

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

Studie Lärmdisplay Bulle

Untersuchungsbericht: Empa-Nr. 5214.026020
Auftrag: Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 20

Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangslage und Auftrag
- 2 Situation
- 3 Wetterdaten
- 4 Auswertung der Topo-DD-Lärm Daten
- 5 Diskussion

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Empa

Dübendorf, 10.03.2021

Projektleiter:



Dr. Kurt Heutschi

Abteilung Akustik / Lärmminderung

Abteilungsleiter:



Dr. Jean Marc Wunderli

Leiter Abteilung Akustik / Lärmminderung

1 Ausgangslage und Auftrag

Das BAFU und der TCS prüfen Möglichkeiten zur Sensibilisierung von Fahrzeugführerinnen und -führern hinsichtlich des von ihnen verursachten Lärms bei hochtouriger Fahrweise im siedlungsnahen Gebiet. Eine Möglichkeit bieten Lärmdisplays, die unmittelbar ein allfälliges Überschreiten einer Schallpegelschwelle anzeigen. Im August 2020 beauftragte das BAFU den TCS und die Firma INNOLUTIONS sowie die Abt. Akustik / Lärminderung der Empa mit der Durchführung eines entsprechenden Experiments in Bulle.

Die drei Projektpartner teilten sich die Aufgaben wie folgt:

- TCS: Koordination, Standortevaluation und Kommunikation
- INNOLUTIONS: Bereitstellung, Installation, Betrieb und Datenexport der Mess- und Anzeigeräte Topo-DD-Lärm
- Empa: Analyse und Auswertung der Topo-DD-Lärm-Messdaten sowie Berichterstattung

2 Situation

2.1 Funktionsweise des Mess- und Anzeigesystems Topo-DD-Lärm

Das Messsystem Topo-DD-Lärm von INNOLUTIONS wird am Strassenrand aufgestellt und generiert Fahrzeugvorbeifahrtsprotokolle. Den Ereignissen wird eine Fahrzeugkategorie, eine Geschwindigkeit und ein akustischer Maximalpegel zugeordnet. Das Messmodul kann um eine Anzeigeeinheit erweitert werden, die gestützt auf die Informationen Geschwindigkeit und Maximalpegel eine "Bewertung" der Vorbeifahrt vornimmt und der das Fahrzeug führenden Person unmittelbar nach der Vorbeifahrt rückmeldet:

- **Danke:** Wenn sowohl die Geschwindigkeit als auch der Maximalpegel unter den vorgegebenen Schwellwerten liegen
- **Langsam!:** Wenn die Geschwindigkeit über und der Maximalpegel unter dem entsprechenden Schwellwert liegt
- **Leise!:** Wenn der Maximalpegel über dem Schwellwert liegt

In der hier eingesetzten Konfiguration wurde der Geschwindigkeitsschwellwert auf 50 km/h, der Maximalpegelschwellwert auf 83 dB gesetzt.

2.2 Geometrie der Installationen

Für den hier beschriebenen Versuch wurden von INNOLUTIONS in Bulle zwei temporäre Messpunkte M1 (signalisierte Geschwindigkeit 50 km/h) und M2 (signalisierte Geschwindigkeit 50 km/h) (Abbildung 1 und Abbildung 2) zur akustischen Beobachtung der Vorbeifahrten in Richtung Bulle (Osten) eingerichtet. Bei beiden Messpunkten ist ein gelber Radstreifen markiert, dessen Abstand zum Strassenrand variiert. Ohne Gegenverkehr können die Fahrzeuge diesen Streifen respektieren, sich kreuzende Personenwagen oder grössere Fahrzeuge müssen möglicherweise auf den Streifen ausweichen. Damit ergibt sich eine grössere Unsicherheit hinsichtlich des Abstandes d zwischen Mikrophon und der Mitte des fahrenden Fahrzeugs. Beim Messpunkt M1 liegt d zwischen ca. 3.5 und 5.5 m, bei Messpunkt M2 kann d zwischen 2.5 und 4.0 m geschätzt werden. An der Position des Messpunkts M2 wurde das Display D installiert, mit welchem die "Bewertung" der Vorbeifahrt am Messpunkt M1 unmittelbar rückgemeldet wurde. Von besonderem Interesse ist die Frage, ob sich bei aktiviertem Display am Messpunkt M2 eine Verhaltensänderung beobachten lässt. Die Mikrophonhöhe betrug an beiden Messpunkten einheitlich 90 cm bezogen auf die Strassenoberfläche.

2.3 Phasen des Versuchs

Der ganze Versuch setzte sich aus drei direkt aufeinanderfolgenden Phasen zusammen:

- Phase 1:** Betrieb der Messmodule ohne Display, vom 03.09.2020 bis 11.09.2020
Phase 2: Betrieb der Messmodule mit Display D , vom 11.09.2020 bis 25.09.2020
Phase 3: Betrieb der Messmodule ohne Display, vom 25.09.2020 bis 04.10.2020

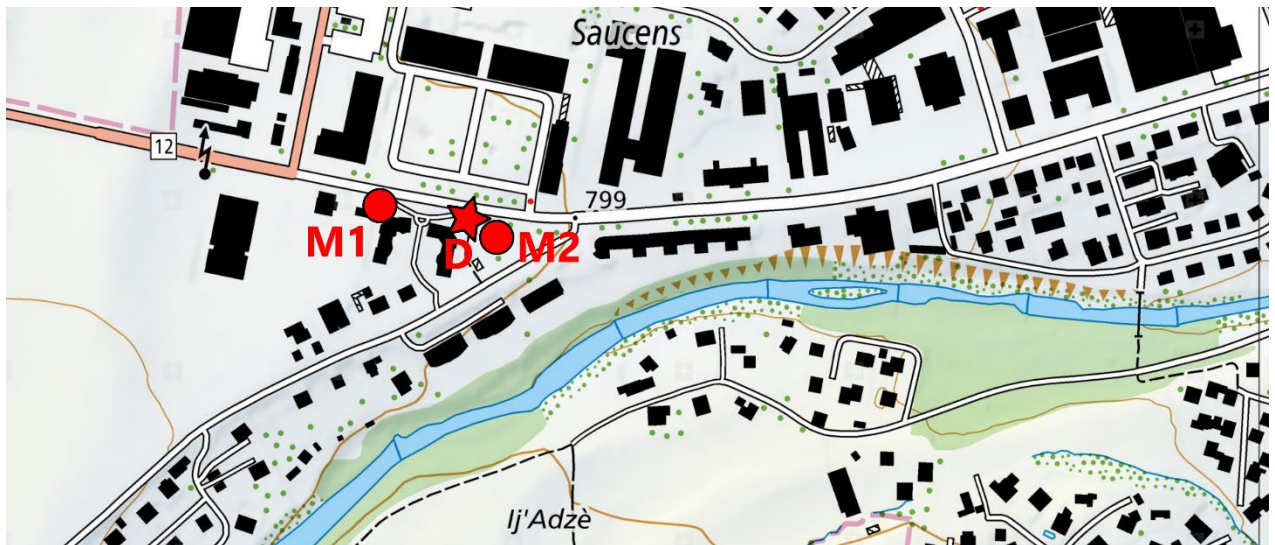


Abbildung 1: Situation der temporären Installation der Messpunkte M1 und M2 sowie des Lärmdisplays D in Bulle. Beide Messpunkte liegen in einer Tempo 50 Zone. Karte: geodata © swisstopo



M1



M1



M2



M2

Abbildung 2: Fotos der beiden Messstellen M1 und M2 (Aufnahmen Remo Schiltknecht, INNOLUTIONS).

