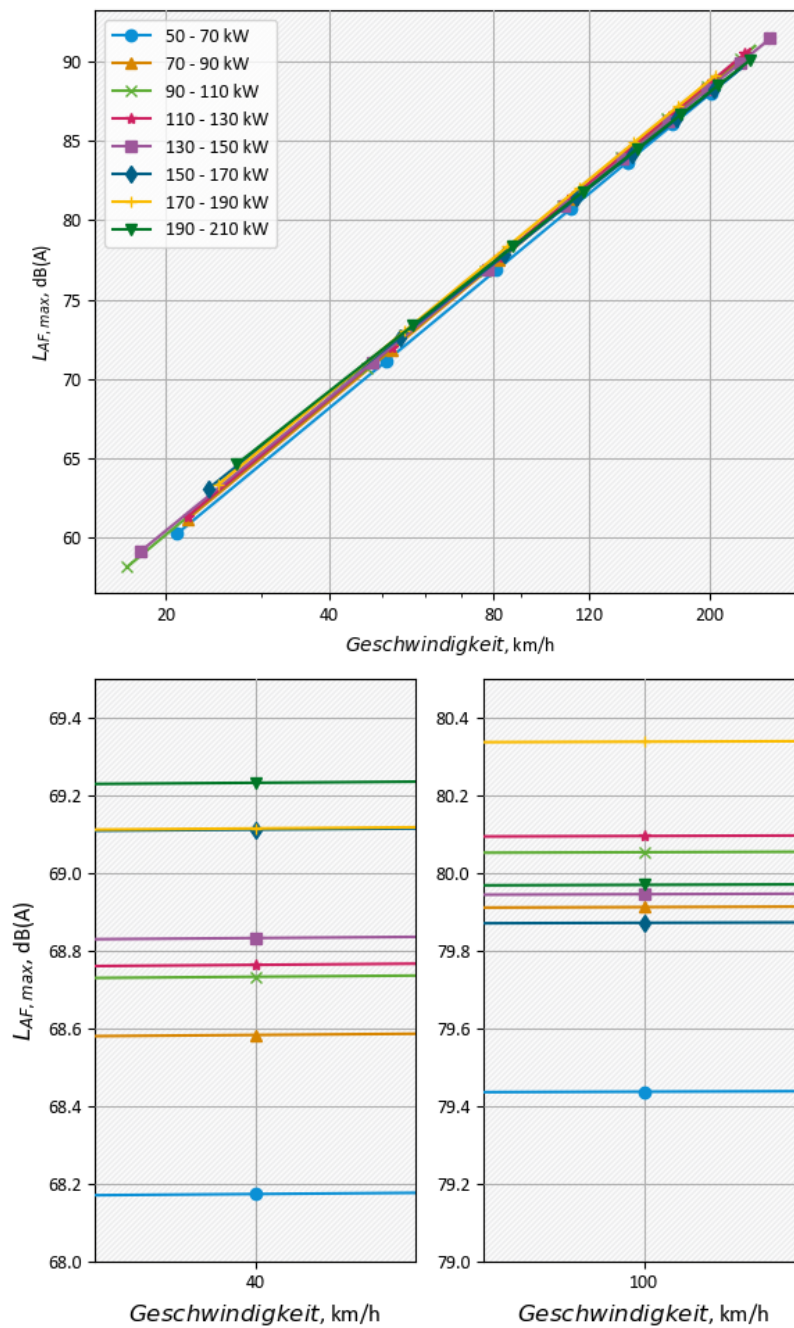
Nicht nur der Antriebstyp, sondern auch die Leistung des Motors hat einen Einfluss auf den Geräuschpegel. Um diesen zu betrachten wurde der Gesamtdatensatz für PKW in 20-kW-breite Leistungsklassen aufgeteilt. Abbildung 74 zeigt die Teildatensätze der Nennleistungskategorien für PKW, Abbildung 75 zeigt einen Vergleich der resultierenden Regressionsgeraden.

Abbildung 74: Verschiedene Nennleistungskategorien (PKW)



Vergleich der Datensätze des Gesamtdatensatzes für PKW (Messhöhe 3 m, korrigiert) inkl. Regressionsgeraden für unterschiedliche Nennleistungskategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Abbildung 75: Einfluss der Nennleistungskategorien (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch



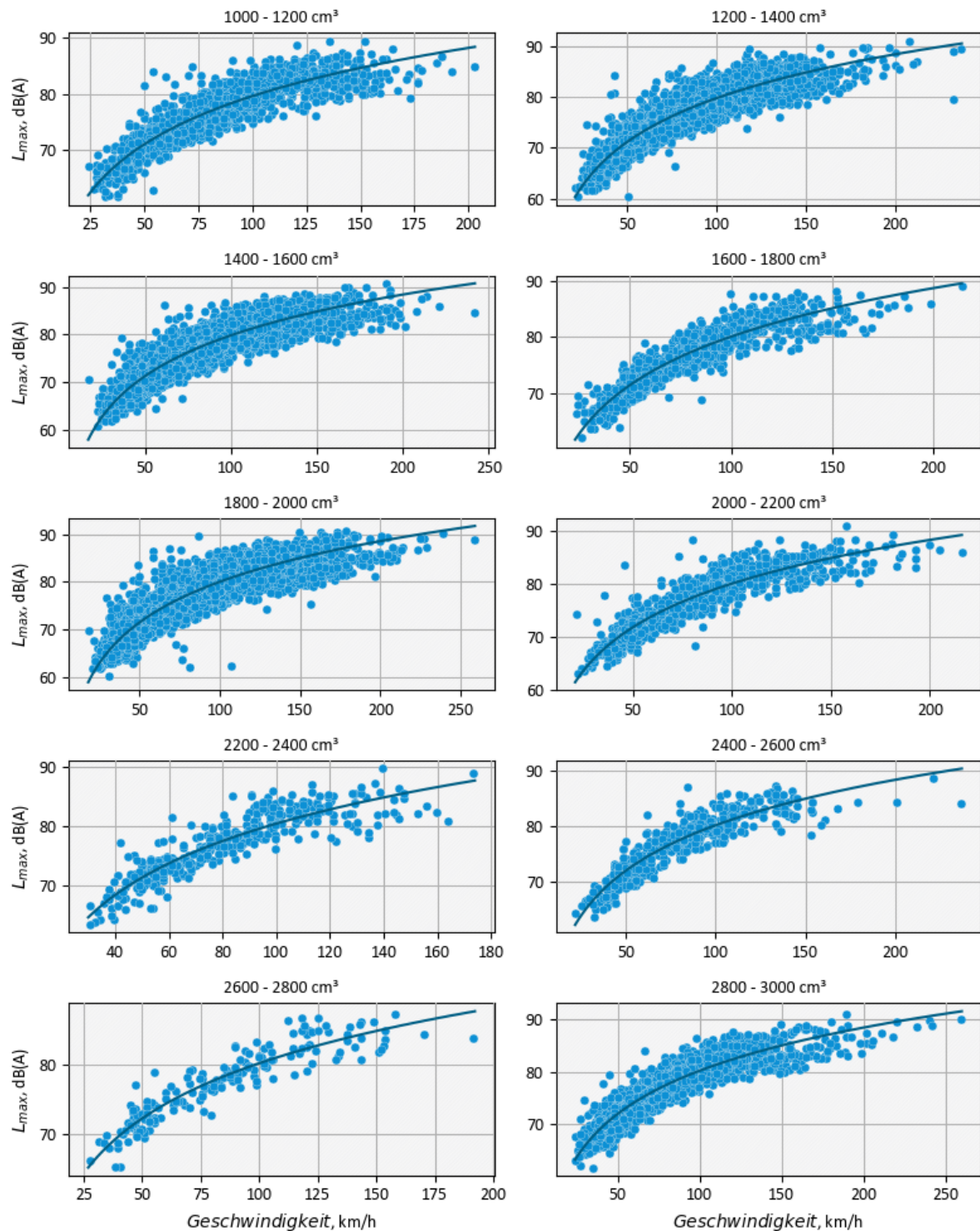
Vergleich der Regressionsgeraden für PKW unterschiedlicher Nennleistungskategorien. Oben: über der Geschwindigkeit, unten: für 40 km/h (links) und 100 km/h (rechts). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Es lässt sich feststellen, dass der Pegel bei niedrigen Geschwindigkeiten mit steigender Nennleistung zunimmt – die Reihenfolge der Regressionsgeraden stimmt dort exakt mit der Reihenfolge der Leistungssegmente überein. Der Pegelunterschied zwischen niedrigster und höchster Leistungskategorie beträgt hier ca. 1 dB. Der deutliche Einfluss der Nennleistung auf das Vorbeifahrtgeräusch bei niedrigen Geschwindigkeiten zeigt, dass hier das Motorengeräusch einen nennenswerten Einfluss hat. Bei höheren Geschwindigkeiten wird das Reifen-Fahrbahn-Geräusch zur dominanten Schallquelle. Daher ist hier die Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Nennleistung geringer, jedoch folgt sie demselben Trend. Der Pegelunterschied zwischen niedrigster und zweithöchster Leistungskategorie (maximaler Pegelunterschied in diesem Geschwindigkeitsbereich) beträgt hier ca. 0,8 dB. Wir vermuten, dass bei der höheren Geschwindigkeit, bei der das Reifen-Fahrbahn-Geräusch dominant ist, die tendenziell breiteren und sportlicheren Reifen bei Fahrzeugen mit höherer Nennleistung einen Einfluss auf die Vorbeifahrtgeräusche haben.

5.3 Einfluss des Hubraums

Wie die Nennleistung hat auch der Hubraum des Motors einen Einfluss auf den Geräuschpegel. Hier ist zu beachten, dass Elektrofahrzeuge nicht mitberücksichtigt werden können, da diese keinen Verbrennungsmotor besitzen. Außerdem sind bestimmte Hubraumsegmente im Fahrzeugmarkt allgemein weniger vertreten (vgl. Abbildung 23). In Abbildung 76 sind die Einzeldatensätze für PKW für Hubraumklassen der Breite 200 cm³ dargestellt. Dort ist zu sehen, dass vor allem Hubraumklassen zwischen 2,2 l und 2,8 l weniger stark vertreten sind. Die resultierenden Regressionslinien sind daher möglicherweise weniger repräsentativ.

