



Untersuchung zur Entwicklung einer Methodik zur Auswertung von CPX-Messungen bei Tempo 30 und 40 Ergebnisbericht

Im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU
A5409
30. November 2020

30. November 2020

Impressum

Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Lärm und NIS, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

Auftragnehmer

Grolimund + Partner AG, Thunstrasse 101 A, 3006 Bern

Disclaimer

Dieser Bericht wurde im Auftrag des BAFU verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Begleitung

BAFU: Simon Steiner

Projektteam

Tina Saurer
Felix Schlatter
Erik Bühlmann

Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 2.0	04.02.2020	fs	Endfassung	BAFU
V 3.0	30.11.2020	fs	Überarb. Endfassung	BAFU

A5409_CPX_T30T40_V3.docx

30. November 2020

Inhalt

1. Einleitung	4
2. Datengrundlage und methodisches Vorgehen	4
2.1 CPX – Messungen zur Ermittlung der Geschwindigkeitskorrektur	5
2.2 Datenauswertung.....	9
2.3 Geschwindigkeitskorrekturansätze	10
3. Resultate	11
3.1 Spektrales Geschwindigkeitsverhalten	11
3.2 Gruppierung von Belägen zu Belagskategorien.....	14
3.3 Geschwindigkeitskorrekturansätze	15
3.4 Gesamtpegelverifizierung.....	18
3.5 Spektrale Verifizierung	25
4. Diskussion	29
4.1 Frequenzabhängigkeit der Korrektur	29
4.2 Altersabhängigkeit der Geschwindigkeitskorrektur	29
4.3 Modellklassifizierung.....	30
4.4 Kommentare zu den Modellen	31
5. Weiterer Forschungsbedarf	32
Anhang	
I Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur	33

30. November 2020

1. Einleitung

Vermeehrt werden in verschiedenen Kantonen und Gemeinden auf Strassen mit signalisierten Geschwindigkeiten von unter 50km/h lärmarme Beläge eingebaut, oftmals in Kombination mit Massnahmen der Geschwindigkeitsreduktion. Auf diesen Strecken kann (ohne hohen administrativen Mehraufwand, oder Strassensperrungen) keine Beurteilung mit der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h durchgeführt werden.

Auf diesen Strecken mit Geschwindigkeitsreduktion folgt das Bedürfnis einerseits die Lärmsituation exakt beurteilen zu können und andererseits die akustischen Anforderungen an die lärmarmen Beläge überprüfen zu können. G+P wird deshalb vermehrt von den zuständigen Behörden für CPX-Messungen auf Strecken mit Tempo 30 und Tempo 40 angefragt.

Die Beurteilung der akustischen Belagsgüte mittels CPX – Methode erfolgt gemäss EN ISO 11819-2 Norm hauptsächlich für die Referenzgeschwindigkeit von 50 und 80 (oder 110) km/h. Die in der Schweiz massgebenden Umrechnungsmodelle für die Beurteilung der akustischen Belagsgüte mittels CPX-Methode existieren heute lediglich für die Referenzgeschwindigkeiten 50 km/h und 80 km/h (siehe Leitfaden Strassenlärm, Anhang 1c). Entsprechend können CPX-Messpegel auf Strecken bei Tempo 30 und Tempo 40 bisher nicht in Bezug zum Referenzbelag StL-86+ oder son-ROAD18 ausgewertet werden. Denn auf diesen Abschnitten kann keine Messung bei der Referenzgeschwindigkeit durchgeführt werden.

Um den hohen Aufwand für die Erstellung eines Umrechnungsmodells bei Tempo 30 oder 40 zu umgehen, werden in diesem Forschungsbericht verschiedene Ansätze präsentiert, die ermöglichen CPX – Pegel bei tieferen Geschwindigkeiten in den Bezug des Referenzbelages bei 50 km/h zu setzen.

2. Datengrundlage und methodisches Vorgehen

Die Norm EN ISO 11819-2, zur Messung der Fahrbahneigenschaften bezüglich des Reifengeräusches sieht für die Beurteilung der Fahrbahn eine Geschwindigkeitskorrektur auf die Referenzgeschwindigkeit vor. Die Korrektur ist nötig, da die CPX-Pegel einen proportionalen Zusammenhang zur Fahrtgeschwindigkeit aufweist. Daher ergeben sich höhere CPX-Pegel bei grösseren Messgeschwindigkeiten. In folgender Formel (1)) ist die Korrektur, wie sie in der aktuellen Norm abgebildet ist, dargestellt. Darin ist der proportionale logarithmische Geschwindigkeitszusammenhang ersichtlich.

$$Corr^v = \log_{10} \left(VCF_{f,v_{ref},p,t} * \frac{v_l}{v_{ref}} \right) \quad (1)$$

... mit ... VCF = Velocity correction factor. Geschwindigkeitskorrekturfaktoren (Tabelle 1)
p = Belagskategorie
t = Reifenset
f = frequency band
l = 1/8 - Sekunde
v_l = Geschwindigkeit pro 1/8-Sekunde [km/h]
v_{ref} = Referenzgeschwindigkeit [km/h]

30. November 2020

Tabelle 1: Belagskategorien und entsprechende Geschwindigkeitskorrekturfaktoren (VCF)

PavCat	PavCatName	Bconst (= VCF)
1	Dense	30
2	Porous	25
3	Cement	35

2.1 CPX – Messungen zur Ermittlung der Geschwindigkeitskorrektur

Auf insgesamt drei Rundkursen mit einer Gesamtlänge von über 24 km an bekannten Belagstypen wurden CPX – Messungen in den Geschwindigkeiten 30, 35, 40, 45 und 50 km/h durchgeführt. Dabei wurde jede Strecke zweimal (1x LKW und 1x PKW-Reifen) in derselben Geschwindigkeit vermessen. Die abgefahrenen Runden sind in den Abbildungen 1 - 3 dargestellt.

Tabelle 2 bezeichnet die vermessenen Belagstypen auf den drei abgefahrenen Runden. Mit den drei Runden konnten 14 verschiedene Belagstypen in unterschiedlichen Alterungsklassen vermessen werden.

Tabelle 2: Vermessene Streckenabschnitte inklusive Einbaujahr und Streckennamen.

Runde	Belagstyp	Einbaujahr	Strassenname	Streckenlänge [m]
Aarau - Runde	AC11	1991	Buchserstrasse	680
Zofinger - Runde	AC11	1991	Langenthalerstrasse	400
Zofinger - Runde	AC11	2000	Gländstrasse	1620
Zofinger - Runde	AC16	2016	Luzernerstrasse	560
Zofinger - Runde	ACMR8	2006	Zofingerstrasse	680
Zofinger - Runde	ACMR8	2008	Bernstrasse	760
Fribourger - Runde	Famsi	2016	Rte du Jura	880
Fribourger - Runde	Famsi	2017	Route de Villars	600
Fribourger - Runde	Nanosoft4	2011	Ave Louis Weck Reyno	240
Fribourger - Runde	Nanosoft4	2012	Ave Louis Weck Reyno	480
Fribourger - Runde	Nanosoft4	2012	Rte de la Fonderie	580
Zofinger - Runde	OB	1988	Zofingerstrasse	420
Fribourger - Runde	Sapa4dicht	2017	Bvl de Pérolles	560
Fribourger - Runde	Sapaphone4	2013	Ave du Midi	720
Fribourger - Runde	Sapaphone4	2015	Bvl de Pérolles	140
Fribourger - Runde	Sapaphone4	2015	Rte des Alpes	440
Fribourger - Runde	Sapaphone4	2016	Bvl de Pérolles	280
Aarau - Runde	SDA4	2016	Bibersteinerstrasse	1500
Aarau - Runde	SDA4-12	2017	Bahnhofstrasse	260