3 Wetterdaten

Um mögliche Wettereinflüsse auf das Fahrverhalten bzw. die akustischen Emissionen einschätzen zu können, werden in Abbildung 3 die Wetterdaten der automatischen MeteoSchweiz-Station Marsens dargestellt.

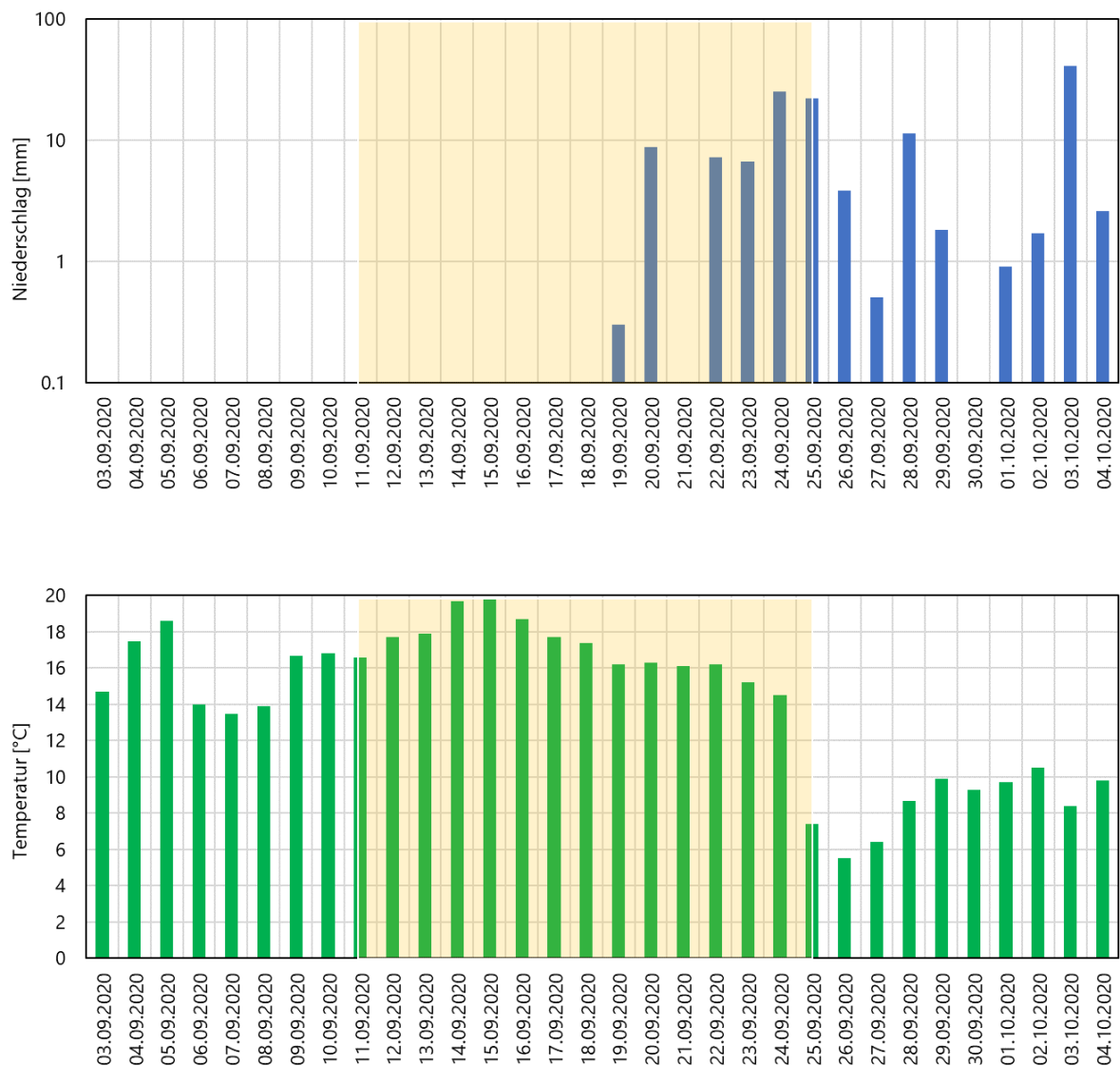


Abbildung 3: Auf jeweils 24 h bezogene Niederschlagsmenge (oben) und Lufttemperatur (unten) gemäss Daten von MeteoSchweiz für die Station Marsens. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display.

4 Auswertung der Topo-DD-Lärm Daten

4.1 Protokoll des Messsystems

Die Dokumentation eines Ereignisses umfasst einen Zeitstempel, eine Geschwindigkeitsangabe, die Richtungsinformation, die Fahrzeuglänge und daraus abgeleitet eine Zuordnung zu einer Fahrzeugklasse sowie den akustischen Maximalpegel der Vorbeifahrt (Tabelle 1).

Geschwindigkeit (km/h)	Uhrzeit	Datum	Richtung	Fahrzeug- länge	Fahrzeug- klasse	Fahrzeugklassen- Bezeichnung	Schall (dB)
29	13:59:18	09.09.2020	1	44	7	Pkw	62
40	13:59:22	09.09.2020	1	23	10	Krad	68
37	13:59:26	09.09.2020	1	43	7	Pkw	63
44	13:59:31	09.09.2020	1	40	7	Pkw	66
40	13:59:53	09.09.2020	1	42	7	Pkw	66

Tabelle 1: Auszug aus einem Einzelereignis-Datenfile (Pkw = Personenwagen, Krad = Motorrad, PkwA = Personenwagen mit Anhänger).

Das Augenmerk liegt hier primär auf den Personenwagen *Pkw*, die als Klasse 7 eingeordnet werden. Ergänzend wurden aber auch Auswertungen für Motorräder *Krad* (Klasse 10) vorgenommen.

4.2 Datenauswertung

4.2.1 Allgemeines

Die von INNOLUTIONS für die beiden Messorte je in Form einer Excel-Datei bereitgestellten Ereignislisten umfassen etwas mehr als 126'000 Vorbeifahrten, davon sind 5'700 Motorräder und 104'000 PWs. Diese Daten wurden in Matlab eingelesen und eine tageweise, fahrzeugklassenspezifische Analyse vorgenommen. Diese Analyse liefert für die Motorrad- und PW-Vorbeifahrten eines jeden Messtages

- die Fahrzeugmengen
- die Geschwindigkeitsverteilung, ausgedrückt durch die Perzentilwerte 1% , 5%, 10%, 20% und 50%
- die Pegelverteilung, ausgedrückt durch die Perzentilwerte 1% , 5%, 10%, 20% und 50%

Der Perzentilwert x% wird hier als jener Wert verstanden, der von x% der Ereignisse überschritten wird. Die folgenden Abschnitte zeigen die gefundenen Ergebnisse und Analysen.