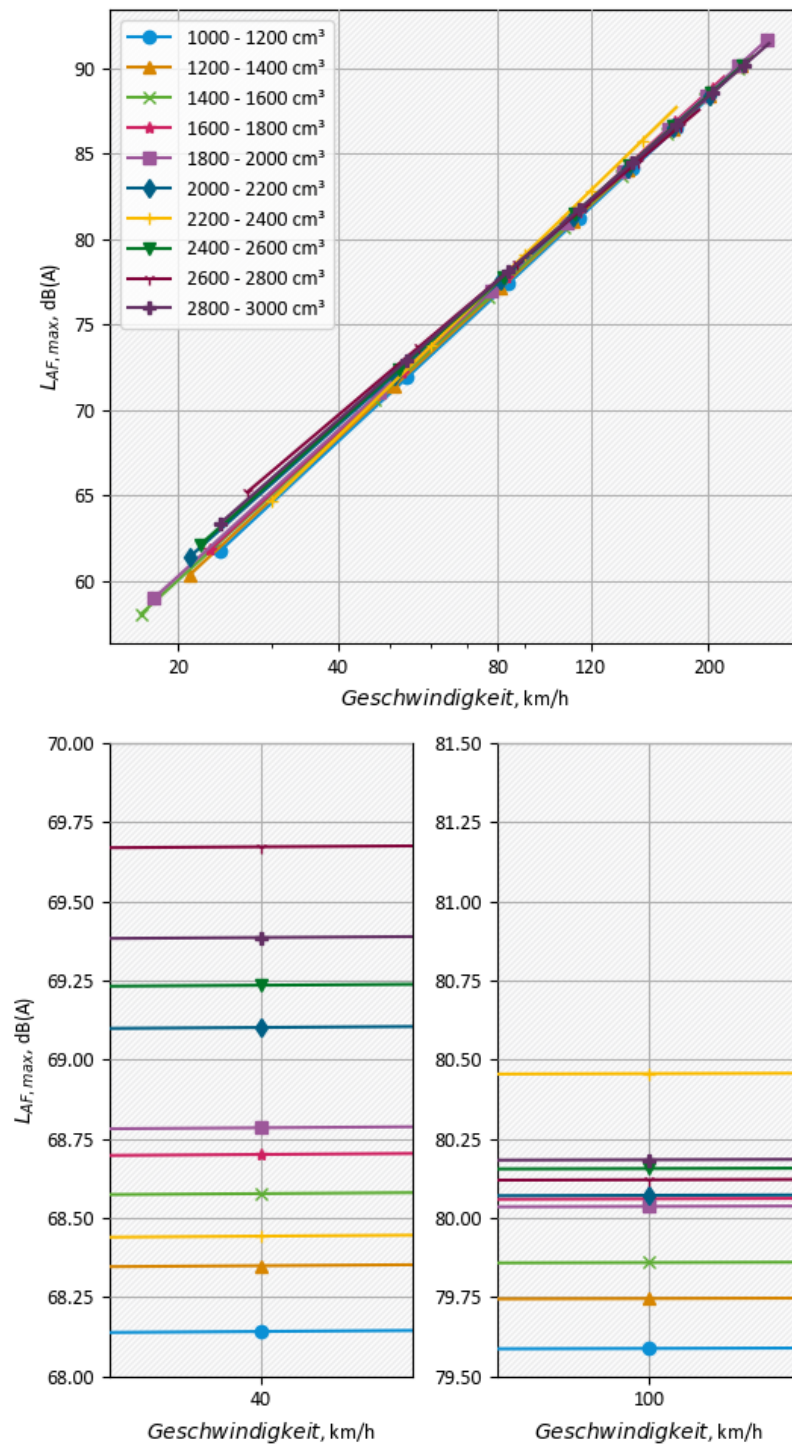
Abbildung 76: Verschiedene Hubraumkategorien (PKW)



Vergleich der Datensätze des Gesamtdatensatzes für PKW (Messhöhe 3 m, korrigiert) inkl. Regressionsgeraden für unterschiedliche Hubraumkategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

In Abbildung 77 ist der Vergleich der Einzelregressionen dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Kurven über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich gezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geraden nicht parallel verlaufen, weshalb in den unteren Diagrammen die Abstände der Kurven bei den Geschwindigkeiten 40 km/h und 100 km/h dargestellt sind. Analog zur Untersuchung der Nennleistung lässt sich auch hier bei niedrigeren Geschwindigkeiten der Trend ablesen, dass der Schalldruckpegel umso höher ausfällt, je größer der Hubraum des Motors ist – wenngleich die Reihenfolge nicht vollständig den Hubraumklassen folgt. Bei höheren Geschwindigkeiten ist der Unterschied der Abstände nicht mehr signifikant und es ergeben sich nur noch schwache Trends.

Abbildung 77: Einfluss der Hubraumkategorien (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch

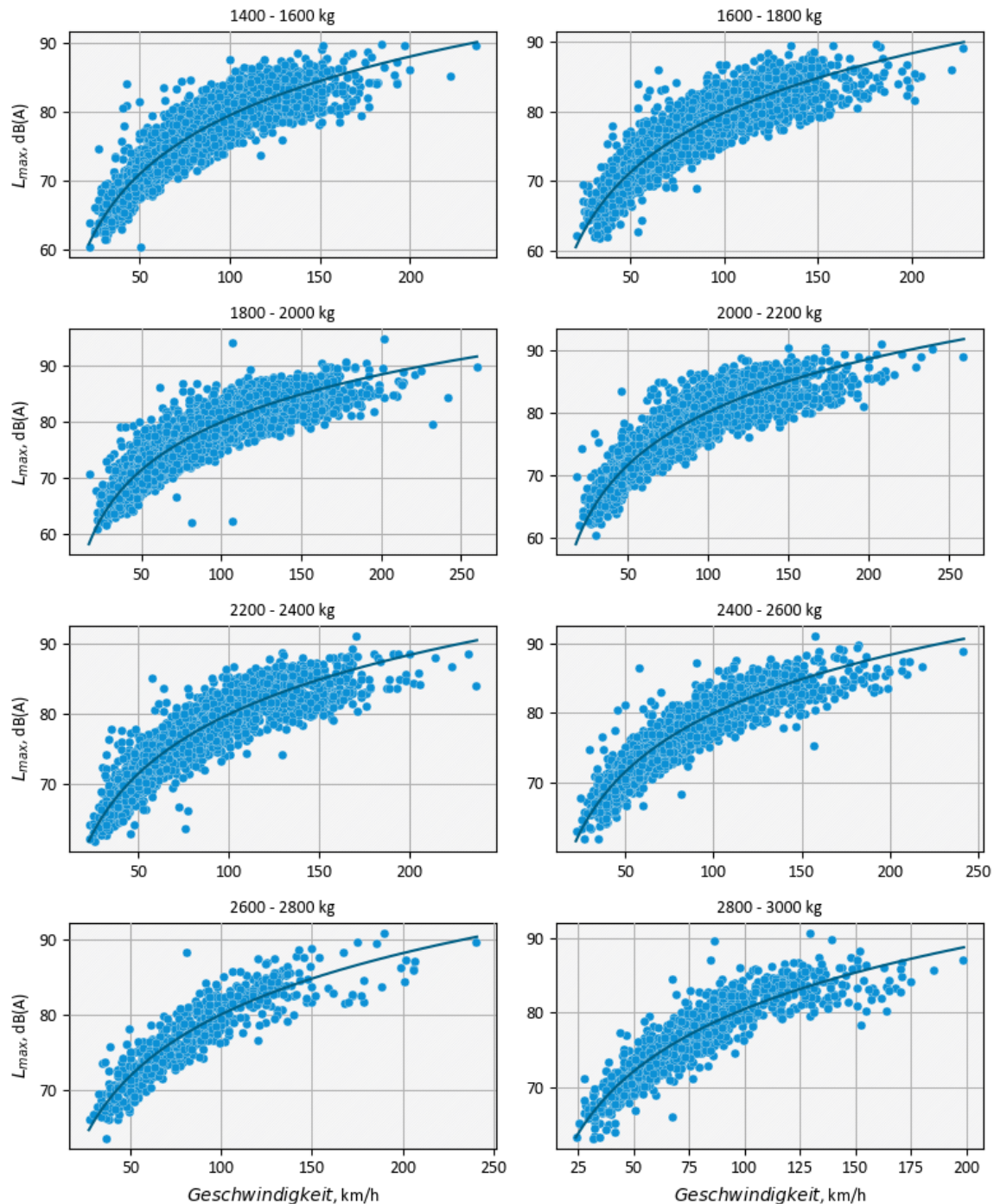


Vergleich der Regressionsgeraden für PKW unterschiedlicher Hubraumkategorien. Oben: über der Geschwindigkeit, unten: für 40 km/h (links) und 100 km/h (rechts). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

5.4 Einfluss der Fahrzeugmasse

Analog zu den vorangegangenen Kapiteln hat auch die zulässige Fahrzeugmasse einen Einfluss auf den Geräuschpegel. Dieser wurde für LKW bereits in Kapitel 4.3.5 erläutert. Für PKW sind ergänzend die folgenden Darstellungen gegeben. Abbildung 78 zeigt die Datensätze in unterschiedlichen Fahrzeugmasssekategorien. Im Unterschied zu den Hubraumkategorien sind hier alle Subkategorien repräsentativ, da das Histogramm der Fahrzeugmasse weniger diskret ausfällt (vgl. Abbildung 26).