30. November 2020

Runde	Belagstyp	Einbaujahr	Strassenname	Streckenlänge [m]
Aarau - Runde	SDA4-12	2017	Entfeldstrasse	540
Aarau - Runde	SDA8-12	2017	Industriestrasse	620
Zofinger - Runde	SDA8-12	2017	Zofingerstrasse	2100
Zofinger - Runde	SDA8-12	2018	Mühlemattstrasse	1900
Aarau - Runde	SMA11	2002	Mühlemattstrasse	480
Aarau - Runde	SMA11	2006	Schiffländerstrasse	280
Zofinger - Runde	SMA11	2000	Gländstrasse	660
Zofinger - Runde	SMA11	2005	Luzernerstrasse	780
Zofinger - Runde	SMA11	2007	Luzernerstrasse	800
Aarau - Runde	SMA8	2004	Küttigerstrasse	720
Zofinger - Runde	SMA8	1997	Bernstrasse	1080
Zofinger - Runde	SMA8	1998	Langenthalerstrasse	460
Zofinger - Runde	SMA8	2010	Strengelbacherstrasse	520
Aarau - Runde	TA	1984	Tramstrasse	1740
			Total	24'480

30. November 2020

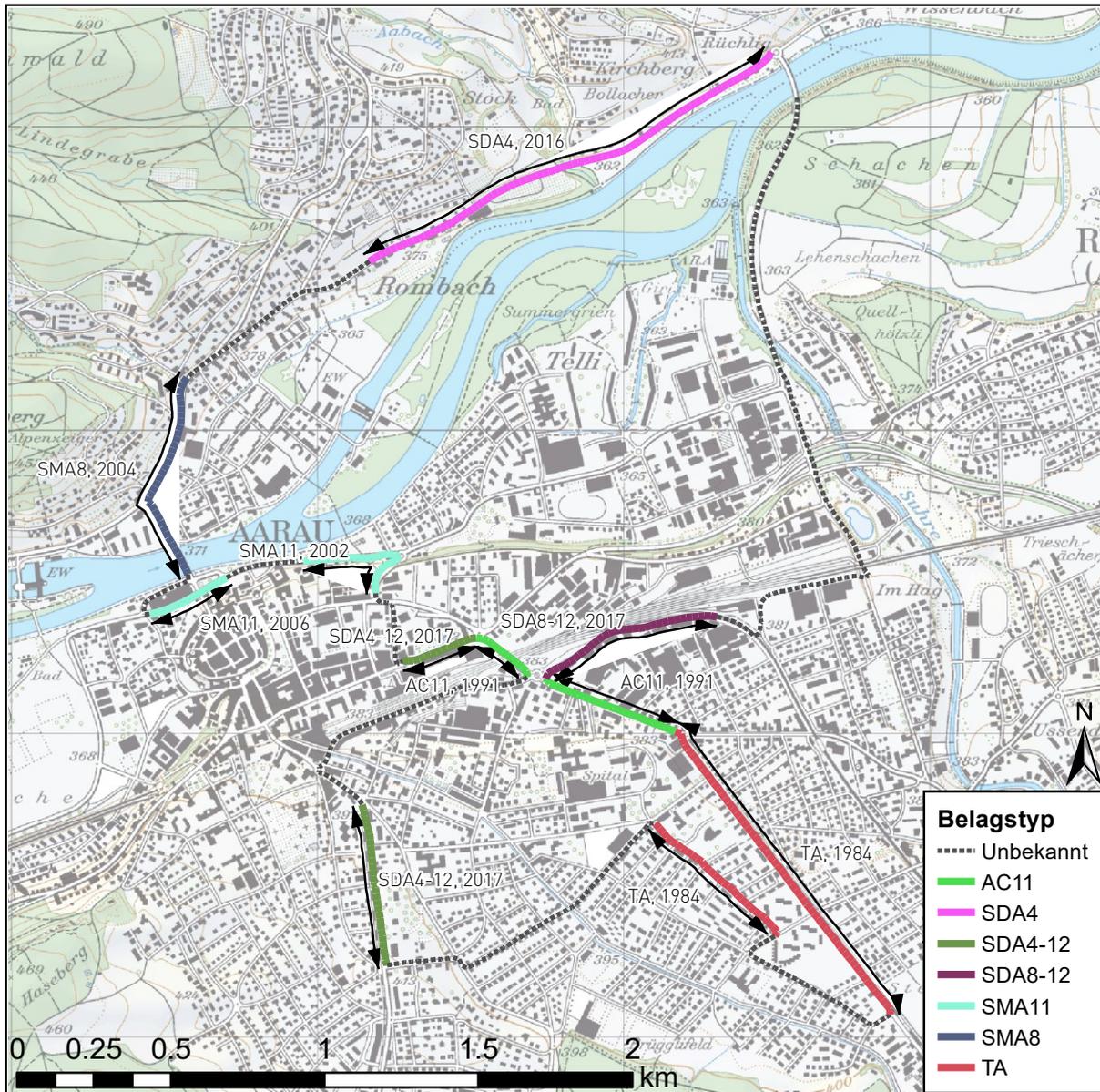


Abbildung 1: Rundkurs Aarau

30. November 2020

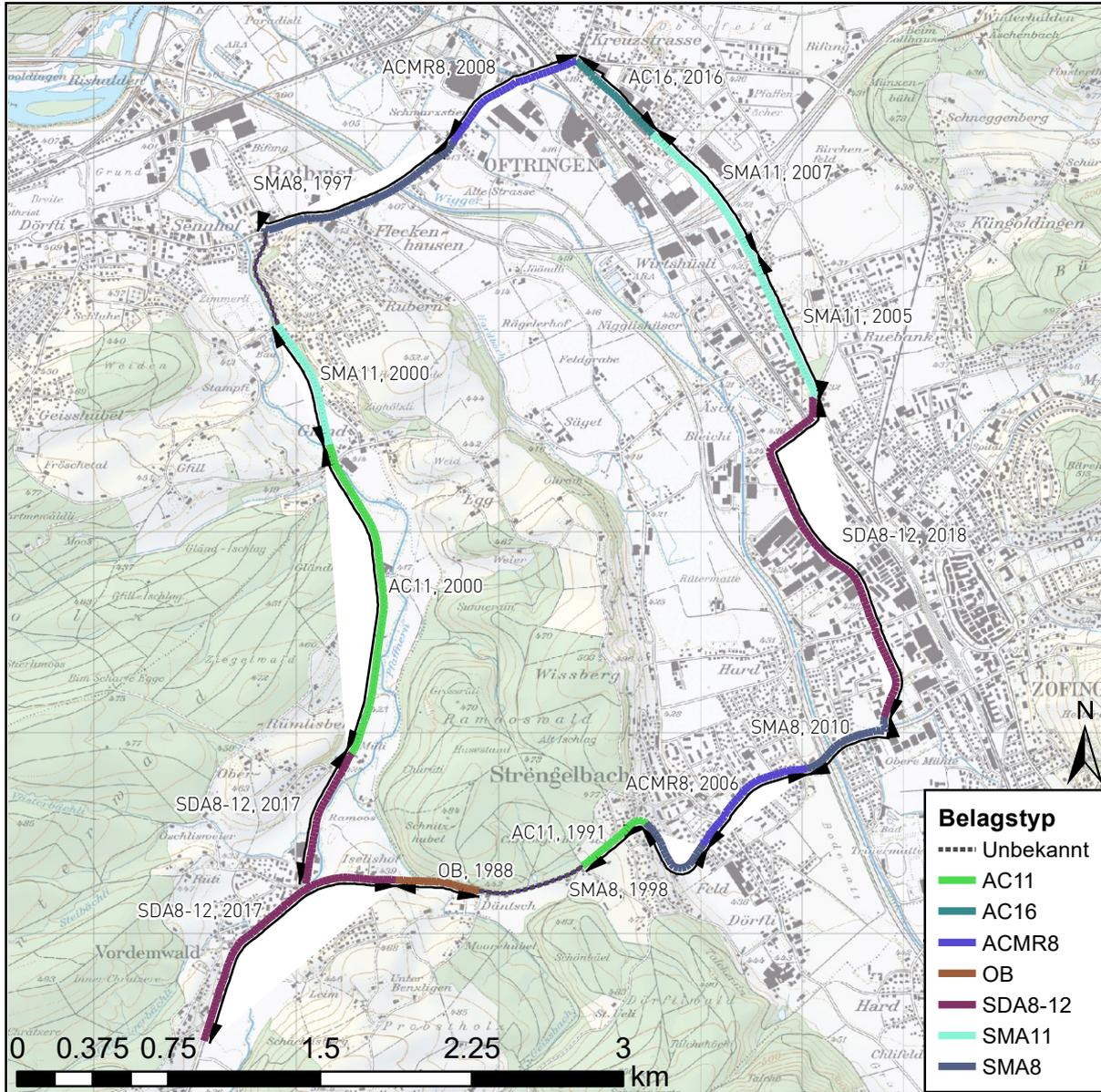


Abbildung 2: Rundkurs Zofingen

30. November 2020

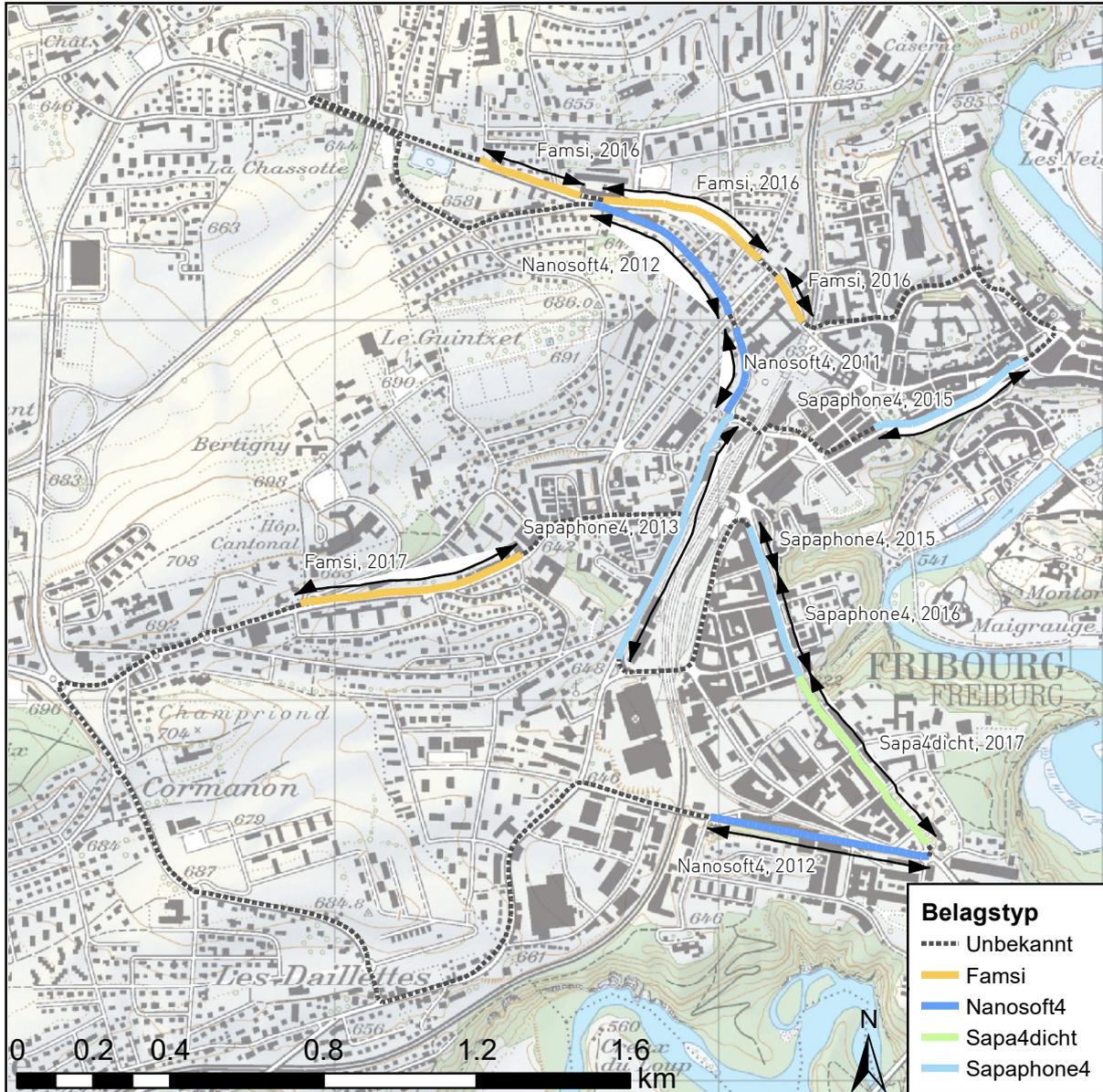


Abbildung 3: Rundkurs Freiburg

2.2 Datenauswertung

Die Ermittlung der Korrektur erfolgte gemäss dem Schema in Abbildung 4. Die aggregierten CPX-Segmente wurden mit den nötigen Trailer-, Temperatur- und Reifenhärtekorrekturen versehen. Die Geschwindigkeitskorrektur wurde dabei aber weggelassen, welches mit dem Koeffizienten von $B = 0$ erreicht wurde. Daraus resultierten CPX-Freifeldpegel, welche auf die Normbedingungen (Temperatur, Reifenhärte, Freifeldpegel) korrigiert wurden.

30. November 2020

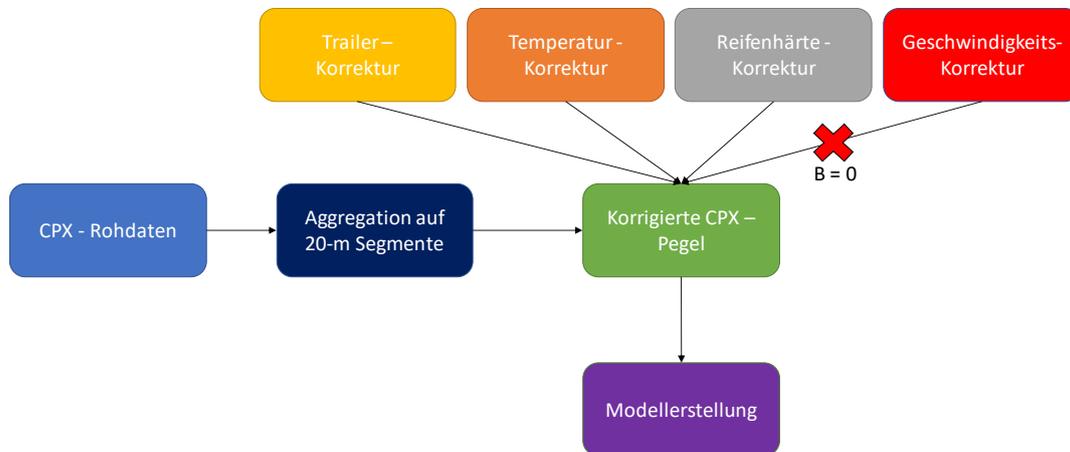


Abbildung 4: Ablaufdiagramm für die Modellerstellung

Mit den korrigierten CPX-Pegeln ($B=0$) wurden pro Belagsabschnitt Mittelwerte gebildet. So resultierte für jeden Belagsabschnitt und jede gemessene Geschwindigkeit ein Datensatz, welche in ein lineares Modell der Form:

$$L_{CPX,p,(f),t} = B_{const,(f),t} \cdot \log_{10}(v) + Intercept \quad (2)$$

... mit ...
p = Belagskategorie
t = Reifenset
f = frequency band
v = Geschwindigkeit [km/h]
Intercept: Achsenschnittpunkt

gegeben wurde. Mit dieser Form von linearem Modell wurden unterschiedliche Geschwindigkeitskorrekturansätze ($B_{const,(f),t}$) ermittelt. Diese umfassten spektrale, belagsspezifische sowie zu Belagskategorien zusammengefasste Geschwindigkeitskorrekturfaktoren. Für die Umrechnung der Geschwindigkeiten ist nur die Steigung ($B_{const,(f),t}$) von Relevanz, da sich der Achsenschnittpunkt (*Intercept*) rauskürzt. Ein Überblick an untersuchten Ansätzen ist in folgendem Kapitel 2.3 beschrieben.

2.3 Geschwindigkeitskorrekturansätze

Für die Ermittlung der Methodik wurden verschiedene Umrechnungsmöglichkeiten untersucht. Dabei wurden verschiedene Modellkomplexitäten untersucht:

- Korrektur auf Gesamtpegel (Norm-Korrektur)
- Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur
- Belagskategorische Gesamtpegelkorrektur
- Belagsspezifische und spektrale Korrektur
- Belagskategorische und spektrale Korrektur

30. November 2020

3. Resultate

3.1 Spektrales Geschwindigkeitsverhalten

Das Geschwindigkeitsverhalten von Reifen-Fahrbahngeräuschen wird beeinflusst durch unterschiedliche Lärmentstehungsmechanismen, die je nach Belag, Reifentyp und Frequenz unterschiedlich ausfallen. Die auf den einzelnen Belägen mit linearen Geschwindigkeitsmodellen ermittelten spektralen Geschwindigkeitskoeffizienten werden in Abbildung 5 dargestellt. So zeigt sich, dass gerade im tiefen Frequenzbereich deutliche Unterschiede in den Geschwindigkeitskorrekturfaktoren zwischen einzelnen Terzbändern resultieren.