4.2.2 Fahrzeugmengen

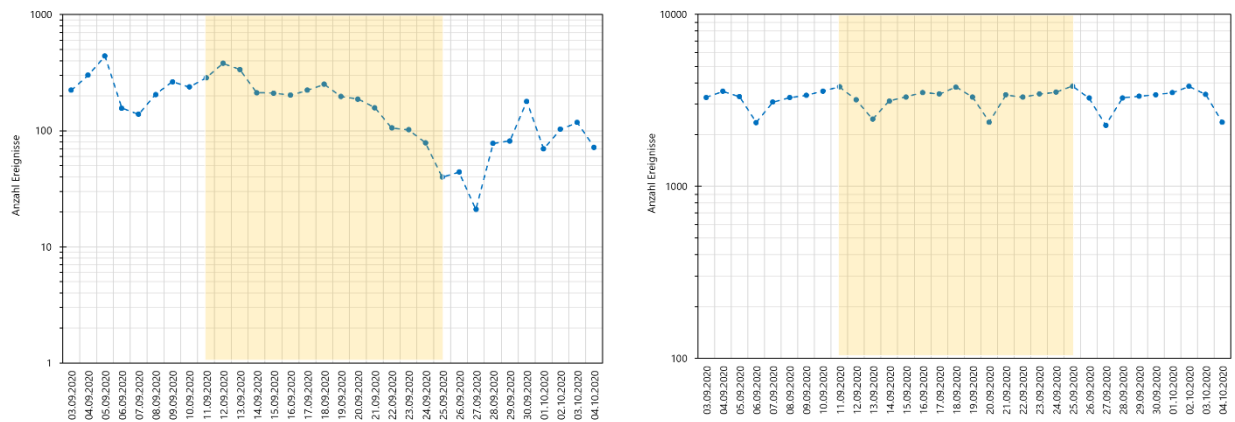


Abbildung 4: Erfasste Tages-Fahrzeugmengen am Messpunkt 1 (links: Motorräder, rechts: Personenwagen).

Anmerkung: Da davon ausgegangen werden kann, dass sämtliche Fahrzeuge, die den Messpunkt M1 passieren, auch am Punkt M2 erscheinen, werden die Fahrzeugmengen nur für M1 gezeigt. Die Motorradmengen gehen in der zweiten Hälfte der Messperiode wetterbedingt zurück, die Personenwagenmengen zeigen einen Wochengang.

4.2.3 Geschwindigkeiten und Schalldruckpegel der Motorräder am Messpunkt 1 (50 km/h)

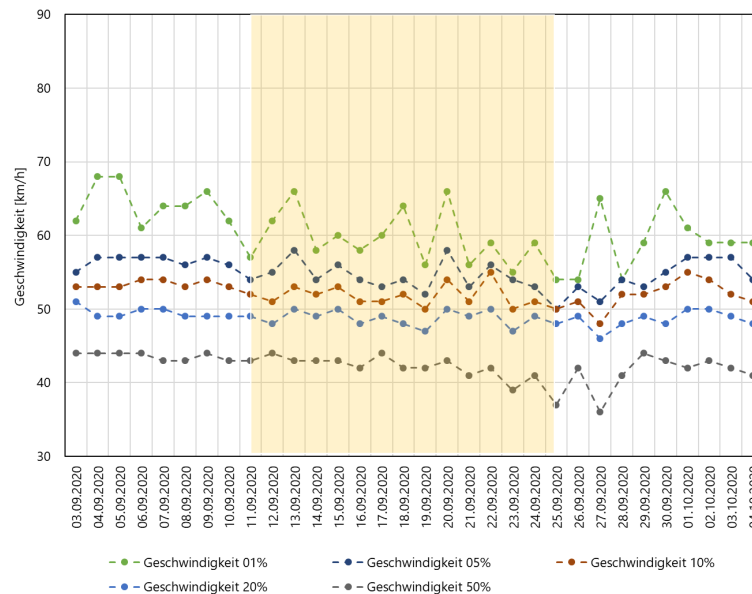


Abbildung 5: Tageweise ausgewertete Geschwindigkeitsperzentilwerte für die Motorrad-Ereignisse am Messpunkt 1. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display. Lesebeispiel: am 3.09.2020 fuhren die langsamsten 50% der Motorräder höchstens 44 km/h, die 1% schnellsten sind mit mehr als 62 km/h unterwegs.

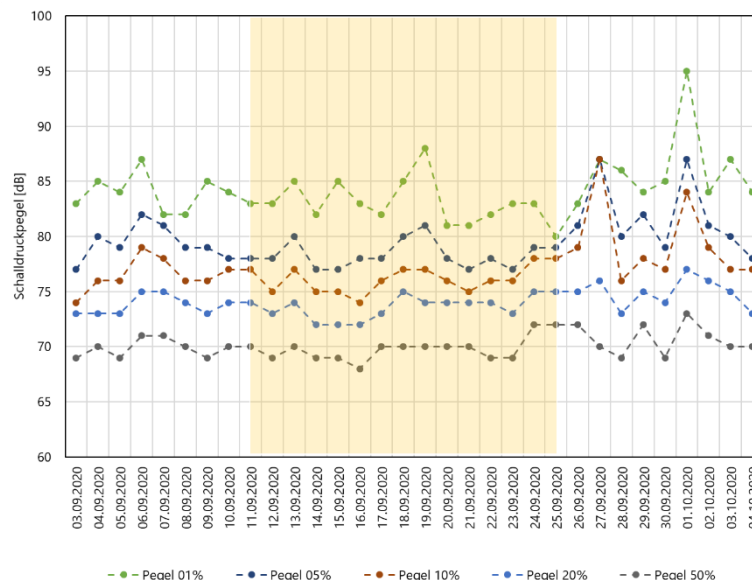


Abbildung 6: Tageweise ausgewertete Schalldruckpegelperzentilwerte für die Motorrad-Ereignisse am Messpunkt 1. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display. Die zweite Hälfte der Messperiode war durch relativ starken Niederschlag geprägt. Das Zusammenfallen der Perzentilwerte am 27.9. ist auf die ausserordentlich geringe Anzahl Motorräder (ca. 20) zurückzuführen. Lesebeispiel: am 3.09.2020 erzeugten die leisesten 50% der Motorräder einen Schalldruckpegel von weniger als 69 dB, die 1% lautesten erzeugten mehr als 83 dB.

4.2.4 Geschwindigkeiten und Schalldruckpegel der Motorräder am Messpunkt 2 (50 km/h)

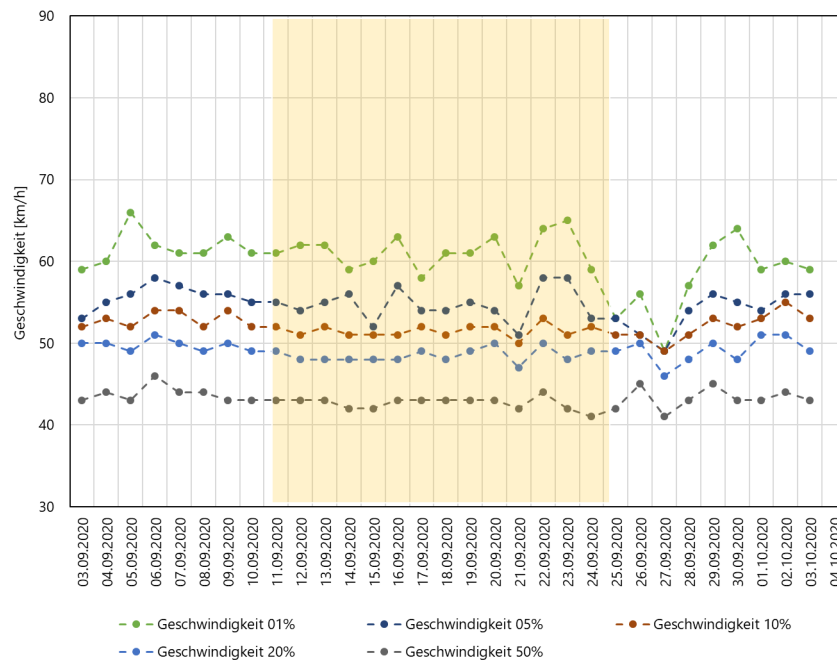


Abbildung 7: Tageweise ausgewertete Geschwindigkeitsperzentilwerte für die Motorrad-Ereignisse am Messpunkt 2. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display.