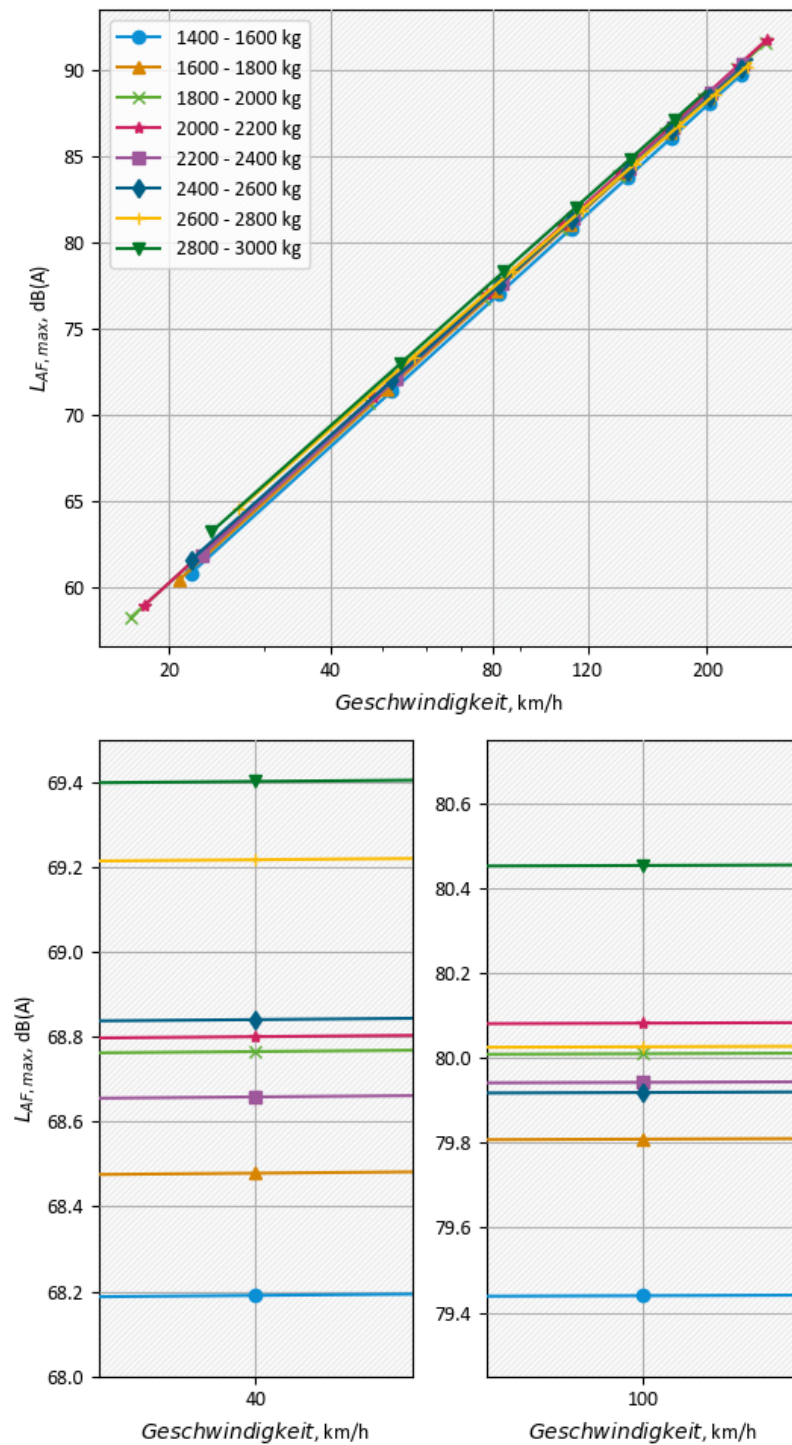
Abbildung 78: Verschiedene Fahrzeugmasssekategorien (PKW)



Vergleich der Datensätze des Gesamtdatensatzes für PKW (Messhöhe 3 m, korrigiert) inkl. Regressionsgeraden für unterschiedliche Fahrzeugmassekategorien. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

In Abbildung 79 ist der Vergleich der Einzelregressionen dargestellt. Im oberen Teil sieht man die Kurven über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich. Auch hier ist zu erkennen, dass die Geraden nicht ganz parallel verlaufen, weshalb im unteren Teil zusätzlich die Abstände der Kurven bei den Geschwindigkeiten 40 km/h und 100 km/h dargestellt sind. Analog zur Untersuchung der Nennleistung und des Hubraums lässt sich auch hier bei niedrigeren Geschwindigkeiten der Trend ablesen, dass der Schalldruckpegel umso höher ausfällt, je größer die Fahrzeugmasse ist – wenngleich sich die Reihenfolge nicht gänzlich deckt. Bei höheren Geschwindigkeiten ist bis auf eine leichte Verschiebung einzelner Geraden derselbe Trend zu erkennen, und zwar – anders als beim Hubraum – in einem ähnlichen Dynamikbereich.

Abbildung 79: Einfluss der Fahrzeugmassekategorien (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch



Vergleich der Regressionsgeraden für PKW unterschiedlicher Fahrzeugmassekategorien. Oben: über der Geschwindigkeit, unten: für 40 km/h (links) und 100 km/h (rechts). (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

5.5 Einfluss des Erstzulassungsjahres

Im Folgenden wird untersucht, inwieweit sich das Alter der Fahrzeuge auf den Geräuschpegel auswirkt. Wie Abbildung 30 zeigte, wurden die gesetzlichen Grenzwerte des Fahrgeräusches immer weiter verschärft. Dies lässt vermuten, dass sich eine Korrelation zwischen den gemessenen Geräuschpegeln und dem Zulassungsjahr ergeben könnte. Abbildung 80 zeigt den Schalldruckpegel sowie die mittleren Geräuschpegel über dem Erstzulassungsjahr für drei Geschwindigkeitskategorien. Es ist erkennbar, dass die Punktwolken sowie der mittlere Geräuschpegel pro Jahr sehr flach verlaufen, was gegen die Hypothese spricht, dass alte Fahrzeuge aufgrund der damals gültigen höheren Grenzwerte generell lauter sind. In den Daten ist keine klare Tendenz zu erkennen, weder in die eine noch in die andere Richtung.

Abbildung 80: Einfluss des Erstzulassungsjahres (PKW) auf das Vorbeifahrtgeräusch



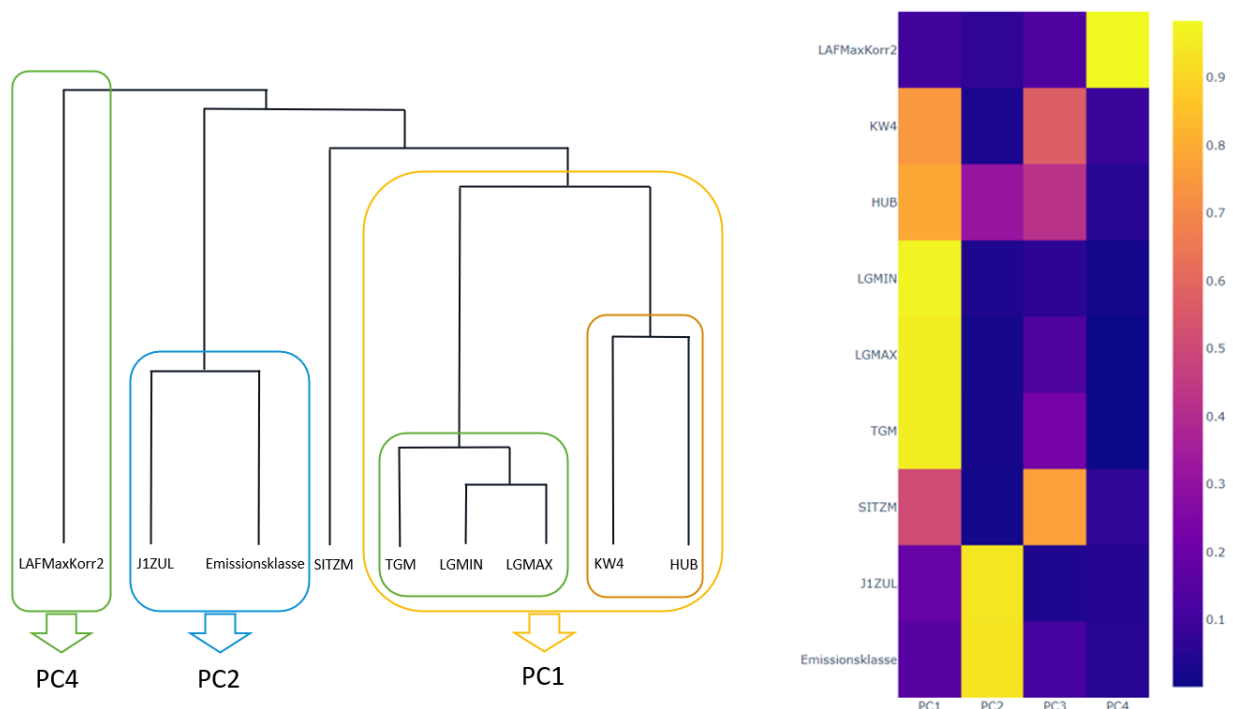
Darstellung des Einflusses des Erstzulassungsjahres auf den Maximalpegel für unterschiedliche Geschwindigkeitsbänder inklusive der mittleren Pegel je Zulassungsjahr. Oben: 40 ± 2 km/h, Mitte: 80 ± 2 km/h, unten: 100 ± 2 km/h.
(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

5.6 KI-Verfahren

In den vorangegangenen Kapiteln wurde der Einfluss der Fahrzeugparameter mittels statistischer Verfahren, insbesondere der linearen Regression, untersucht. Zusätzlich werden nun verschiedene Verfahren des maschinellen Lernens angewandt, um den Datensatz auf weitere Zusammenhänge zu untersuchen. Eine detaillierte Ausführung dieses Abschnitts ist in Anhang A gegeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Durch die Hauptkomponentenanalyse (PCA) und das Numerical Clustering konnte festgestellt werden, dass es Gruppierungen an Fahrzeugparametern gibt, die gemeinsam Einfluss auf das akustische Verhalten der Fahrzeuge ausüben. In Abbildung 81 ist visualisiert, dass beispielsweise Parameter der Fahrzeuggröße (PC1 – KW4: Nennleistung, HUB: Hubraum, LGMIN: minimales Leergewicht, LGMAX: maximales Leergewicht, TGM: zulässiges Gesamtgewicht), Parameter des **Zeitpunktes** der Fahrzeugherstellung/-zulassung (PC2 – J1ZUL: Erstzulassungsjahr, Emissionsklasse: EURO-Norm) oder der gemessene maximale **Schalldruckpegel** (PC4 – LAFMaxKorr2) jeweils Gruppierungen darstellen, die den Datensatz innerhalb der jeweiligen Gruppe ähnlich beeinflussen. Die unterschiedlichen Gruppen beeinflussen den Datensatz dabei unabhängig voneinander und bilden die in Abbildung 81 dargestellten Hauptkomponenten (principal components, PC1 bis PC4).