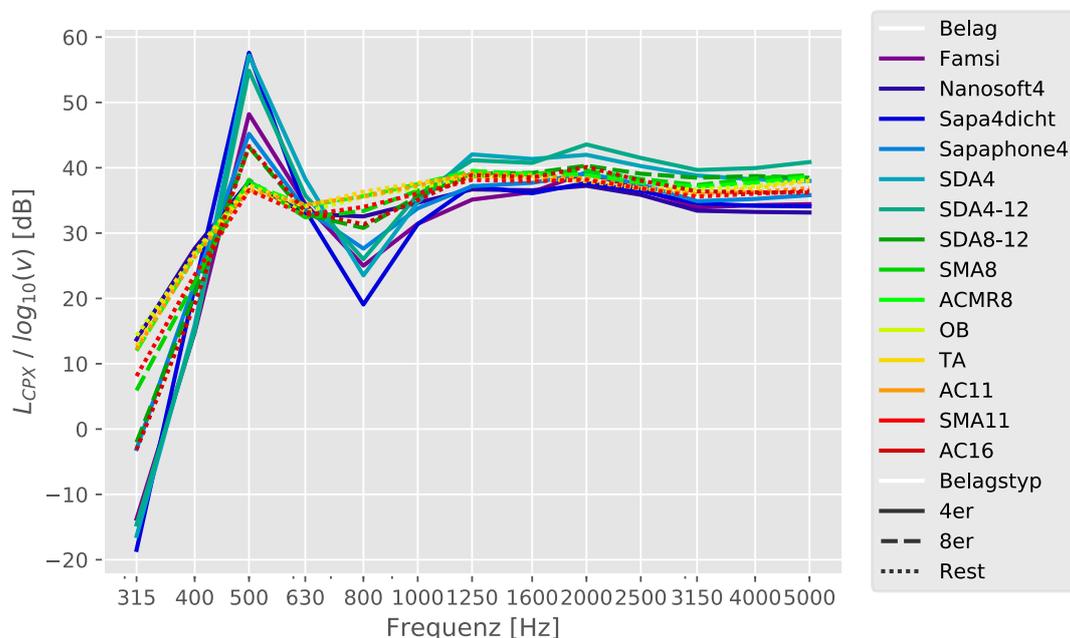


Abbildung 5: Terzbandweise Geschwindigkeitskoeffizienten für die alle untersuchten Beläge den Messreifen A1 (PKW).

Für die tiefen Frequenzen (315 Hz) ergeben sich für gewisse Belagstypen negative Geschwindigkeitskoeffizienten (Vgl. Abbildung 5). Im hochfrequenten Bereich pendelt sich die Korrektur für die verschiedenen Beläge zwischen 32 und 42 ein.

3.1.1 Nichtlinearität bei tiefen Frequenzen

Bei der Modellerstellung hat sich gezeigt, dass sich die Terzbandpegel vor Allem im 400 Hz Terzband nicht linear mit der Geschwindigkeit verhalten. Ein Beispiel von einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen CPX-Pegel und Geschwindigkeit ist in Abbildung 6 dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht die Geschwindigkeitsabhängigkeit des 400 Hz-Terzbandpegels für beide Messreifen auf den SDA8-12 und ACMR8 Belägen.

30. November 2020

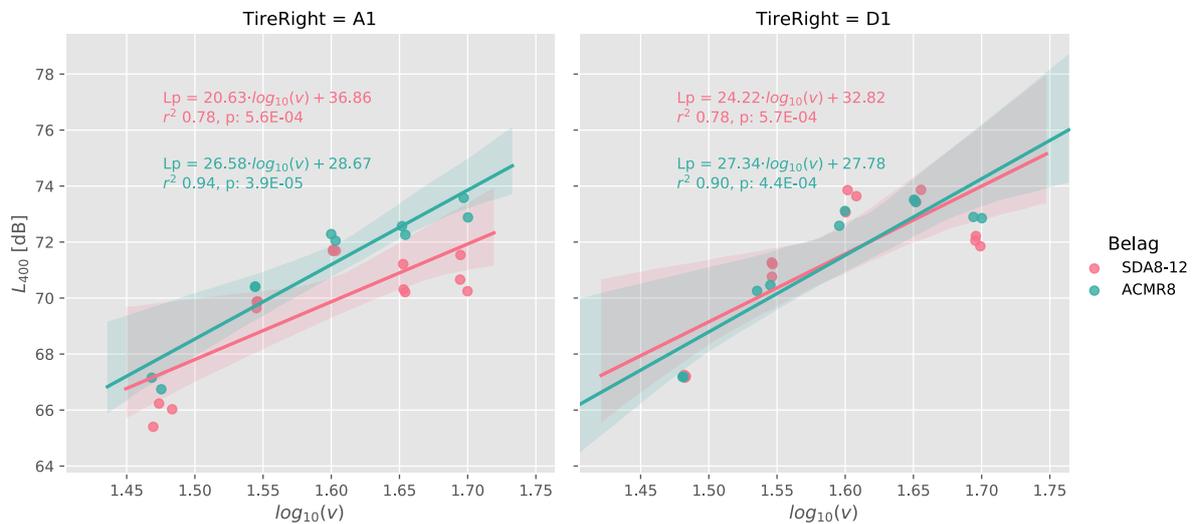


Abbildung 6: Ermittlung der Geschwindigkeitskorrektur im tiefen Frequenzband von 400 Hz für die Beläge SDA8-12 und ACMR8.

Dieser nichtlineare Zusammenhang zeigte sich auf den meisten untersuchten Belagstypen. Die Nichtlinearität im Terzband 400 Hz entsteht durch eine geschwindigkeitsbedingte Frequenzverschiebung (Anregung durch Reifenprofil).

3.1.2 Altersabhängigkeit der Modellkorrekturen

Bei der Modellerstellung hat sich ebenfalls gezeigt, dass der Zustand, respektive das Alter des Belages eine Rolle spielt. So wurden auf der Messrunde nur ältere (6-7-jährige) Nanosoft4-Beläge vermessen. Im Vergleich zu den eher neueren Belägen der Klasse 4er-Beläge weisen die Beläge des Nanosofts im tiefen Frequenzbereich Geschwindigkeitskoeffizienten auf, die vergleichbar mit dichteren Belägen, wie z.B. AC11 sind (Vgl. Abbildung 8):

30. November 2020

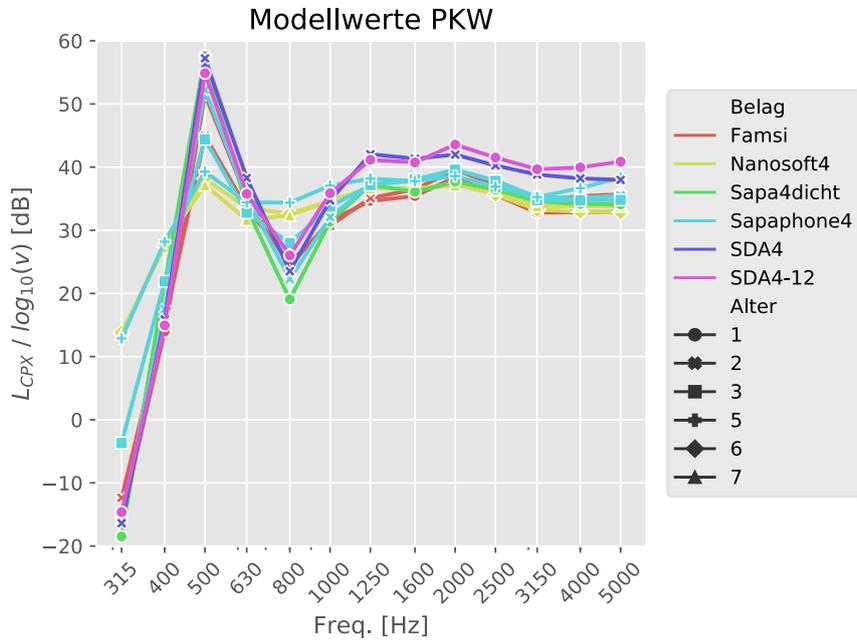


Abbildung 7: Altersabhängigkeit der Gruppe «4er-Beläge». Dargestellt sind die verschiedenen erhobenen Geschwindigkeitskorrekturen inklusive des Alters der Fahrbahn.