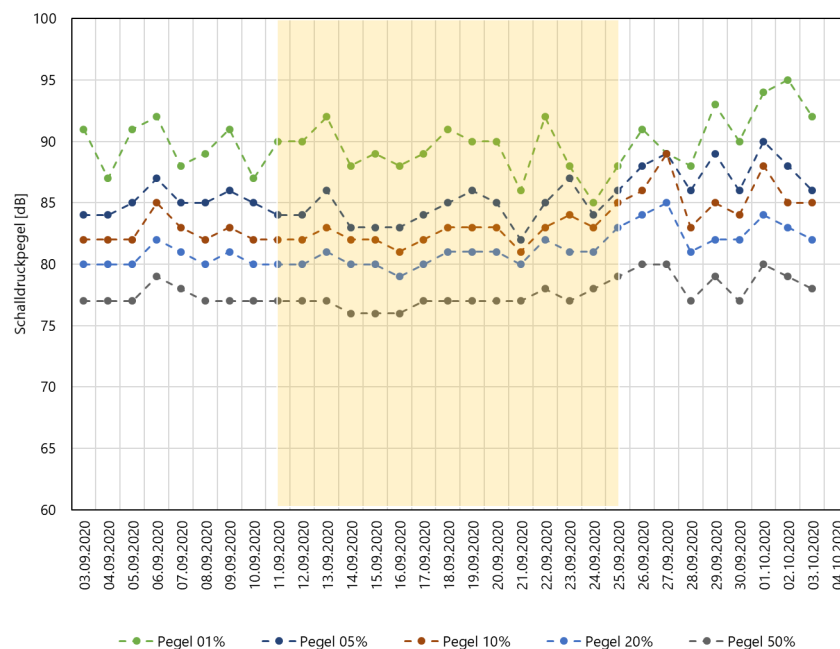


Abbildung 8: Tageweise ausgewertete Schalldruckpegelperzentilwerte für die Motorrad-Ereignisse am Messpunkt 2. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display. Die zweite Hälfte der Messperiode war durch relativ starken Niederschlag geprägt.

4.2.5 Geschwindigkeiten und Schalldruckpegel der Personenwagen am Messpunkt 1 (50 km/h)

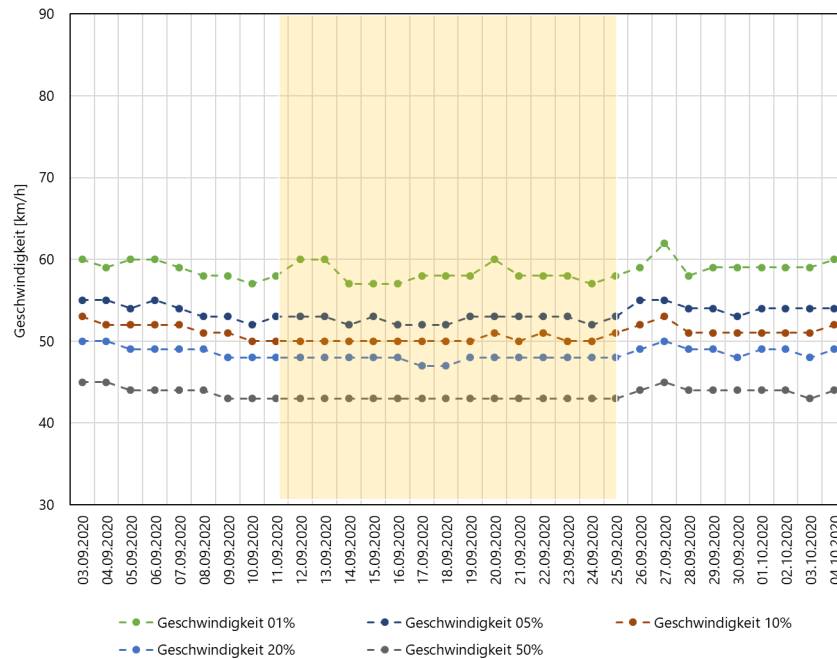


Abbildung 9: Tageweise ausgewertete Geschwindigkeitsperzentilwerte für die PW-Ereignisse am Messpunkt 1. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display.

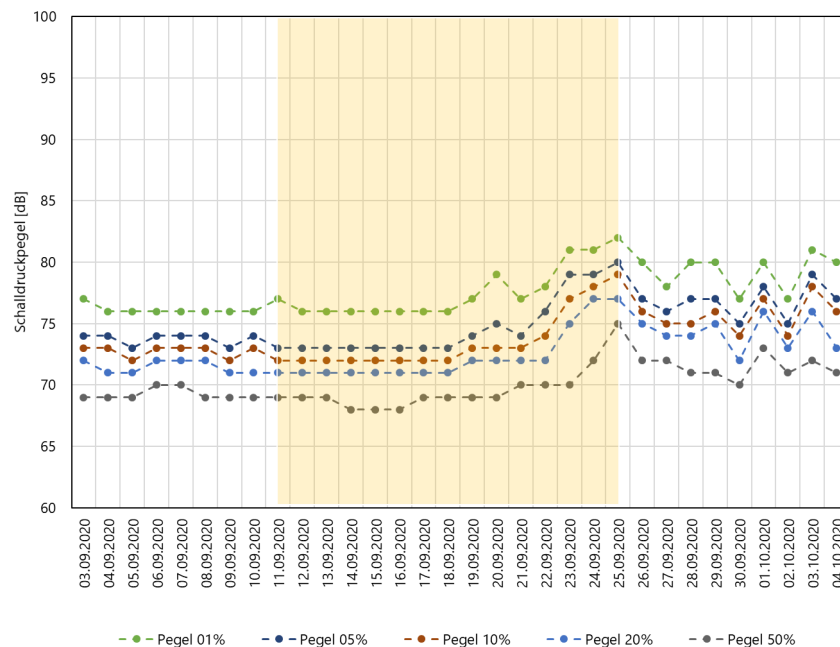


Abbildung 10: Tageweise ausgewertete Schalldruckpegelperzentilwerte für die PW-Ereignisse am Messpunkt 1. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display. Die zweite Hälfte der Messperiode war durch relativ starken Niederschlag geprägt.

4.2.6 Geschwindigkeiten und Schalldruckpegel der Personenwagen am Messpunkt 2 (50 km/h)

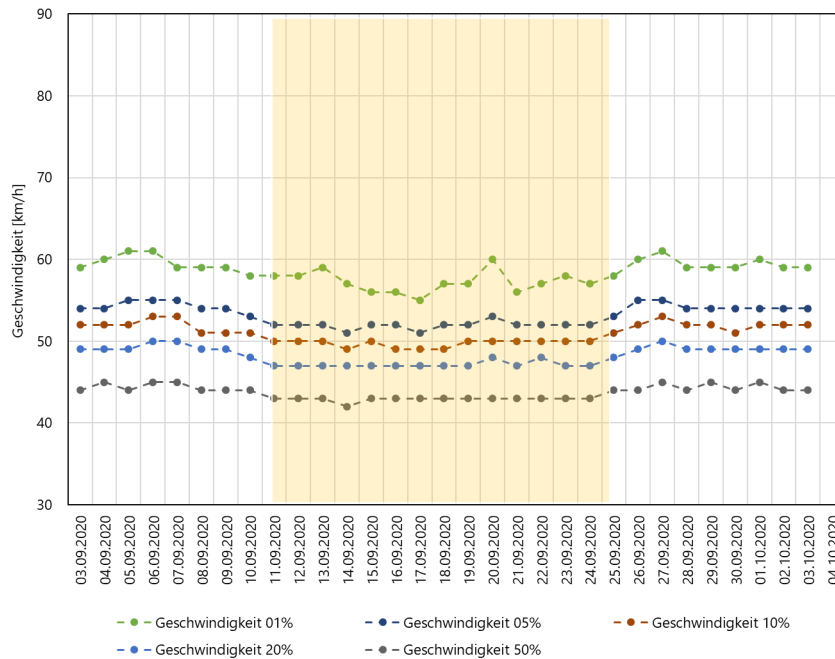


Abbildung 11: Tageweise ausgewertete Geschwindigkeitsperzentilwerte für die PW-Ereignisse am Messpunkt 2. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display.