Abbildung 81: Baum und Ladungsmatrix unterschiedlicher Fahrzeugparameter



Links: Baumstruktur, welche die Hauptkomponenten gruppiert (PC1, PC2, PC4 – farblich hervorgehoben), rechts: Ladungsmatrix, welche die Gruppierung der Fahrzeugparameter visualisiert. LAFMaxKorr2: maximaler Schalldruckpegel (Kanal 2), KW4: Nennleistung, HUB: Hubraum, LGMIN: minimales Leergewicht, LGMAX: maximales Leergewicht, TGM: technisch zulässige Gesamtmasse, SITZM: Anzahl der Sitzplätze, J1ZUL: Jahr der Erstzulassung, Emissionsklasse: Euronorm. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

Anschließend wurde ein Random Forrest Regression Modell erstellt, welches es ermöglicht, einen Geräuschpegel durch Eingabe der Geschwindigkeit sowie der in Abbildung 81 aufgetragenen Fahrzeugparameter vorherzusagen. Die Güte dieses Modells wurde anhand einzelner Beispiele aus dem Datensatz abgeschätzt, wobei der geschätzte Vorbeifahrtpegel im Mittel um -0,3 dB abweicht. Hier ist anzumerken, dass die Evaluierung dieses Modells keinesfalls vollständig abgeschlossen ist. Abhängig von den gewählten Fahrzeugparametern und Modellparametern wie z. B. der Verzweigungstiefe verbirgt sich hier ein deutliches Verbesserungspotenzial der Vorhersagen.

6 Entwicklung des Emissionsverhaltens

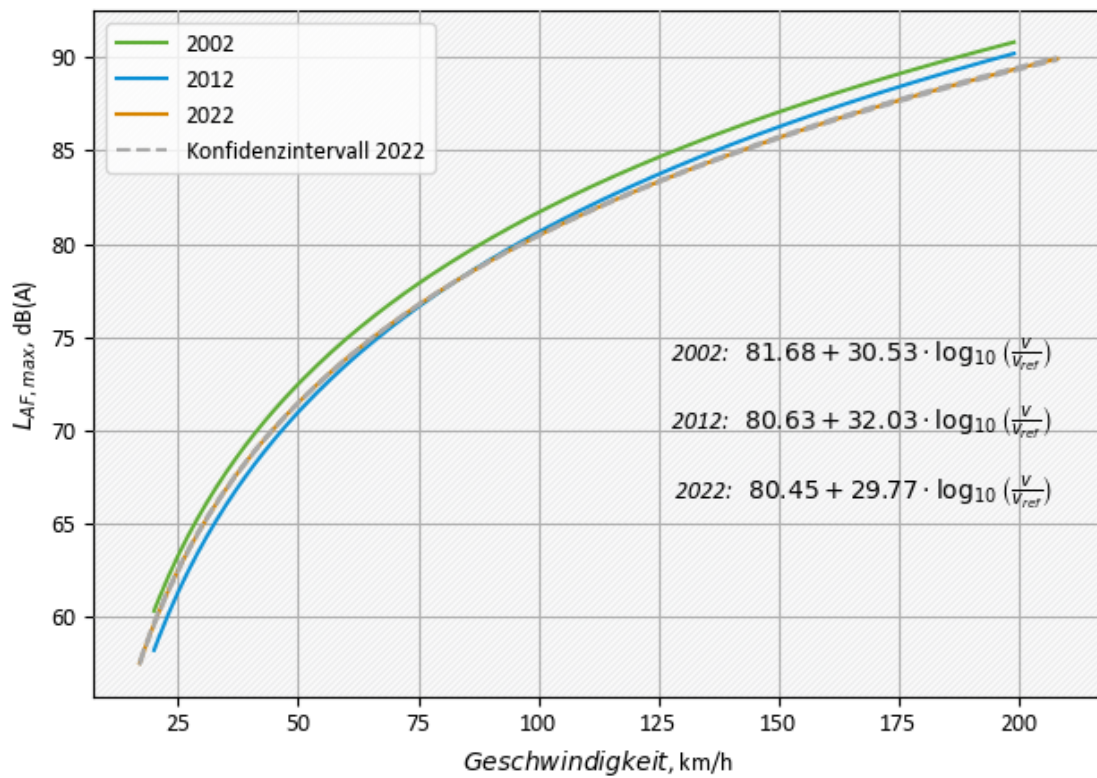
In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung des Geräuschverhaltens verschiedener Kraftfahrzeugkategorien im Vergleich zu den Vorgängerkampagnen eingegangen.

6.1 Vergleich der Geräuschemissionen von PKW

In Abbildung 82 sind die Regressionskurven der Gesamtdatensätze für PKW aus den Jahren 2002, 2012 sowie 2022 gegenübergestellt. Für das Jahr 2022 ist zusätzlich das 95-%-Konfidenzintervall eingezeichnet. Das Konfidenzintervall ist sehr eng, die Unterschiede der Kurven zueinander sind somit signifikant. Während von 2002 auf 2012 ein Rückgang des mittleren Geräuschpegels von ca. 1 dB auszumachen war, liegt die Kurve für 2022 nur leicht verkippt auf der Kurve der Vorgängerkampagne 2012. Die Veränderung der Geräuschemission in den letzten zehn Jahren ist daher als vernachlässigbar einzuschätzen. Die Verkipfung der Kurve hängt mutmaßlich mit einer unterschiedlichen Zusammensetzung der gemessenen Daten (z. B. unterschiedliche Geschwindigkeitszusammensetzungen) zusammen. Die Entwicklung des Geräuschverhaltens über die letzten 20 Jahre lässt vermuten, dass die Grenzwertverschärfung nach altem Typprüfverfahren (Veränderung zwischen 2002 und 2012) mehr Auswirkung auf den Geräuschpegel hatte als die Umstellung des Messverfahrens (seit 2016) mit anschließenden weiteren Verschärfungen¹⁶. Es ist außerdem zu beachten, dass das Geräuschminderungspotenzial von Fahrzeugen durch schärfere Regulierungen immer weiter ausgeschöpft wird. Demnach ist ein asymptotischer Verlauf hin zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch zu erwarten, welches mittlerweile den dominanten Geräuschanteil vieler PKW in einem breiten Geschwindigkeitsbereich ausmacht. Gleichzeitig lässt Abbildung 80 vermuten, dass die Grenzwertverschärfungen im Typprüfverfahren wenig Einfluss auf den realen Verkehr zu nehmen scheinen. Die geringen Unterschiede zwischen den Regressionslinien lassen demnach nur Mutmaßungen zu.

¹⁶ Analyse von Stefan Teller, SGS TÜV Saar GmbH im Rahmen der Expertenbefragung zur Entwicklung des Geräuschverhaltens, vgl. Kap. 7

Abbildung 82: Vergleich der Regressionslinien für PKW in 2002, 2012 und 2022

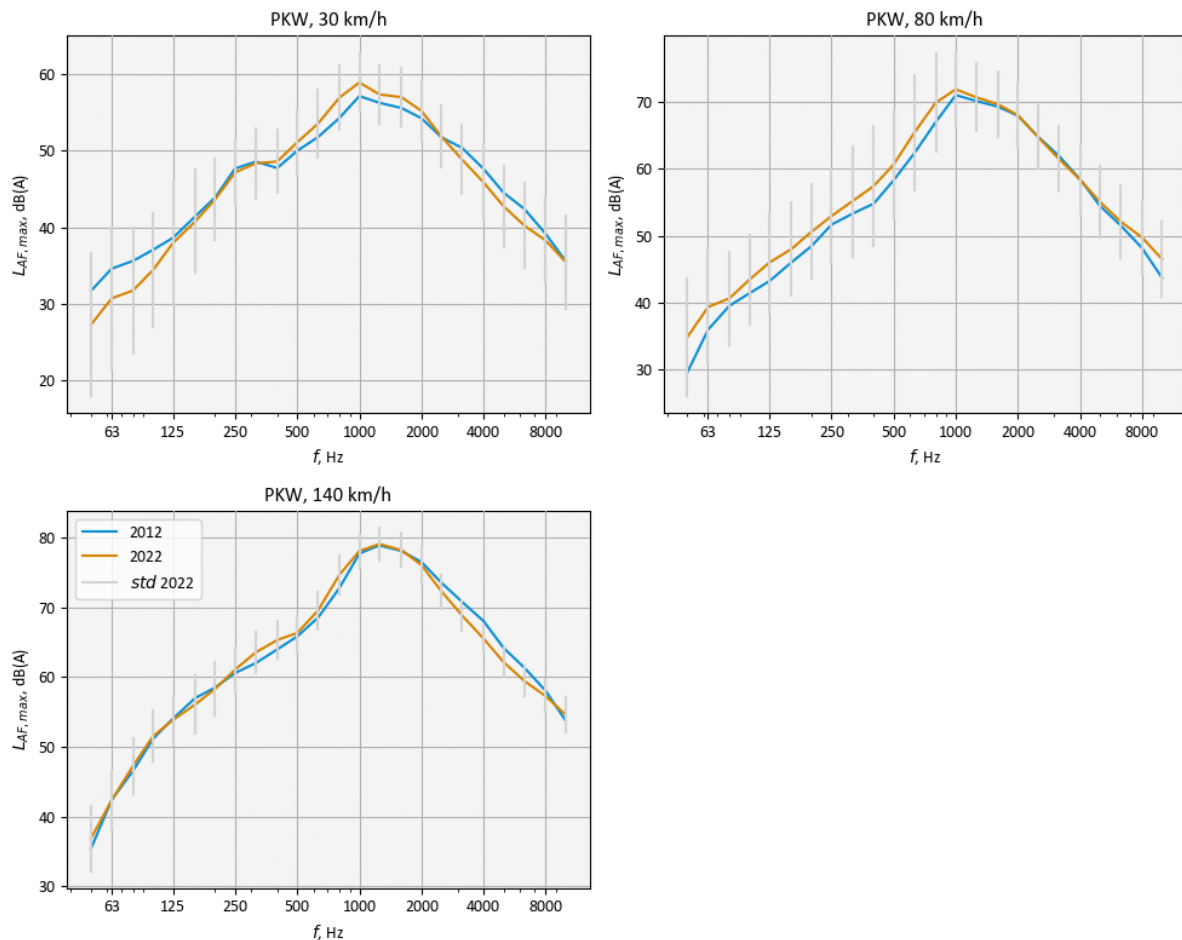


Vergleich der Regressionslinien des Gesamtdatensatzes für PKW in den Messkampagnen 2002, 2012 und 2022.

(Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

In Abbildung 83 ist zusätzlich ein Vergleich der mittleren Spektren von 2012 und 2022 für verschiedene Geschwindigkeitskategorien dargestellt. Für die Messdaten von 2022 sind zusätzlich die Standardabweichungen für jede Terzfrequenz aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Kurven sehr gut aufeinander liegen – in allen Fällen innerhalb der Standardabweichung.