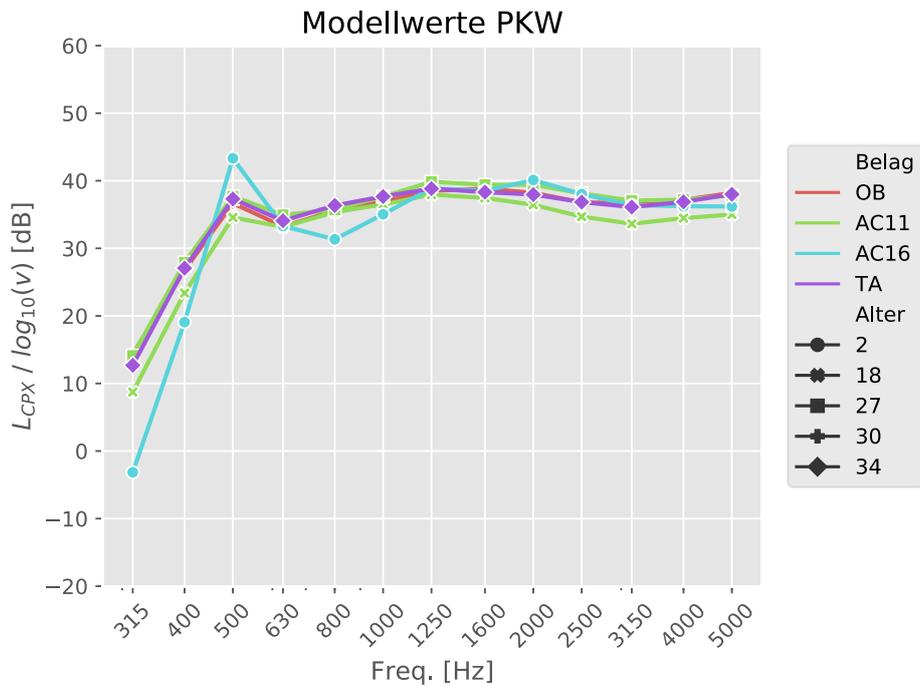


Abbildung 8: Geschwindigkeitskorrekturen der Beläge OB, AC11, AC16 und TA.

30. November 2020

3.2 Gruppierung von Belägen zu Belagskategorien

Da nicht für jeden Belag, der in der Schweiz verbaut wurde, Korrekturen ermittelt wurden, ist es sinnvoll eine Kategorisierung von Belägen vorzunehmen, die einfach reproduzierbar ist. Damit kann die Anwendbarkeit auf in diesem Forschungsprojekt nicht abgedeckten Beläge ausgeweitet werden. Daher wurden die einzelnen Belagstypen anhand ihrer Eigenschaften in drei Kategorien einzuteilen:

- 4er-Beläge: Nanosoft, Famsiphongrip, SDA4-12, Sapaphone4
- 8er-Beläge: SMA8, ACMR8, SDA8-12
- Dichtere Beläge: OB, AC16, TA, AC11

30. November 2020

3.3 Geschwindigkeitskorrekturansätze

In folgendem Kapitel sind die ermittelten Geschwindigkeitsansätze der untersuchten Modelle dargestellt.

3.3.1 Norm-Korrektur

Die ISO-11819-2:2017, «Akustik – Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsräusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren» definiert für die Geschwindigkeitsabweichungen von der Messgeschwindigkeit abhängig vom Belagstyp drei verschiedene Faktoren. Die Faktoren sind in Tabelle 1 dokumentiert. Die ISO-Korrektur ist im Grunde genommen nur für Geschwindigkeitsbereiche $\pm 15\%$ der Referenzgeschwindigkeit gültig.

Gemäss Kapitel 2 wird die Normkorrektur mit dem globalen Geschwindigkeitsfaktor von 30 angewandt.

3.3.2 Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur

Für die Ermittlung der Belagsspezifischen Gesamtpegelkorrektur wurden die gemessenen CPX-Gesamtpegel aufgeteilt nach Belagstyp in nach der linearen Abhängigkeit zwischen CPX-Pegel und Geschwindigkeit untersucht. Aus der Auflösung der Gleichung resultiert für jeden Belagstyp einen eigenen Korrekturfaktor.

Folgende Korrekturfaktoren wurden für eine belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur für jeden Belag und Reifentyp ermittelt:

Tabelle 3: Belagsspezifische Gesamtpegelkorrekturfaktoren.

Belag	Bconst PKW	Bconst LKW
AC11	36.5	35.3
AC16	35.3	35.1
ACMR8	36.8	35.8
Famsi	32.8	33.4
Nanosoft4	34.5	34.8
OB	36.3	35.7
SDA4	37.2	34.9
SDA4-12	36.2	33.9
SDA8-12	35.2	34.3
SMA11	35.5	34.4
SMA8	35.9	34.8
Sapa4dicht	36.4	34.9
Sapaphone4	34.7	34.3
TA	36.8	33.6

3.3.3 Belagskategorische Gesamtpegelkorrektur

Die Belagskategorische Gesamtpegelkorrektur basiert auf der Auflösung des linearen Modelles zwischen der logarithmierten Geschwindigkeit und dem CPX-Gesamtpegel. Dabei wurden alle gemessenen Beläge in drei Belagsgruppen eingeteilt (Vgl Kapitel 3.2). Die Gruppierung orientierte sich an be-

30. November 2020

lagstechnischen Eigenschaften. Tabelle 4 zeigt die ermittelten Geschwindigkeitskorrekturfaktoren für den Gesamtpegel für PKW und LKW Reifen.

Tabelle 4: Ermittelte Geschwindigkeitskorrekturfaktoren auf Gesamtpegel für PKW und LKW und gruppierte Belagskategorien gemäss Kapitel 2.3.

Belag	Bconst PKW	Bconst LKW
4er-Beläge	34.8	34.2
8er-Beläge	35.9	34.7
Dichtere Beläge	36.0	34.8

3.3.4 Belagsspezifische und spektrale Korrektur

In der folgenden Abbildung 9 sind die ermittelten Belagsspezifischen spektral abhängigen Geschwindigkeitskorrekturfaktoren für die Reifen PKW (A1) und LKW (D1) dargestellt.



Abbildung 9: Spektrale, Belagsspezifische Geschwindigkeitskorrekturen für die Reifensets PKW (A1) und LKW (D1).

30. November 2020

3.3.5 Belagkategorische und spektrale Korrektur

Die Beläge wurden anhand ihrer Eigenschaften in drei Kategorien eingeteilt (Vgl. Kapitel 3.2). Für diese drei Kategorien wurden spektrale Modelle angeworfen, um die Geschwindigkeitskorrekturfaktoren ermitteln, welche nach Reifentyp unterschieden werden. Dabei liegen in jeder Kategorie verschiedene Belagstypen zugrunde, die gemäss Kapitel 3.2 zu Kategorien gruppiert wurden. Der dargestellte Kategorische Mittelwert stellt also für jede Frequenz den kategorischen Mittelwert dar. Zur Hilfe, wie sich die kategorisierten Mittelwerte zusammensetzen sind in den folgenden Abbildungen ausserdem die zugrundeliegenden einzelnen Geschwindigkeitskorrekturfaktoren der Belagstypen dargestellt.