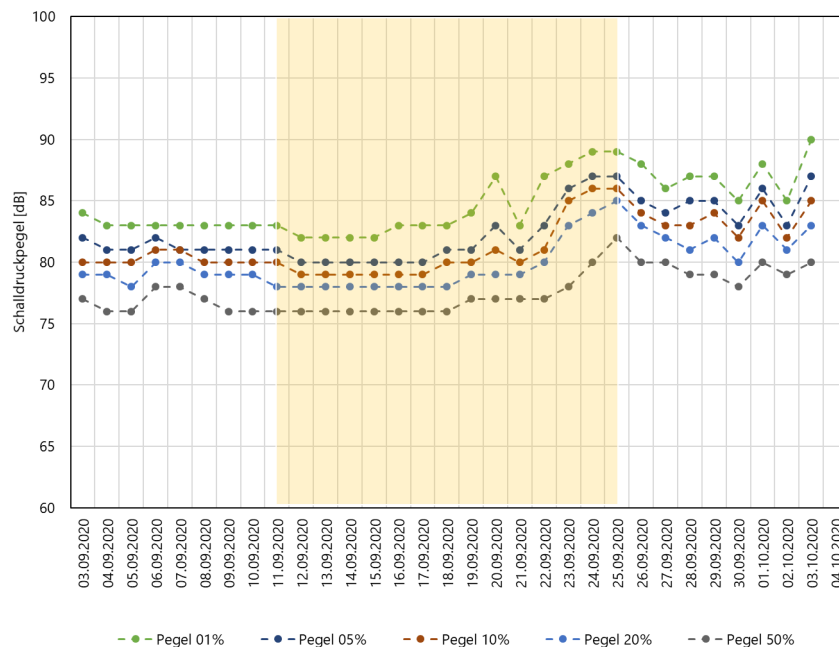


Abbildung 12: Tageweise ausgewertete Schalldruckpegelperzentilwerte für die PW-Ereignisse am Messpunkt 2. Gelb unterlegt ist die Periode mit eingeschaltetem Display. Die zweite Hälfte der Messperiode war durch relativ starken Niederschlag geprägt.

4.2.7 Pegelverteilungen als Histogramme am Messpunkt 1

In Abbildung 13 und Abbildung 14 sind pro Phase die vollständigen Verteilungen der gemessenen Vorbeifahrtspegel am Messpunkt 1 für Motorräder bzw. Personenwagen gezeigt. Insbesondere bei den PW ist in Phase 3 als Folge des meist regnerischen Wetters eine Verschiebung hin zu höheren Pegeln zu erkennen.

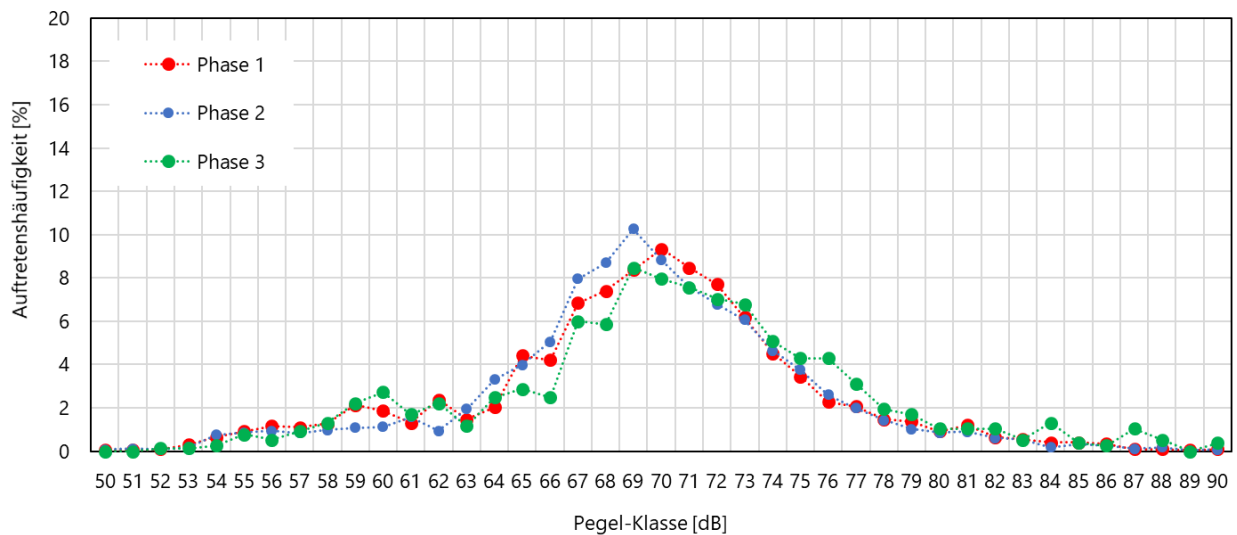


Abbildung 13: Phasenaufgeschlüsselte Pegelverteilung der Motorradereignisse am Messpunkt 1.

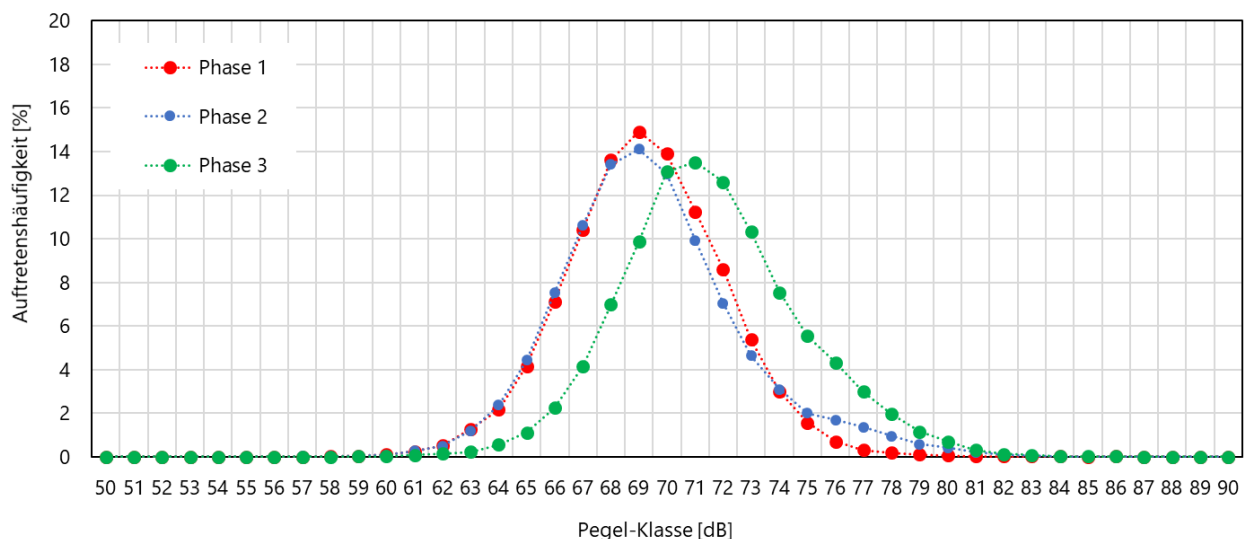


Abbildung 14: Phasenaufgeschlüsselte Pegelverteilung der PW-Ereignisse am Messpunkt 1.