Abbildung 83: Vergleich der Spektren für PKW in 2012 und 2022

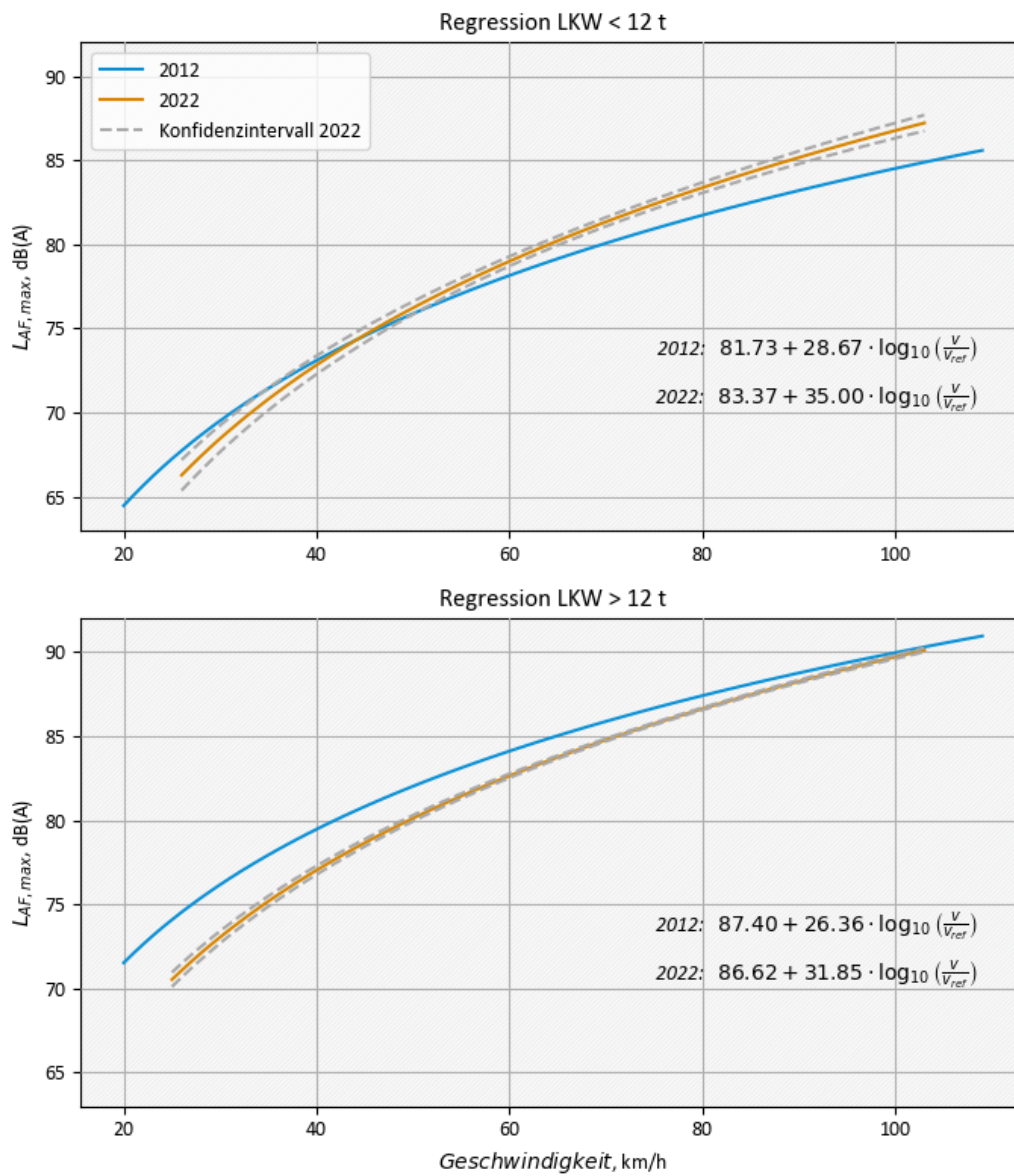


Mittlere Terzspektren des Gesamtdatensatzes für PKW in den Messkampagnen 2012 und 2022 in unterschiedlichen Geschwindigkeitskategorien. Für die aktuelle Messkampagne (2022) sind die Standardabweichungen in den Terzfrequenzen angegeben. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

6.2 Vergleich der Geräuschemissionen von LKW

Aufgrund der starken Abhängigkeit des Geräuschpegels von der Fahrzeugmasse werden im Folgenden die Regressionslinien für LKW in zwei Gewichtskategorien dargestellt, nämlich größer 12 t und kleiner 12 t, angelehnt an die Kategorien LKW2 (zweiachsig) und LKW4 (vierachsig) der ISO 11819-1:2002-05. In Abbildung 84 ist außerdem das jeweilige Konfidenzintervall für den Datensatz aus 2022 eingetragen. In beiden Gewichtskategorien ist eine Verkippung der Regressionslinie „gegen den Uhrzeigersinn“ zu erkennen. Bei LKW < 12 t zeigt sich, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten die Pegel in derselben Größenordnung liegen wie in der Messkampagne 2012 und bei höheren Geschwindigkeiten (80 km/h) um bis zu 1,6 dB höher liegen. Bei LKW > 12 t liegen die Pegel bei hohen Geschwindigkeiten grundsätzlich niedriger, wobei die Differenz mit abnehmender Geschwindigkeit zunimmt (2,5 dB bei 40 km/h und 0,8 dB bei 80 km/h).

Abbildung 84: Vergleich der Regressionslinien für LKW in 2012 und 2022

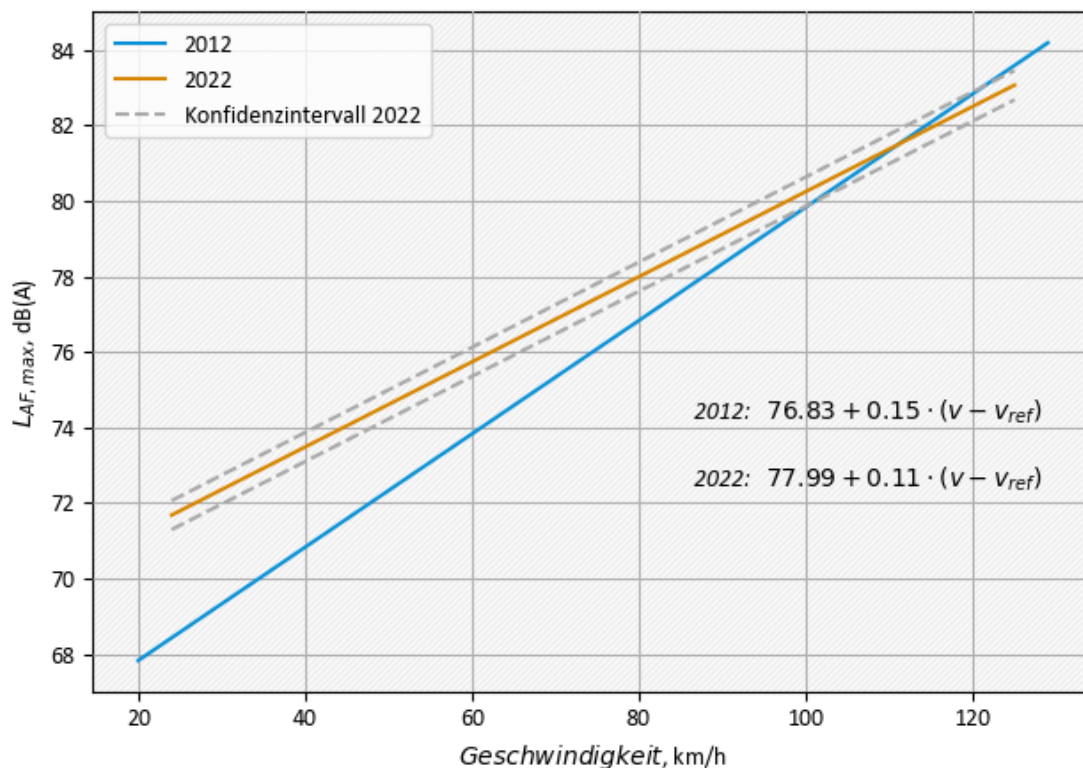


Vergleich der Regressionslinien des Gesamtdatensatzes für LKW in den Messkampagnen 2012 und 2022 in unterschiedlichen Fahrzeugmassekategorien. Für die aktuelle Messkampagne (2022) ist das 95-%-Konfidenzintervall mit aufgetragen. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

6.3 Vergleich der Geräuschemissionen von Krafträdern

Die Regression für Krafträder wurde im Jahr 2012 aufgrund der geringen Abhängigkeit von den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen nicht über logarithmische, sondern über lineare Geschwindigkeiten berechnet. Für den folgenden Vergleich wurde die Regression für Krafträder in der Messkampagne 2022 daher ebenfalls über lineare Geschwindigkeiten berechnet. Die Regression wurde so berechnet, dass der Achsenabschnitt bei der Referenzgeschwindigkeit liegt. Hier ergibt sich eine Verkippung der Regressionslinie „im Uhrzeigersinn“ im Vergleich zur Messkampagne 2012, wie in Abbildung 85 zu sehen ist. Dies führt zu einer Pegelerhöhung für die Messdaten von 2022, welche bei 50 km/h ca. 2,3 dB beträgt. Hier ist festzuhalten, dass die Datengrundlage vor zehn Jahren noch größer und damit aussagekräftiger war als im aktuellen Datensatz. Damals wurden knapp 580 Motorräder erfasst, wobei in der jetzigen Messkampagne nur knapp 350 Krafträder inklusive der Kennzeicheninformation gemessen werden konnten. Zusätzlich ist bei den gemessenen Motorrädern der tatsächliche Fahrzustand schwer zu beurteilen. Eine leichte Tendenz zur Beschleunigung wirkt sich bei den Motorengeräuschdominanten Krafträdern durch eine signifikante Erhöhung des Geräuschpegels aus. Hinzu kommt, dass die Straße an MP25 leicht bergauf verlief. Da der Einfluss auf die Regressionslinie bei niedrigeren Geschwindigkeiten hauptsächlich durch Datenpunkte von MP25 hervorgerufen wird, wird der Pegel hier möglicherweise überschätzt. Somit sollten besonders die absoluten Werte der Pegeldifferenzen mit Vorsicht behandelt werden.