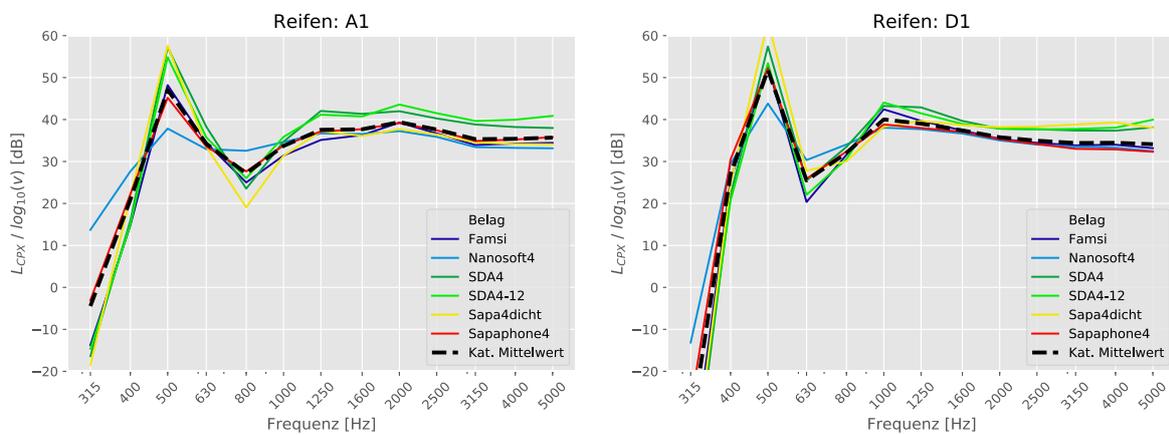


Abbildung 10: Geschwindigkeitskorrekturen gruppierter 4er-Beläge. Die Mittlere Korrektur ist als gestrichelte, schwarze Linie dargestellt.

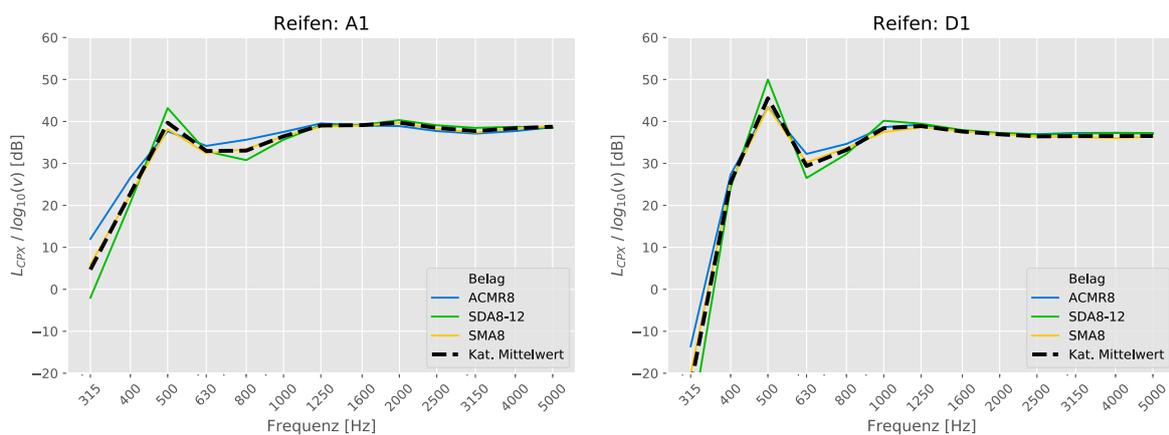


Abbildung 11: Geschwindigkeitskorrekturen gruppierter 8er-Beläge. Die mittlere Korrektur ist als gestrichelte, schwarze Linie dargestellt.

30. November 2020

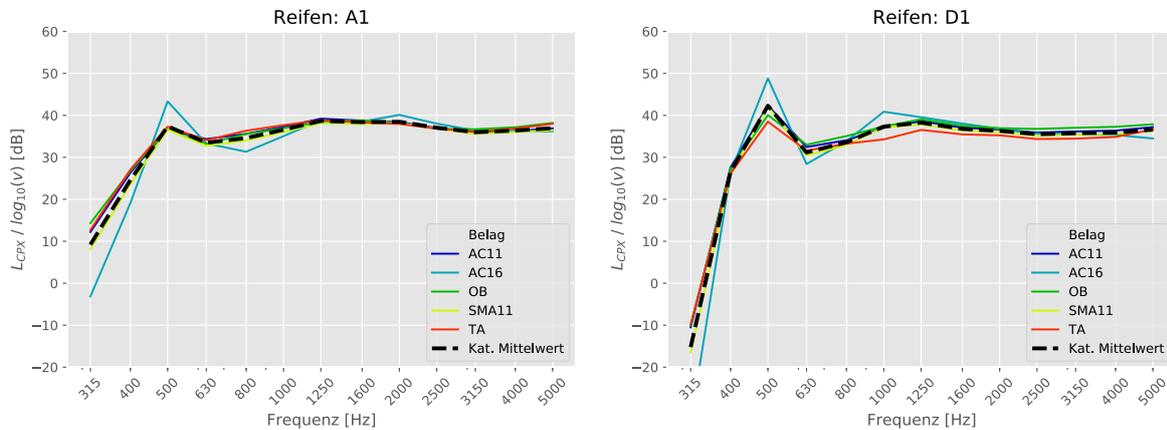


Abbildung 12: Geschwindigkeitskorrekturen gruppierter gröberer und dichter Beläge. Die Mittlere Korrektur ist als gestrichelte, schwarze Linie dargestellt.

3.4 Gesamtpegelverifizierung

Zur Evaluierung der verschiedenen Modelle wurde eine Modellverifizierung durchgeführt. Die Verifizierung wurde mit denselben Messdaten durchgeführt, wie die Modelle gebildet wurden. Eine vollständige Modellvalidierung, mit stratifizierten und unabhängigen Messdaten ist noch ausstehend und geht über das Projektziel hinaus.

Die Modellverifizierung wurde für alle untersuchten Modelle durchgeführt. Um die Modelle, welche auf Belagebene aufgebaut wurden, einem Testfall zu unterziehen, wurden die Modelle auf die einzelnen CPX-Segmente angewandt. Somit weicht der Datensatz des Testfalls geringfügig vom Modellbildungsdatsatz ab. Aus dem Testfall resultiert eine Verteilung aus CPX-Pegeln, welche als Differenz zu den gemessenen CPX-Pegeln dargestellt werden kann.

30. November 2020

3.4.1 Norm – Korrektur

Die ISO-11819-2:2017, «Akustik – Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgereusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren» definiert für die Geschwindigkeitsabweichungen von der Messgeschwindigkeit abhängig vom Belagstyp drei verschiedene Faktoren. Für die Verifizierung des Ansatzes gemäss Norm sind die Messresultate der Messkampagne von 30, 35, 40 und 45 mit dem Normansatz auf die Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h berechnet worden und mit den Resultaten aus der Messkampagne von 50 km/h verglichen worden. Abbildung 13 zeigt somit die Verifizierungsergebnisse der Norm-Korrektur dargestellt, ausgedrückt als $\Delta L_{p,c}$ (Differenz des berechneten und des gemessenen A-bewerteten CPX-Pegels, zwischen der Geschwindigkeit $i \in (30, 35, 40, 45)$ und der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h).