4.2.8 Pegelverteilungen als Histogramme am Messpunkt 2

In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind pro Phase die vollständigen Verteilungen der gemessenen Vorbeifahrtspegel am Messpunkt 2 für Motorräder bzw. Personenwagen gezeigt. Sowohl bei den Motorrädern als auch bei den PW ist in Phase 3 als Folge des meist regnerischen Wetters eine Verschiebung hin zu höheren Pegeln zu erkennen.

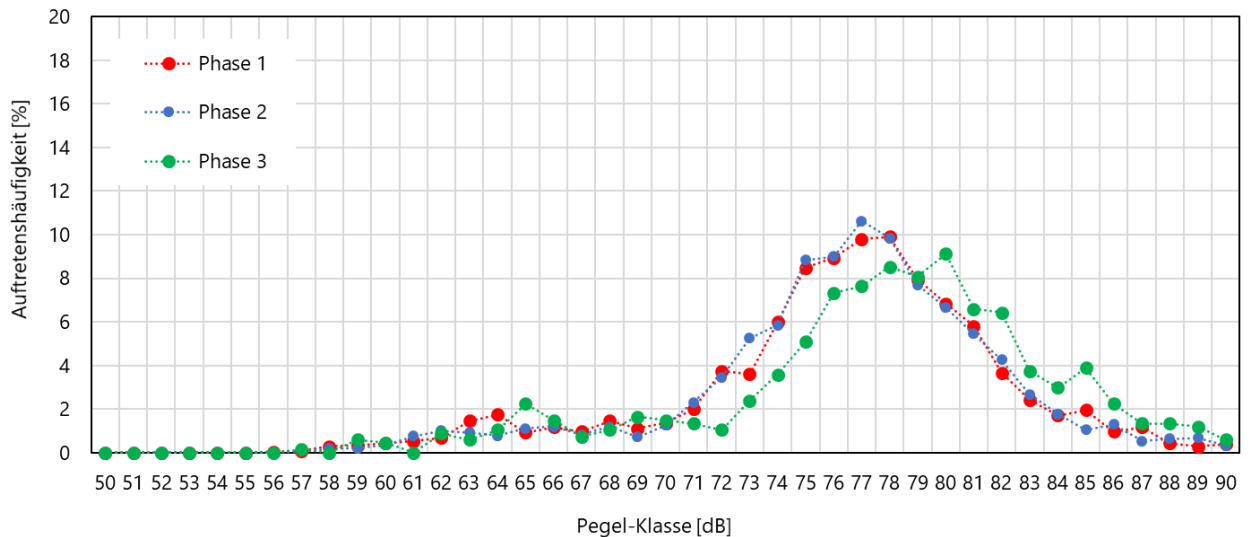


Abbildung 15: Phasenaufgeschlüsselte Pegelverteilung der Motorradereignisse am Messpunkt 2.

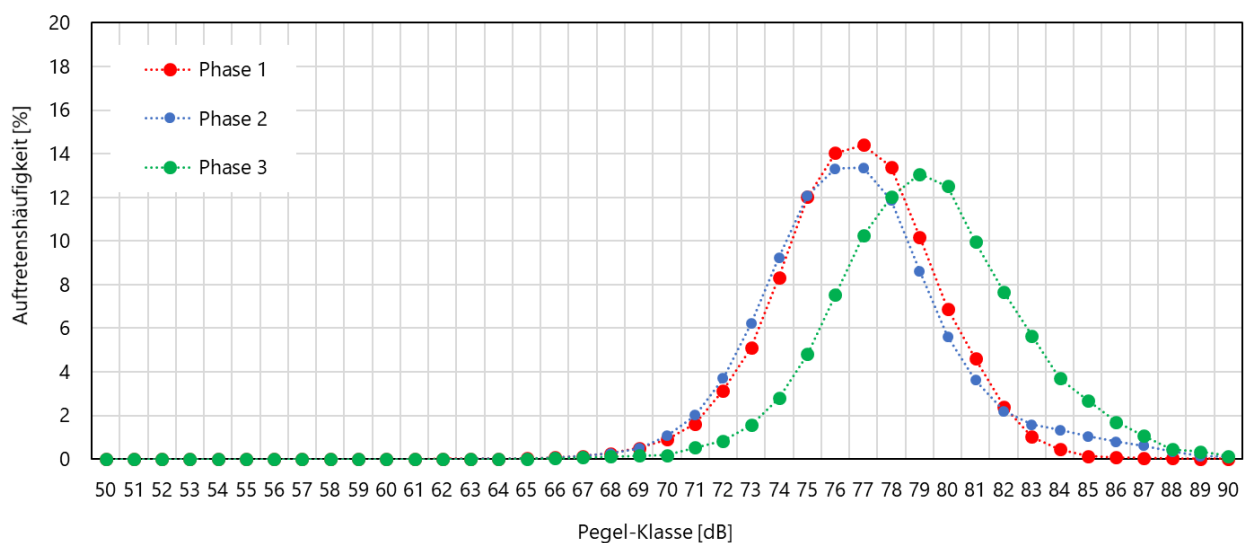


Abbildung 16: Phasenaufgeschlüsselte Pegelverteilung der PW-Ereignisse am Messpunkt 2.

4.2.9 Displaymeldungen am Messpunkt 1

Ausgewertet über die Messperiode mit aktiviertem Display zeigen Tabelle 2 und Tabelle 3 die Gesamtzahlen der erfassten Motorrad- und PW-Vorbeifahrten und die Anzahl Displaymeldungen am Messpunkt 1.

	Gesamtzahl M.rad	Anzahl M.rad "zu laut"	Anzahl M.rad "zu schnell"	Anzahl M.rad "zu laut" und "zu schnell"
absolut	2'862	57	403	16
in Prozent bzgl. Gesamtzahl	100	2	14	0.6

Tabelle 2: Gesamtzahl und Anteile an Motorrad-Vorbeifahrten mit Displaymeldungen.

	Gesamtzahl PW	Anzahl PW "zu laut"	Anzahl PW "zu schnell"	Anzahl PW "zu laut" und "zu schnell"
absolut	46'078	99	4'318	26
in Prozent bzgl. Gesamtzahl	100	0.2	9	0.05

Tabelle 3: Gesamtzahl und Anteile an PW-Vorbeifahrten mit Displaymeldungen.

4.2.10 Mittelwerte der Geschwindigkeits- und Schalldruckpegelperzentilwerte für die Motorräder

Tabelle 4 und Tabelle 5 zeigen für die Motorräder die Mittelwerte der oben gezeigten tageweisen Perzentilgrössen für die drei Perioden "vor Aktivierung des Displays", "während aktiviertem Display" und "nach Aktivierung des Displays".

	Geschwindigkeit [km/h]					Schalldruckpegel [dB]				
	1%	5%	10%	20%	50%	1%	5%	10%	20%	50%
Vor Aktivierung	64.4	56.5	53.4	49.5	43.6	84.0	79.4	76.5	73.8	69.9
Während Aktivierung	59.9	54.6	51.8	48.8	42.2	83.3	78.3	75.9	73.5	69.6
Nach Aktivierung	59.6	54.6	52.0	48.6	41.6	86.1	81.7	79.3	74.9	70.7

Tabelle 4: Mittelwerte der oben gezeigten Geschwindigkeits- und Schalldruckpegel-Perzentilwerte für die Motorradereignisse am Messpunkt 1 (50 km/h).