Abbildung 85: Vergleich der Regressionslinien für Krafträder in 2012 und 2022



Vergleich der Regressionslinien des Gesamtdatensatzes für Krafträder in den Messkampagnen 2012 und 2022. Für die aktuelle Messkampagne (2022) ist das 95%-Konfidenzintervall mit aufgetragen. (Quelle: eigene Darstellung, Müller-BBM Industry Solutions GmbH)

7 Aussage zum zukünftigen Geräuschverhalten und Ausblick

7.1 Expertenaussagen zur Veränderung der Fahrzeugflotte in Deutschland

Um auf Basis der gefundenen Erkenntnisse aus der durchgeführten Messkampagne auf das zukünftige Geräuschverhalten extrapolieren zu können, wurde versucht, die aktuell relevantesten Trends in der Automobilindustrie zu identifizieren. Wenn sich die identifizierten Trends in Veränderungen der technischen Fahrzeugdaten niederschlagen und sich aus den vorangegangenen Analysen signifikante Zusammenhänge der technischen Fahrzeugdaten zur Geräuschemission ergeben, dann könnten die zukünftigen Geräuschemissionen bzw. zumindest deren Veränderung zum jetzigen Stand geschätzt bzw. prognostiziert werden. Hierzu wurden Experten aus der Fahrzeughomologation vom Unternehmen SGS TÜV Saar GmbH befragt. Sie sollten die stärksten Trends, die einen Einfluss auf die Geräuschentwicklung haben könnten, zusammenfassen.

Folgende Punkte wurden benannt:

- ▶ Die Anzahl der Elektrofahrzeuge wird signifikant zunehmen.
- ▶ Die im langsamen Verkehr dominanten Motorengeräusche werden abnehmen. Die Geräuschemissionen werden dann auch im niedrigen Geschwindigkeitsbereich von den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen und von den akustischen Warnsystemen AVAS dominiert.
- ▶ Um die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu erhöhen, wird aktuell intensiv an der Aerodynamik von Fahrzeugen gearbeitet. Dies kann dazu führen, dass die aeroakustischen Fahrzeuggeräusche, die bei hohen Geschwindigkeiten dominant sind, zurück gehen. Damit werden die Reifen-Fahrbahn-Geräusche auch bei hohen Geschwindigkeiten zur dominanten Schallquelle.
- ▶ Das Leergewicht und die zulässige Gesamtmasse der PKW wird zunehmen, einerseits, da immer aufwändigere Sicherheitssysteme in den Fahrzeugen eingesetzt werden und andererseits (und viel relevanter) da die Akkus der Elektrofahrzeuge einen hohen Gewichtsanteil ausmachen. Im Moment sind die Marketingargumente von Elektrofahrzeugen häufig reichweitenorientiert, sodass von einer weiteren Steigerung der Akkukapazität ausgegangen wird.
- ▶ Durch das höhere PKW-Fahrzeuggewicht ist nicht nur die statische Reifenlast höher, sondern auch die Traglast (und damit Steife) und die Breite der Reifen wird zunehmen. Als Ergebnis der höheren Fahrzeuggewichte könnten zudem härtere Gummimischungen eingesetzt werden, um den Reifenabrieb in Grenzen zu halten.
- ▶ Bei LKW ist nicht von einer Steigerung der Fahrzeuggewichte auszugehen – hier gibt es keine Planungen, über die bekannten Grenzen (12 t, 40 t) hinauszugehen.

- Die Reduzierung der Grenzwerte für die Fahrzeuggeräusche auf 68 dB(A) nach Phase 3, die am 1. Juli 2024 in Kraft tritt, könnte mittelfristig die Emission von Einzelfahrzeugen leicht verringern.
- Langfristig (größer zehn Jahre) könnte autonomes Fahren zu einer Verstetigung des Verkehrsflusses beitragen und damit zu einer Verringerung der Schallemissionen im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich. Dies hätte zwar keinen direkten Einfluss auf SPB-Messungen, wie sie hier durchgeführt wurden, könnte aber im Realverkehr einen geringen Einfluss zeigen.

7.2 Verschneidung der Expertenaussagen mit den Erkenntnissen aus den Fahrzeugmessungen

Im Folgenden werden die gesammelten Erkenntnisse mit den Ergebnissen der Analysen aus der aktuellen Messkampagne verschnitten.

Durch die Zunahme der Elektrofahrzeuge ist davon auszugehen, dass sich der mittlere Geräuschpegel der Fahrzeuge leicht senken wird. Die Messdaten zeigen, dass Elektrofahrzeuge im gesamten Geschwindigkeitsbereich um ca. 1 dB leiser sind als Verbrenner. Das Potenzial der Geräuschminderung durch die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte ist damit zwar vorhanden, hält sich aber in Grenzen. Im aktuellen Datensatz sind die gemessenen Elektrofahrzeuge aufgrund der Kapazitätsgrenzen der Batterien noch sichtbar Gewichts-optimiert (vgl. Abbildung 28). Die steigende Gewichtszunahme und dadurch resultierende, eventuell härtere Gummimischungen bei Reifen sowie die Vergrößerung der Reifenbreite wird den abnehmenden Fahrzeuggeräuschen zukünftig entgegenwirken, sodass der gemessene Geräuschminderungseffekt vermutlich nahezu aufgehoben werden wird. Auch bei Verbrennern wird das Fahrzeuggewicht zunehmen, da die Tendenz hin zu größeren und sichereren Fahrzeugen geht. Dies führt auch hier zu einer relativen Zunahme der Reifen-Fahrbahn-Geräusche.

Zur Verstetigung des Verkehrsflusses können wir auf Basis der aktuellen Messdaten keine konkrete Aussage zur Veränderung der Schallemissionen treffen, da keine beschleunigten Vorbeifahrten gemessen wurden. Auf Basis der Vorgängeruntersuchung kann festgestellt werden, dass die Emissionen beschleunigter Vorbeifahrten höher liegen. Daher könnte eine Verstetigung des Verkehrsflusses vor allem in der Kombination mit Verbrennungsmotoren zu einer Verringerung der Emissionen führen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass diese Kombination (Verbrennungsmotor und autonomes Fahren) in der Zukunft keine hohe Praxisrelevanz haben wird Europäisches Parlament.

Abschließend lässt sich die Aussage formulieren, dass Fahrzeuggeräusche schon jetzt und vor allem in Zukunft immer mehr vom Rollgeräusch des Reifen-Fahrbahn-Kontakts dominiert sind – und zwar in immer niedrigeren Geschwindigkeitsbereichen. Um langfristig die Lärmbelastung durch Fahrzeuggeräusche weiter abzusenken, müssen demnach nicht nur die Automobilhersteller, sondern auch Reifenhersteller und der Straßenbau zusammenarbeiten, um Reifen-Fahrbahn-Geräusche zu reduzieren, ohne dabei die Verkehrssicherheit zu beeinträchtigen.

8 Quellenverzeichnis

Normen:

DIN EN ISO 11819-1:2002: Akustik – „Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche. Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren“. 2002.

DIN EN ISO 11819-2:2017: Akustik – „Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren“. 2017.

DIN EN ISO 13473:2004 – „Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen“, Teil 1 – 3. 2004.

ISO/TS 11819-3: Acoustics – “Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres”. 2017.

ISO/TS 13471-1: Acoustics – “Temperature influence on tyre/road noise measurement. Correction for temperature when testing with the CPX method”. 2017.

Bundesminister für Verkehr, „Verfahren zur Messung der Geräuschemission von Straßenoberflächen (GESTrO)“. Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 16/1992, Bonn. 1992.

FGSV, „RLS-19: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen“. FGSV 052. 2019.

FGSV, „TP KoSD-19: Technische Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten“. FGSV 053. 2019.

FGSV, Arbeitspapier – „Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken“. FGSV 442. 2013.

DIN EN ISO 13473-1:2021 – „Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe (ISO 13473-1:2019, korrigierte Fassung 2021-06); Deutsche Fassung EN ISO 13473-1:2019“. 2021.

DIN ISO/TS 13473-4:2009 – „Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 4: Spektralanalyse von Oberflächenprofilen (ISO/TS 13473-4:2008)“. 2009.

Monografien:

M. Ertsey, M. Männel, H. Fastl: „Zur autonomen Messung von Vorbeifahrgeräuschen“. Fortschritte der Akustik –Daga 2016 (Aachen 2016) Bad Honnef: DPG-GmbH, 2016.

M. Männel, M. Ertsey: “Technological and market-oriented development of measuring systems”. Proceedings of Euronoise 2018, Hersonissos, Crete, 2018.

N. Kirchhoff, M. Männel: “Advancements in autonomous detection of high noise emitters in road traffic”. Proceedings of Internoise 2022, Glasgow, 2022.

Internetadresse:

Europäisches Parlament, „<https://www.europarl.europa.eu/portal/de>“, 03 November 2022. [Online]. Available:

https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20221019ST044572/verkaufsverbot-fur-neue-benzin-und-dieselfahrzeuge-ab-2035-was-bedeutet-das?at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=DSA&at_goal=TR_G&at_audience=&at_topic=Emissions&gclid=Cj0KCQjwr82iBhCuARIsAO0EAZweKKOn011rU1UxP0kygnQ0IQZVsIW8g4GIU6ocsAx0ItHzcE5C1AMaApUPEALw_wcB. [Zugriff am 16 Januar 2023].

Statista, „<https://de.statista.com>“, 08 Mai 2023.

<https://de.statista.com/themen/608/elektromobilitaet/#topicOverview>. [Zugriff am 08 Mai 2023].