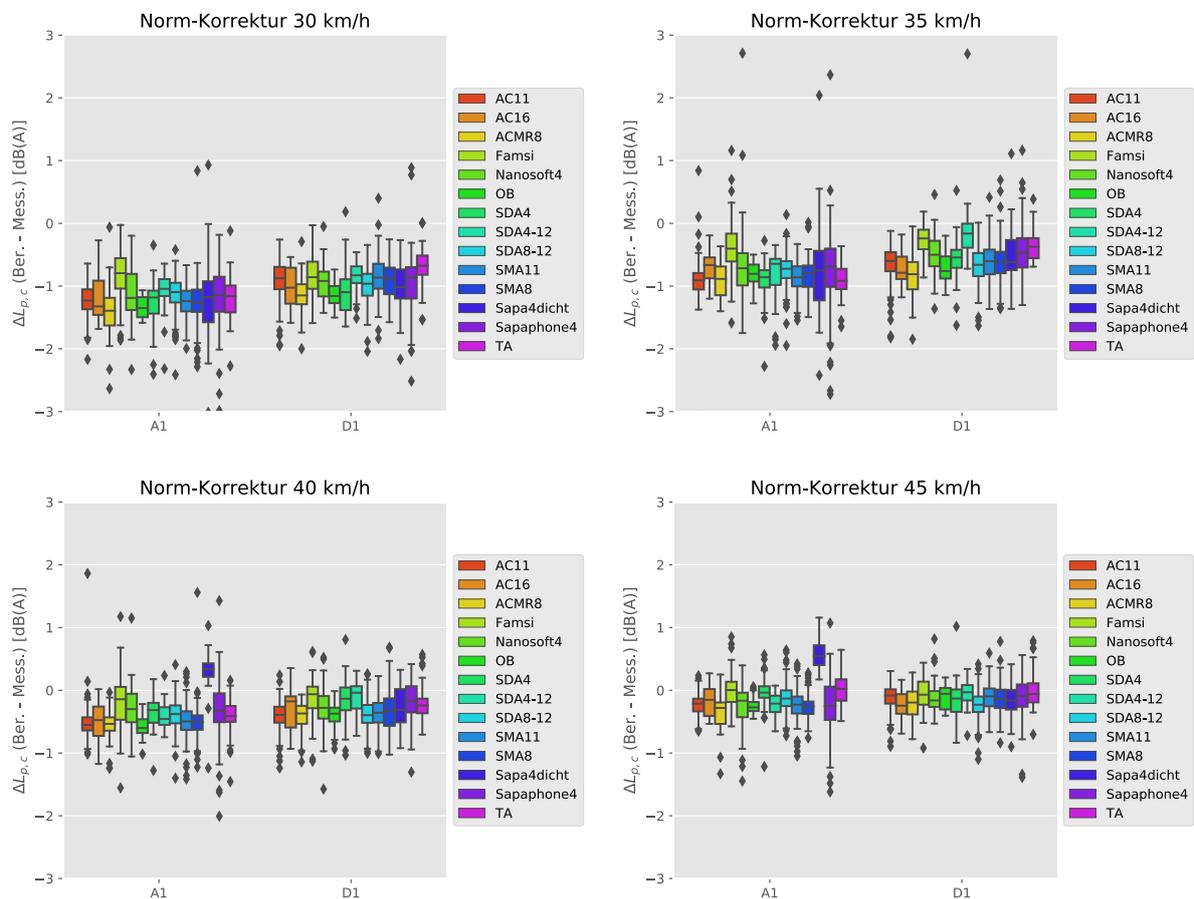


Abbildung 13: Vergleich der Norm-Korrektur für verschiedene Geschwindigkeiten und unterschiedliche Beläge für die beiden Reifen A1 und D1. $\Delta L_{p,c}$ stellt dabei die Differenz des berechneten und des gemessenen A-bewerteten CPX-Pegels, zwischen der Geschwindigkeit $i \in (30, 35, 40, 45)$ und der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h) dar.

In der Abbildung ist ersichtlich, dass die korrigierten CPX-Pegel mit der Normkorrektur im tiefen Geschwindigkeitsbereich deutlich von den effektiv gemessenen Pegeln abweichen. Die Abweichung fällt dabei gleichermassen für A1 und D1-Reifen aus. Die grössten Abweichungen sind für die Geschwindigkeiten von 30 km/h zu beobachten. Mit steigender Messgeschwindigkeit nimmt die Abweichung von Anfänglich über 1 dB(A) Unterschätzung deutlich ab.

30. November 2020

3.4.2 Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur

Die Belagsabhängige Korrektur setzt sich aus individuellen Regressionsgeraden pro Belagstyp auf den Gesamt-CPX-Pegel $L_{p,c}$ zusammen (Vgl. Kapitel 3.3.2). Dabei wird für jeden einzelnen Belagstyp eine eigene Korrektur angewandt.

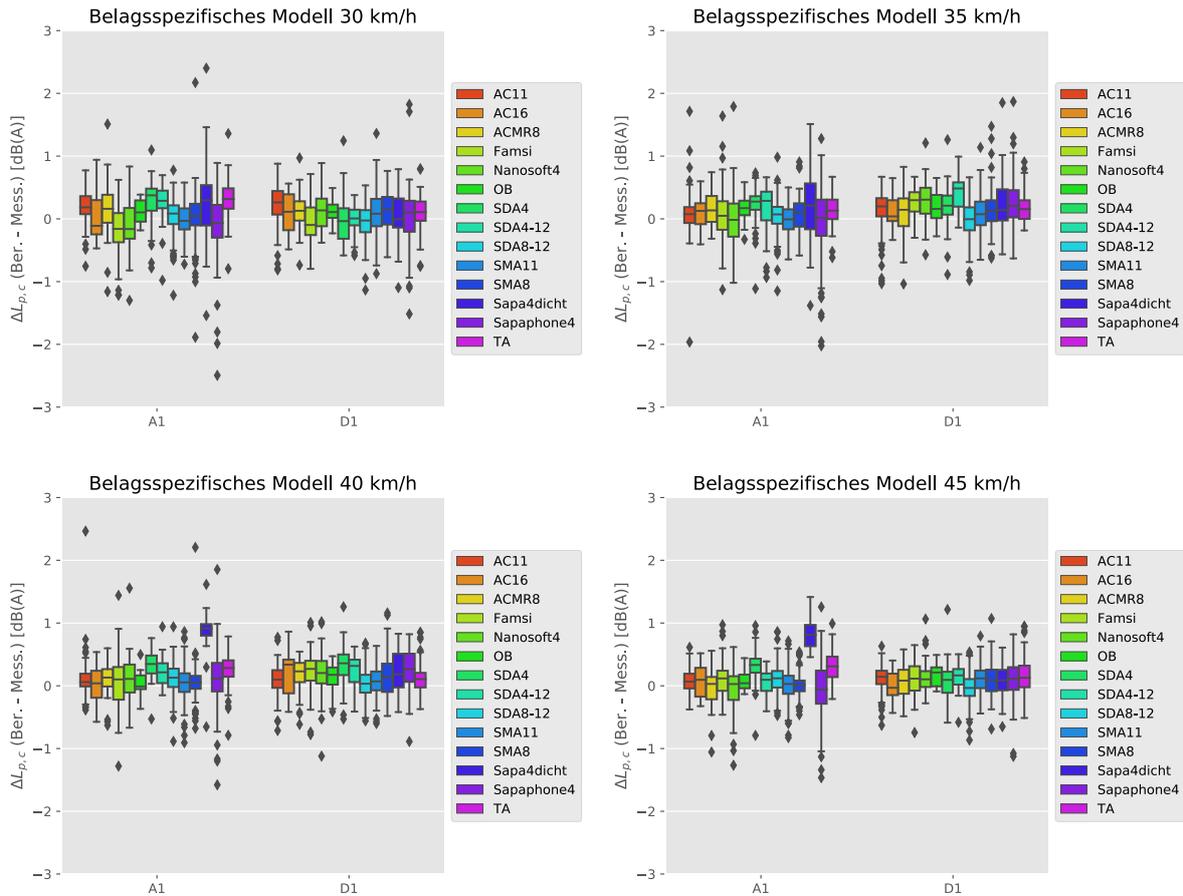


Abbildung 14: Vergleich der belagsabhängigen-Korrektur für verschiedene Geschwindigkeiten und unterschiedliche Beläge für die beiden Reifen A1 und D1. $\Delta L_{p,c}$ stellt dabei die Differenz des berechneten und des gemessenen A-bewerteten CPX-Pegels, zwischen der Geschwindigkeit $i \in (30, 35, 40, 45)$ und der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h) dar.

30. November 2020

3.4.3 Belagskategorische Gesamtpegelkorrektur

Abbildung 15 zeigt die Verifizierung der belagskategorischen Gesamtpegelkorrektur (Vgl. Kapitel 3.3.3). Die Verifizierung wurde für jeden einzelnen Belagstyp vorgenommen.