	Geschwindigkeit [km/h]					Schalldruckpegel [dB]				
	1%	5%	10%	20%	50%	1%	5%	10%	20%	50%
Vor Aktivierung	61.6	55.8	52.9	49.8	43.8	89.5	85.1	82.6	80.5	77.4
Während Aktivierung	61.1	54.7	51.5	48.5	42.6	89.1	84.4	82.5	80.5	76.9
Nach Aktivierung	58.3	53.9	52.1	49.1	43.4	91.5	87.8	85.6	82.9	78.8

Tabelle 5: Mittelwerte der oben gezeigten Geschwindigkeits- und Schalldruckpegel-Perzentilwerte für die Motoradereignisse am Messpunkt 2 (50 km/h).

4.2.11 Mittelwerte der Geschwindigkeits- und Schalldruckpegelperzentilwerte für die PW

Tabelle 6 bis Tabelle 7 zeigen für die Personenwagen die Mittelwerte der oben gezeigten tageweisen Perzentilgrössen für die drei Perioden "vor Aktivierung des Displays", "während aktiviertem Display" und "nach Aktivierung des Displays".

	Geschwindigkeit [km/h]					Schalldruckpegel [dB]				
	1%	5%	10%	20%	50%	1%	5%	10%	20%	50%
Vor Aktivierung	58.9	53.9	51.6	49.0	44.0	76.1	73.8	72.8	71.5	69.3
Während Aktivierung	58.2	52.6	50.2	47.8	43.0	77.3	74.5	73.2	72.1	69.2
Nach Aktivierung	59.3	54.1	51.4	48.9	44.0	79.2	76.8	75.7	74.2	71.4

Tabelle 6: Mittelwerte der oben gezeigten Geschwindigkeits- und Schalldruckpegel-Perzentilwerte für die PW-Ereignisse am Messpunkt 1 (50 km/h).

	Geschwindigkeit [km/h]					Schalldruckpegel [dB]				
	1%	5%	10%	20%	50%	1%	5%	10%	20%	50%
Vor Aktivierung	59.5	54.3	51.9	49.1	44.4	83.1	81.3	80.3	79.1	76.8
Während Aktivierung	57.2	51.9	49.7	47.2	42.9	84.2	81.7	80.5	79.2	76.8
Nach Aktivierung	59.5	54.3	52.0	49.1	44.4	87.0	84.8	83.5	81.9	79.4

Tabelle 7: Mittelwerte der oben gezeigten Geschwindigkeits- und Schalldruckpegel-Perzentilwerte für die PW-Ereignisse am Messpunkt 2 (50 km/h).

4.2.12 Perzentilpegel als Differenzen zu Phase 1

Mit Phase 1 (Messbetrieb vor Displayaktivierung) als Referenz lassen sich aus den Mittelwerten der tagesweisen Perzentilpegel für die Phasen 2 (aktiviertes Display) und 3 (wieder deaktiviertes Display) Differenzen bilden, die als Displaywirkung interpretiert werden können (Abbildung 17, Abbildung 18). Im Unterschied zu der Auswertung in Tabelle 4 bis Tabelle 7 wurden hier nur die regenfreien Tage berücksichtigt. Da in der Phase 3 lediglich ein Tag ohne Niederschlag war, wurde auf eine diesbezügliche Auswertung verzichtet. Sowohl in der Kategorie Motorräder als auch in der Kategorie PW finden sich an beiden Messpunkten durchwegs leicht negative Pegeldifferenzen von rund -0.5 bis -1 dB, was für Phase 2 als zwar geringe aber erwünschte Wirkung des Displays aufgefasst werden kann.

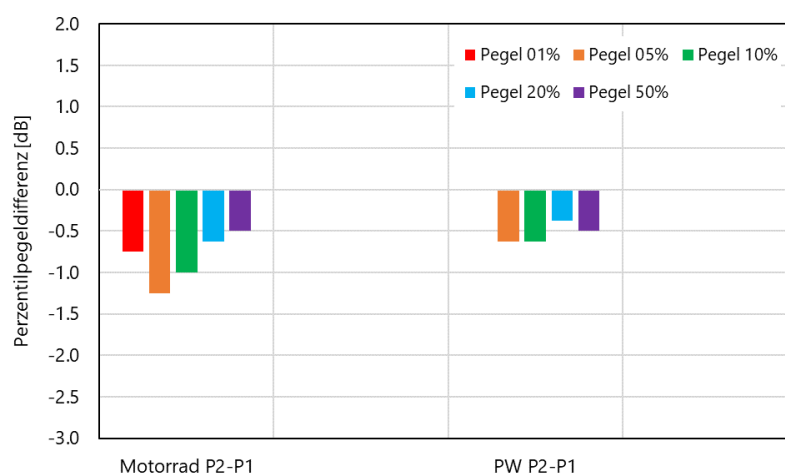


Abbildung 17: Perzentilpegeldifferenzen (1, 5, 10, 20, 50%) am Messpunkt 1 für die beiden Fahrzeugkategorien Motorräder und PW für Phase 2 minus Phase 1.

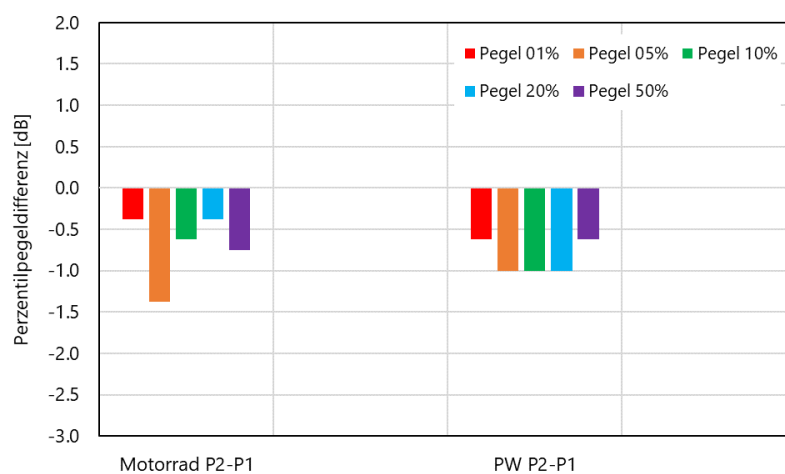


Abbildung 18: Perzentilpegeldifferenzen (1, 5, 10, 20, 50%) am Messpunkt 2 für die beiden Fahrzeugkategorien Motorräder und PW für Phase 2 minus Phase 1.

4.2.13 Geschwindigkeitsmodelle für die Motorräder und die PW

Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Geschwindigkeit/Schalldruckpegel-Messpaare an den beiden Standorten für die Motorräder und die PW. Da es in der zweiten Hälfte der Messperiode teils stark geregnet hat und somit die Strasse über längere Zeit nass war, wurde hier nur die erste, trockene Hälfte der Messperiode bis am 18.9.2020 berücksichtigt. Man beachte, dass Topo-DD-Lärm sowohl die Geschwindigkeiten als auch die Schalldruckpegel nur als ganzzahlige Werte ausweist.

Bei den Motorrädern am Messpunkt 1 zerfällt die Punktwolke in zwei Cluster. Eine Analyse der Zeitstempel hat ergeben, dass viele der sehr langsamen Motorräder später mit "normalen" Geschwindigkeiten am Messpunkt 2 registriert wurden. Möglicherweise repräsentiert also der Cluster bei tiefen Geschwindigkeiten Motorräder, die aus der Tankstellenausfahrt auf die Strasse fahren und am nahen Messpunkt 1 noch langsam aber beschleunigt verkehren. In Abbildung 21 werden alle Geschwindigkeitsmodelle in einer Übersicht zusammengestellt.