A Anhang – KI-Verfahren

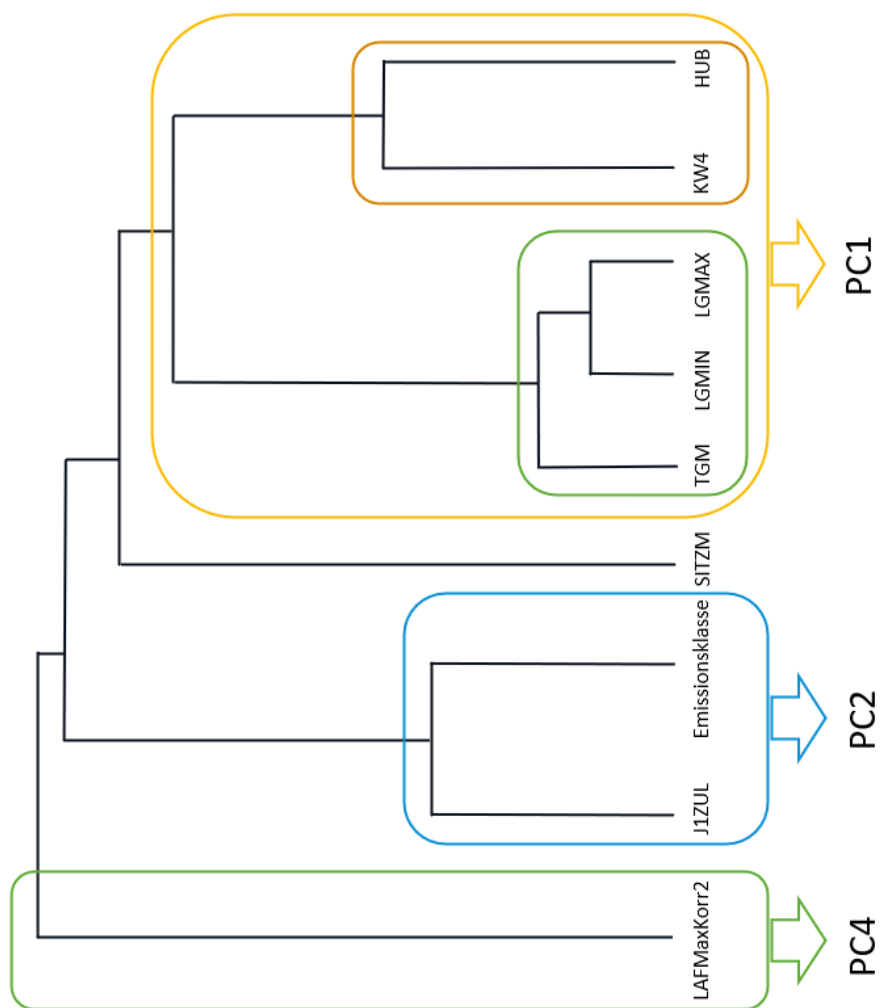
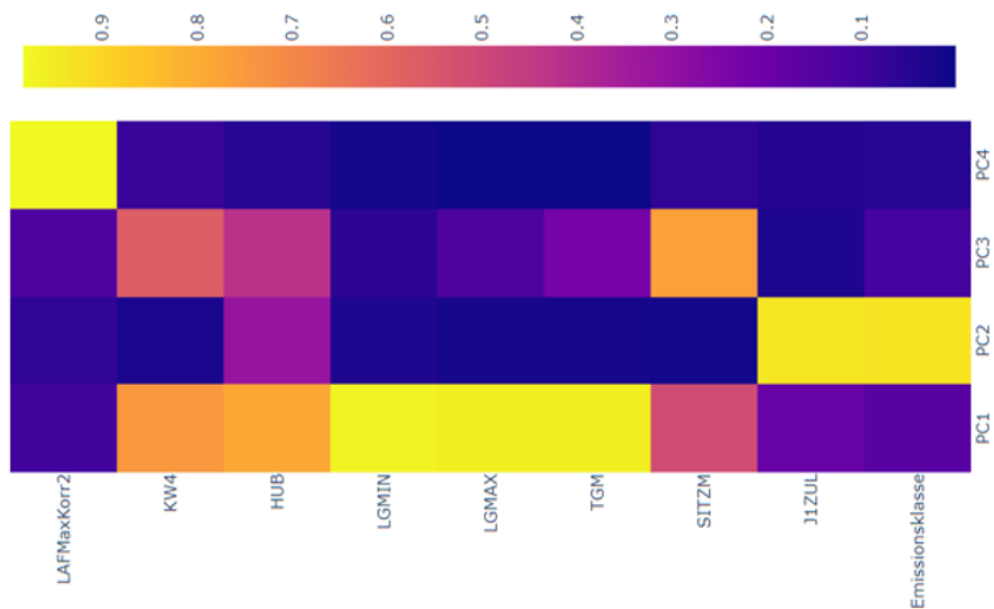
Im Hauptteil des Berichts wurde der Einfluss der Fahrzeugparameter mittels statistischer Verfahren, insbesondere der linearen Regression, untersucht. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren des maschinellen Lernens angewandt, um den Datensatz auf weitere Zusammenhänge zu untersuchen.

A.1 Principal Component Analysis und Numerical Clustering

Mittels der Hauptkomponentenanalyse (kurz: PCA, Principal Component Analysis) können Zusammenhänge einzelner Parameter des Datensatzes festgestellt werden, die auf den ersten Blick nicht eindeutig sind. Neben offensichtlichen Abhängigkeiten (wie z. B. des Vorbeifahrtpegels von der Fahrzeuggeschwindigkeit) gibt es weniger offensichtliche Abhängigkeiten, z. B. wie sich Leistung, Masse oder Emissionsklasse des Fahrzeugs zueinander verhalten. Aus mehr als 70 erfassten Parametern pro Fahrzeug wurden deshalb einige charakterisierende Subgruppen an Parametern gesammelt und mittels der PCA analysiert. In Abbildung A 1 ist die Gruppierung einer Auswahl an Parametern für PKW in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 80 km/h und 85 km/h dargestellt. Der Geschwindigkeitsbereich wurde eng gewählt, damit die dominante Abhängigkeit des Vorbeifahrtpegels von der Geschwindigkeit keinen Einfluss nimmt. Bei Geschwindigkeiten um 80 km/h wurden zudem die meisten Fahrzeuge gemessen. Die gewählte Gruppierung an Fahrzeugparametern wurde durch Vorversuche ausgesucht. Demnach liegt die Auswahl möglicherweise nicht im Optimum hinsichtlich der Möglichkeit den Datensatz zu beschreiben – eine andere Auswahl der Gruppierung wäre ohne weiteres möglich. Folgende Parameter wurden gewählt:

- ▶ *LAFMaxKorr2*: der nach ISO 11819-1 temperatur- und höhenkorrigierte Maximalpegel der Vorbeifahrt an Kanal 2 (3 m Messhöhe)
- ▶ *KW4*: die Nennleistung
- ▶ *HUB*: der Hubraum
- ▶ *LGMIN*: das minimale Leergewicht
- ▶ *LGMAX*: das maximale Leergewicht
- ▶ *TGM*: die zulässige Gesamtmasse
- ▶ *SITZM*: die Anzahl der Sitzplätze
- ▶ *J1ZUL*: das Jahr der Erstzulassung
- ▶ *Emissionsklasse*: die EURO-Norm (von EURO4 bis EURO6)

Abbildung A 1: Visualisierung der Zusammenhänge verschiedener Fahrzeugparameter (PCA)



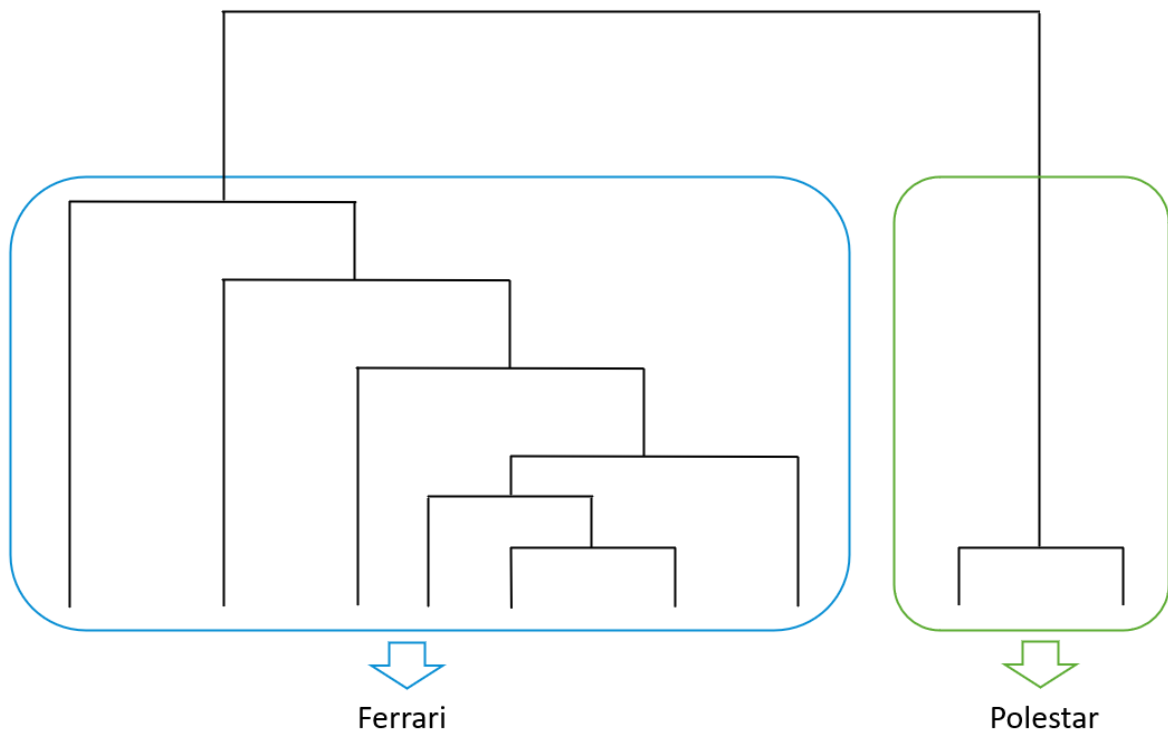
Veranschaulichung der Beiträge der verschiedenen Hauptkomponenten (PCs) auf die Fahrzeugparameter. Oben: Ladungsmatrix, unten: Gruppierung der Fahrzeugparameter als Baumstruktur mittels Numerical Clustering.

Die PCA findet im mehrdimensionalen Raum der genannten Parameter die maximale Varianz in orthogonalen Richtungen und führt somit eine Drehung und Streckung des Koordinatensystems durch, sodass die neu erlangten Raum-Richtungen in Richtung der maximalen Varianz zeigen. Diese neuen Einheitsvektoren werden Hauptkomponenten (kurz: PCs, Principal Components) genannt. Die ursprünglichen Datenpunkte können dann als Linearkombinationen der Hauptkomponenten beschrieben werden. Im oberen Teil der Abbildung A 1 sind die Faktoren der Linearkombinationen zu jedem der oben genannten Parameter farblich als Ladungsmatrix dargestellt. Nach der PCA gibt es genauso viele Dimensionen wie zuvor (in diesem Fall die Anzahl der Parameter: 9), jedoch ist der Informationsgehalt der neu erlangten Raumrichtungen (Einheitsvektoren) in der Regel höher als der einzelner Parameter. Deshalb sind in der Abbildung nur vier Hauptkomponenten dargestellt. Die restlichen fünf Hauptkomponenten beschreiben nur einen Bruchteil an zusätzlicher Information und können verworfen werden. Durch die farbliche Markierung wird ersichtlich, dass gewichtsabhängige Parameter wie *LGMIN*, *LGMAX* und *TGM* zusammenhängen und somit gemeinsam die Varianz in Richtung PC1 erklären. Die Parameter *KW4* und *HUB* (Leistung und Hubraum) sind bedingt ebenfalls von diesen Parametern abhängig, haben jedoch auch einen gewissen Anteil in PC3. Das Jahr der Erstzulassung und die Emissionsklasse korrelieren miteinander und bestimmen die Raumrichtung in PC2. Zuletzt bestimmt der Schalldruckpegel *LAFMaxKorr2* in dieser Gruppierung an Parametern allein die vierte Komponente PC4¹⁷. Um die Aufteilung der Parameter auf die PCs zu verdeutlichen ist in der unteren Grafik der Abbildung A 1 das Ergebnis eines numerischen Sortierverfahrens (Numerical Clustering) als Baumdiagramm dargestellt. Dieses Verfahren ermöglicht es, Datenpunktwolken automatisiert in unterschiedliche Gruppierungen zu clustern. Das Clustering wurde auf die Faktoren der Linearkombinationen (entsprechend den Farben im nebenstehenden Diagramm) angewendet. Die Äste des Baums veranschaulichen die Zugehörigkeit der Parameter untereinander.

Das Numerical Clustering kann auch auf einzelne Parameter von selektierten Datenpunkten angewendet werden. So wurden in Abbildung A 2 die (seltenen) Vorbeifahrten der Hersteller Ferrari und Polestar dem Verfahren unterzogen. So unterscheidet das Verfahren deutlich zwischen den unterschiedlichen Geräuschcharakteristiken der Fahrzeuge dieser beiden Hersteller, da die zwei Hauptäste des Baumdiagramms die Hersteller voneinander trennen. Der blau hinterlegte Teil im Ferrari-Ast resultiert aus der Vorgabe, dass der Algorithmus drei Cluster bilden sollte. Der „unterschiedlichste“ der gemessenen Ferraris ist somit nochmal farblich herausgestellt.

¹⁷ In einer anderen Gruppierung, welche zusätzlich die Geschwindigkeit beinhaltet, teilen sich Pegel und Geschwindigkeit eine Komponente. Diese PC liegt dann genau in Richtung der linearen Regressionsgeraden.

Abbildung A 2: Numerical Clustering ausgewählter Vorbeifahrt-Datenpunkte

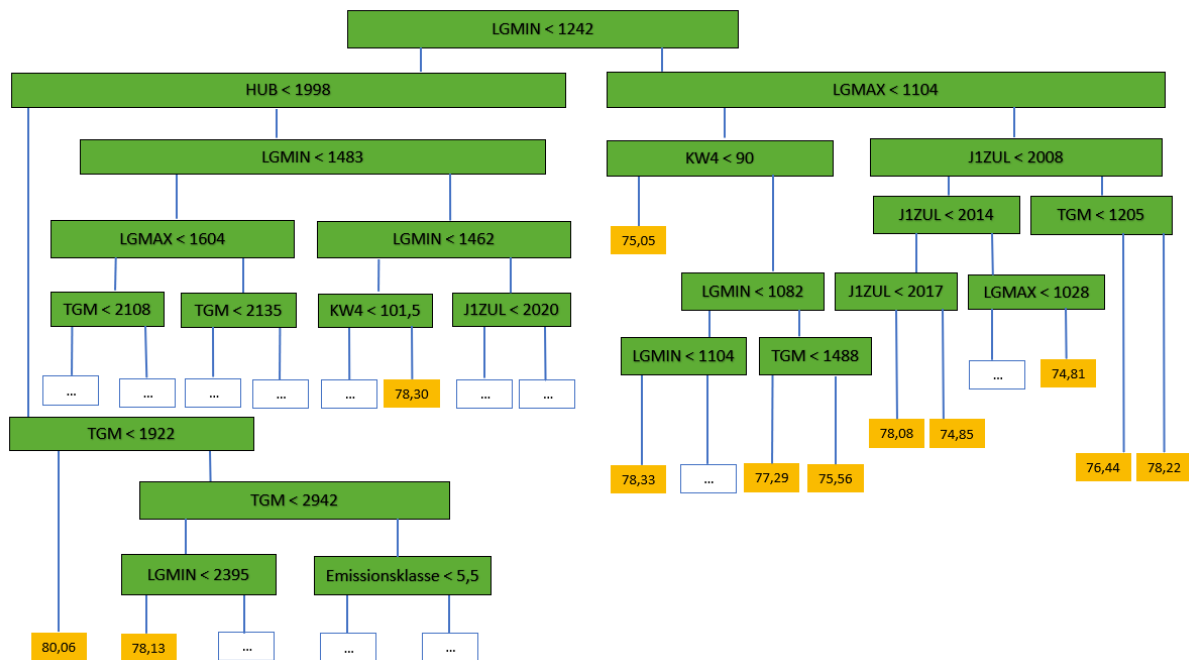


Beispiel der Gruppierung einiger Fahrzeuge unterschiedlicher Eigenschaften/Hersteller als Baumstruktur mittels Numerical Clustering.

A.2 Random Forrest Regression

Die PCA ist ein mehrdimensionales statistisches Verfahren, welches Zusammenhänge im Datensatz erkennbar macht, jedoch limitiert ist, um Vorhersagen zu treffen. Um mithilfe des maschinellen Lernens ein Modell zu entwickeln, das die Vorbeifahrtpegel von diversen Fahrzeugen vorhersagen könnte, wird die sogenannte Random Forrest Regression herangezogen. Dieses Modell basiert auf einem Konglomerat an Entscheidungsbäumen, welche die „Wichtigkeit“ gegebener Parameter mithilfe von Ja/Nein- bzw. größer/kleiner-Fragen herausstellt. Am Ende der Äste, der sogenannten Blätter, befindet sich dann der Ausgabewert. Ein beispielhafter Entscheidungsbaum ist in Abbildung A 3 dargestellt. Hier sind als Ausgabewerte Schalldruckpegel in dB(A) angegeben. Die angegebenen Abkürzungen in den Ästen folgen dem Prinzip in Kapitel A.1.

Abbildung A 3: Random Tree



Beispiel eines „Random Tree“. Grüne Kästen sind Verzweigungen/Entscheidungsstellen, gelbe Kästchen sind Blätter/ Endergebnisse, weiße Kästchen sind Aussparungen, bei denen die Baumstruktur noch tiefer geht, jedoch nicht mehr dargestellt ist.

Für die Modellbildung wird ein Trainings- und ein Testdatensatz benötigt. Hierfür wird der gegebene Datensatz zufällig aufgeteilt, wobei das Modell mit einem größeren Teil trainiert wird, um dann die Güte des Modells mit einem unabhängigen kleineren Teil der Daten testen zu können. Der Datensatz wird in sogenannte *features* und *labels* unterteilt. Die *features* beschreiben jene Parameter, welche einen starken Einfluss auf den vorherzusagenden Ausgabeparameter (Vorbeifahrtpiegel) haben. Zur Auswahl der *features* können die Erkenntnisse aus der Hauptkomponentenanalyse und aus den statistischen Analysen beitragen. Die *labels* sind die *gemessenen Werte* des Ausgabeparameters. Als label wurde der Parameter *LAFMaxKorr2* gewählt, also der nach ISO 11819-1 korrigierte maximale Vorbeifahrtpiegel an Kanal 2 (Messhöhe 3 m). Als *features* wurden verschiedene Kombinationen an Parametern untersucht, wobei sich herausgestellt hat, dass die Geschwindigkeit und Parameter der Fahrzeugmasse (wie Leergewicht oder zulässige Gesamtmasse) die entscheidendsten Eigenschaften sind. Dieses Ergebnis deckt sich somit mit dem der Hauptkomponentenanalyse. Im nachfolgenden Beispiel wurden folgende Parameter als *features* gewählt:

Geschwindigkeit, Nennleistung, Hubraum, minimales Leergewicht, maximales Leergewicht, zulässige Gesamtmasse, Anzahl der Achsen, Anzahl der Antriebsachsen, Anzahl der Sitzplätze, Jahr der Erstzulassung und Emissionsklasse

Hiermit wurde ein lineares Random-Forrest-Regression-Modell erstellt, welches aus zehn Bäumen besteht, die im Mittel 1975 Blätter besitzen und eine mittlere Tiefe von 28,5 Verzweigungen aufweisen. Die Anzahl der Bäume ist für die Modellbildung frei wählbar. Ab einer gewissen Anzahl ist jedoch davon auszugehen, dass das Modell nicht mehr merklich verbessert wird. Mit zehn Bäumen wurde dieser Zustand erreicht. An dieser Stelle wird nicht weiter auf die verschiedenen Gütekriterien des Modells eingegangen. Stattdessen werden anhand vier¹⁸ verschiedener Datenpunkte (des Testdatensatzes) die durch das Modell vorhergesagten Schalldruckpegel mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Nachfolgende Tabelle A 1 zeigt die Ergebnisse.

Tabelle A 1: Vergleich der gemessenen mit den durch das Modell vorhergesagten Maximalpegel unterschiedlicher Fahrzeuge

Eingabe Datenpunkt			Ausgabe	
Hersteller, Marke	Geschwindigkeit, km/h	Schalldruckpegel, dB(A)	Geschätzter Schalldruckpegel, dB(A)	Differenz, dB
VW Caddy	50	73,2	72,0	1,2
IVECO (Transporter)	47	69,9	70,3	-0,4
Renault Kangoo Rapid	34	64,3	65,8	-1,5
Mercedes Sprinter	115	82,9	83,2	-0,3

Diese Beispiele zeigen, dass das Modell eine gute Vorhersage treffen kann, die in der Größenordnung der Messgenauigkeit bei den durchgeführten Feldmessungen für Einzelvorbeifahrten liegt (vgl. im Hauptteil Kapitel 4.3.1 – „Akustisches Verhalten bei Mehrfachvorbeifahrten“).

Ein solches Modell könnte beispielsweise verwendet werden, um den Einfluss der Veränderung von Fahrzeugparametern auf das Vorbeifahrtgeräusch von Einzelvorbeifahrten zu schätzen oder den Einfluss der Veränderung von Fahrzeugflotten auf das Gesamtemissionsverhalten zu prognostizieren. Wichtig ist in diesem Fall zu berücksichtigen, dass die Modellgüte in der Regel durch mehr Datensätze und vor allem die kontinuierliche Einbeziehung neuer Daten deutlich verbessert werden kann.

¹⁸ Da die Ergebnisse aus technischen Gründen per Hand abgeglichen werden mussten, muss hier auf einen statistisch signifikanten Vergleich verzichtet werden.