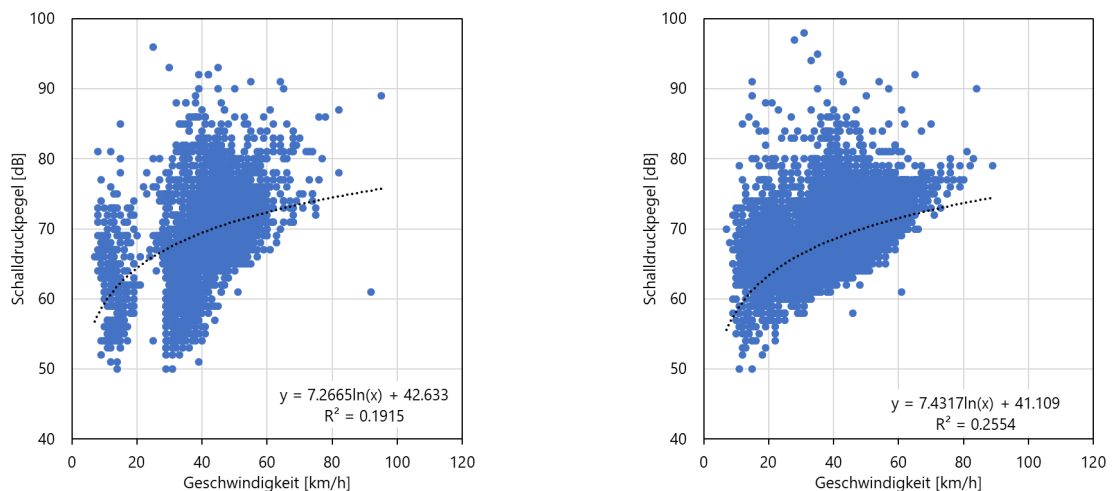


Abbildung 19: X-Y Darstellung der Geschwindigkeits/Schalldruckpegel-Paare am Messpunkt 1 für die Motorräder (links) und PW (rechts).

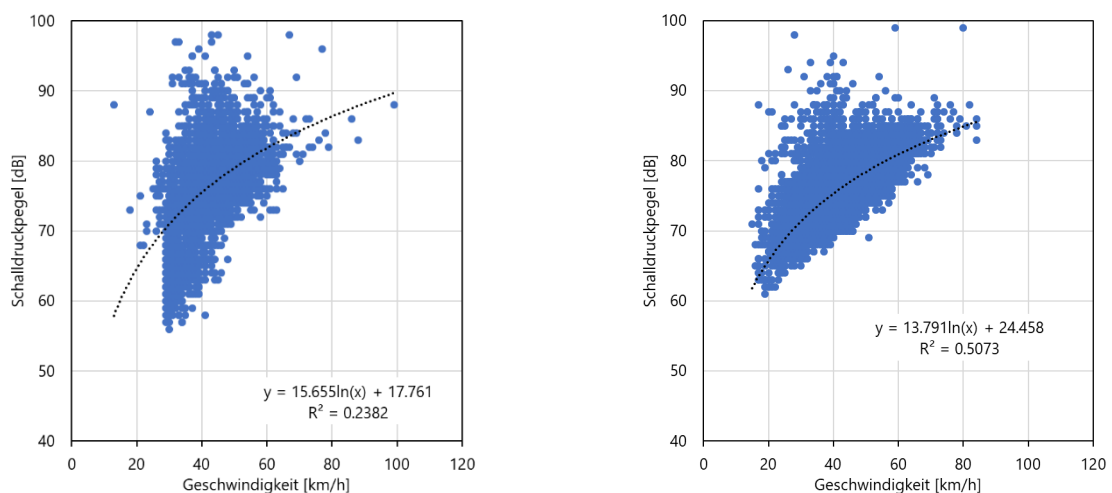


Abbildung 20: X-Y Darstellung der Geschwindigkeits/Schalldruckpegel-Paare am Messpunkt 2 für die Motorräder (links) und PW (rechts).

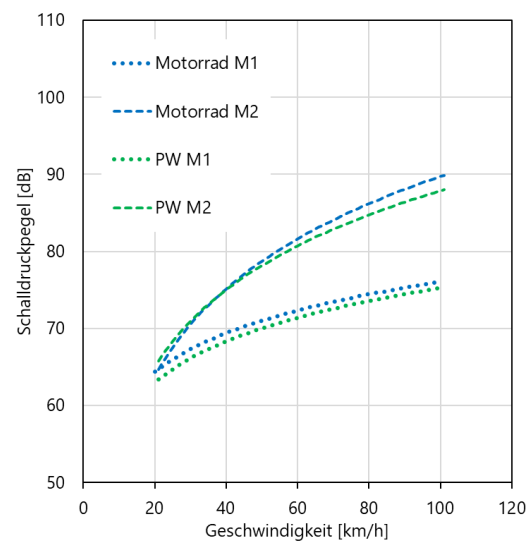


Abbildung 21: Zusammenstellung der Motorrad- und PW-Geschwindigkeitsmodelle an beiden Messpunkten M1 und M2.

5 Diskussion

Die Analyse der Schalldruckpegel-Perzentilwerte bzw. der Histogramme bestätigt die Erfahrungstatsache, dass wenige laute Fahrzeuge sehr viel höhere Pegel als das Medianfahrzeug verursachen. Bei Motorrädern ist die 1%→50% Spanne mit 12 bis 15 dB deutlich grösser als bei Personenwagen mit 6 bis 8 dB.

Die Emissionen sowohl der Motorräder als auch der PW liegen in der dritten Messphase systematisch höher als in der ersten bzw. zweiten Phase. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass es in der zweiten Hälfte des Versuchs an praktisch jedem Tag geregnet hat und sich bei nasser Fahrbahn das Reifengeräusch erhöht. Die Messdaten zeigen, dass dies bei PW's etwas stärker auf das Gesamtgeräusch durchgeschlagen hat. Dies entspricht der Erwartung, da bei PW's das Reifengeräusch einen höheren Anteil am Gesamtgeräusch ausmacht.

Während Phase 2 haben sich die mittleren Perzentilpegel gegenüber Phase 1 um rund 0.5 bis 1 dB gesenkt, was als zwar geringe aber erwünschte Display-Wirkung interpretiert werden kann. Für Phase 3 ist als Folge der regnerischen Wetterverhältnisse diesbezüglich keine Aussage möglich.

Der Vergleich zwischen den beiden Messpunkten M1 und M2 offenbart am zweiten Messpunkt mit 5 bis 8 dB deutlich höhere Pegel. Dies zeigt sich auch an den Geschwindigkeitsmodellen, die für PW's und Motorräder jeweils nahezu deckungsgleich sind, aber zwischen den Messpunkten mit zunehmender Geschwindigkeit mehr und mehr auseinanderlaufen. Der Grund dafür liegt in den in Abschnitt 2.2. erwähnten ungleichen Abständen zwischen Fahrspur und Mikrophon.

Der im Rahmen des Versuchs Metzerlen 2019 (Bericht Empa-Nr. 5214.022857) angestellte Vergleich der Topo-DD Messdaten mit einer eigenen Messkette hat ergeben, dass sich für einen Messabstand von 3.4 m die Topo-DD Pegel direkt als A-bewertete Schalldruckpegel in 7.5 m Abstand interpretieren lassen. Für den Messpunkt 2 liegen die 3.4 m im Bereich des Messabstands, sodass diese Werte - unter Annahme einer Kalibration wie in Metzerlen - näherungsweise mit den Grenzwerten der Typenzulassung für PW von 70-76 dB und für Motorräder von 73-77 dB verglichen werden können. Mit Blick auf Abbildung 15 und Abbildung 16 lässt sich ein erheblicher Anteil an Fahrzeugen ausmachen, deren Vorbeifahrtpegel über den Grenzwerten liegen.