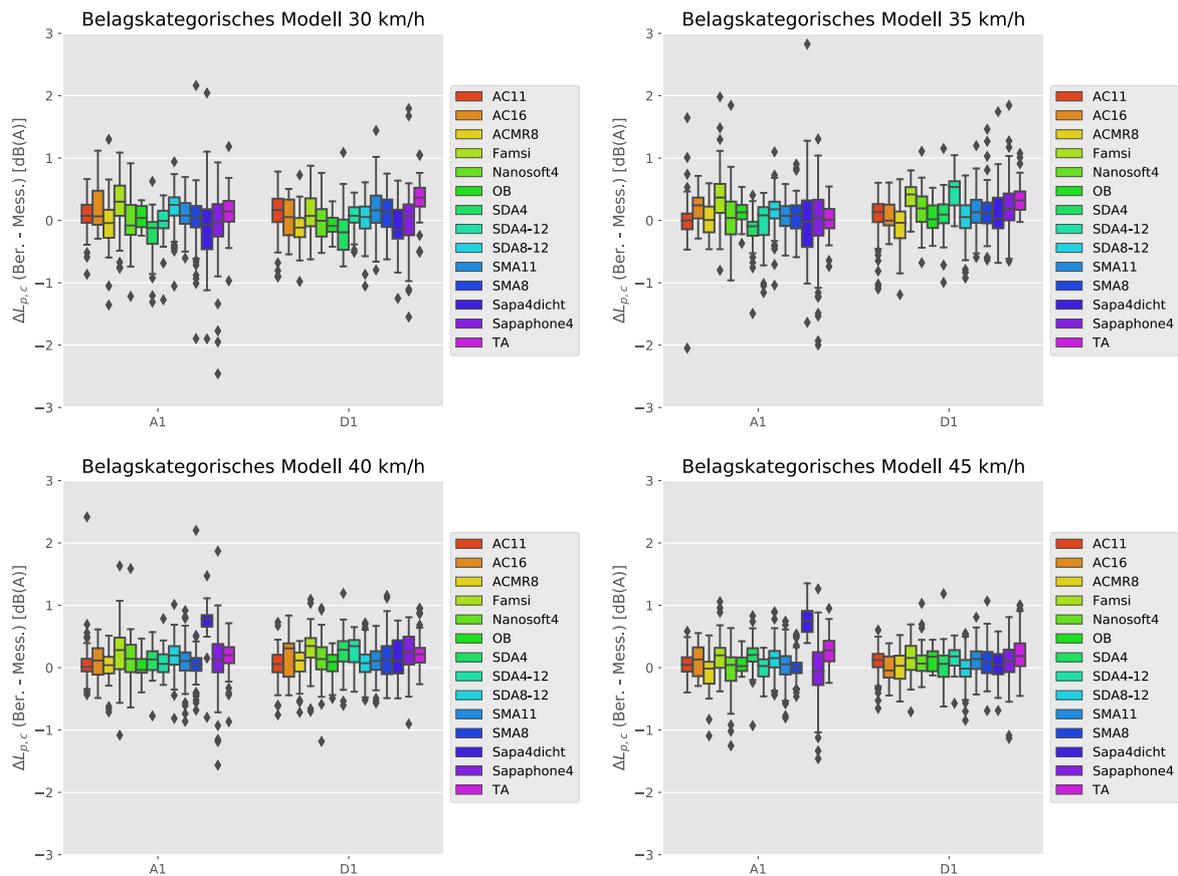


Abbildung 15: Vergleich der belagskategorischen Korrektur für verschiedene Geschwindigkeiten aufgeschlüsselt für die einzelnen Beläge und die beiden Teststreifen A1 und D1. $\Delta L_{p,c}$ stellt dabei die Differenz des berechneten und des gemessenen A-bewerteten CPX-Pegels, zwischen der Geschwindigkeit $i \in \{30, 35, 40, 45\}$ und der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h) dar.

3.4.4 Belagsspezifische und spektrale Korrektur

Die folgende Abbildung 16 zeigt den Vergleich zwischen gemessenen und berechnen (geschwindigkeitskorrigierten) CPX-Pegeln bei den vier untersuchten Geschwindigkeiten. Der CPX-Pegel setzt sich aus den energetisch summierten Terzband-CPX – Pegeln zusammen.

30. November 2020

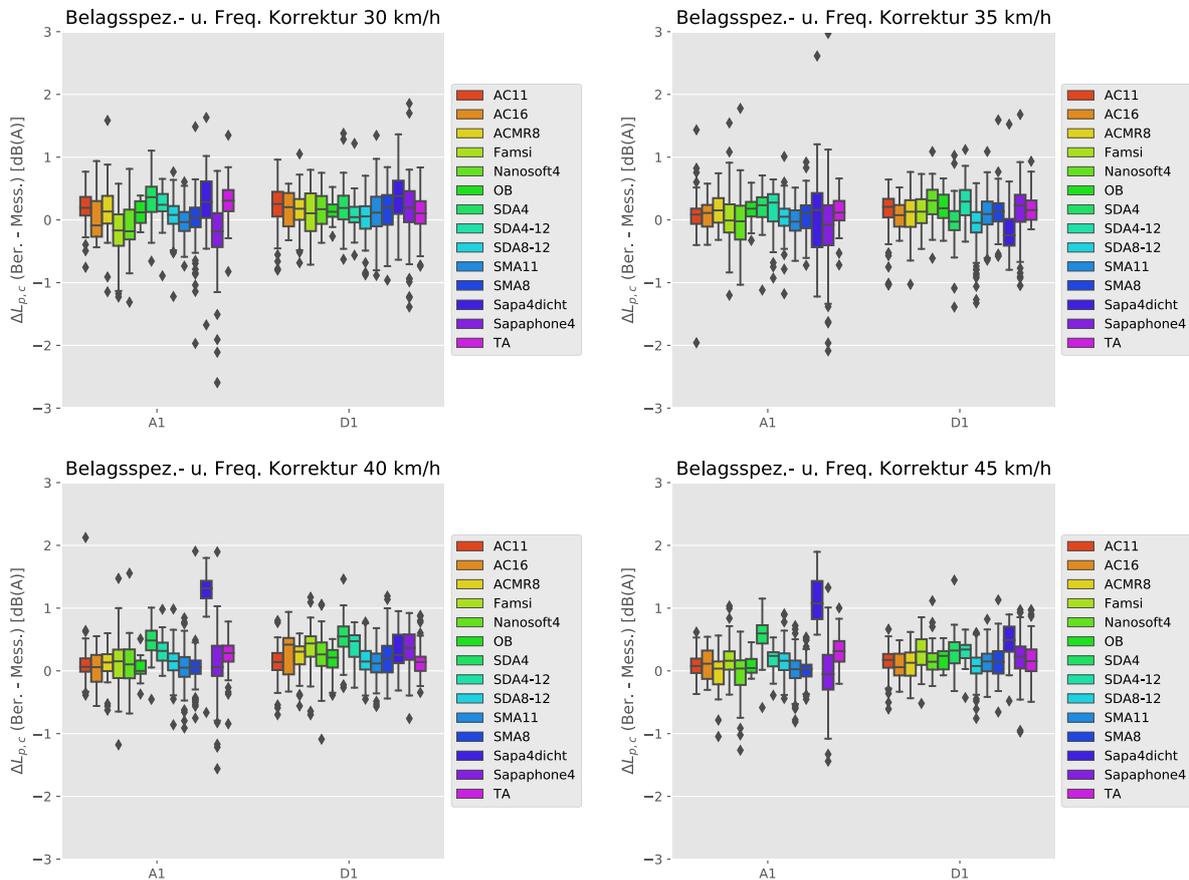


Abbildung 16: Vergleich der belagsabhängigen-Korrektur für verschiedene Geschwindigkeiten und unterschiedliche Beläge für die beiden Reifen A1 und D1. $\Delta L_{p,c}$ stellt dabei die Differenz des berechneten und des gemessenen A-bewerteten CPX-Pegels, zwischen der Geschwindigkeit $i \in (30, 35, 40, 45)$ und der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h) dar.

Es zeigt sich, dass die frequenz- und belagsabhängige Korrektur über alle Geschwindigkeitsbereiche für LKW und PKW – Pneu sehr gute Werte abliefern. Eine Ausnahme stellt der Sapaphone4 Belag für die Geschwindigkeiten 40 und 45 km/h dar.

Der Grund für diese Ausreisser bei diesen Geschwindigkeiten ist in der Modellbildung, respektive den Grundlegendaten bei den Geschwindigkeiten 40 km/h und 45 km/h zu suchen. In Abbildung 17 sind dazu die Regressionsgeraden für den Belag Sapa4dicht und Sapaphone4 dargestellt. Beim Reifen «A1» zeigen sich bei den Geschwindigkeiten 40 km/h und 45 km/h leichte Abweichungen zu der Regressionsgeraden. Diese Abweichungen widerspiegeln sich ebenfalls in den Verifizierungsberechnungen der Abbildung 16

30. November 2020

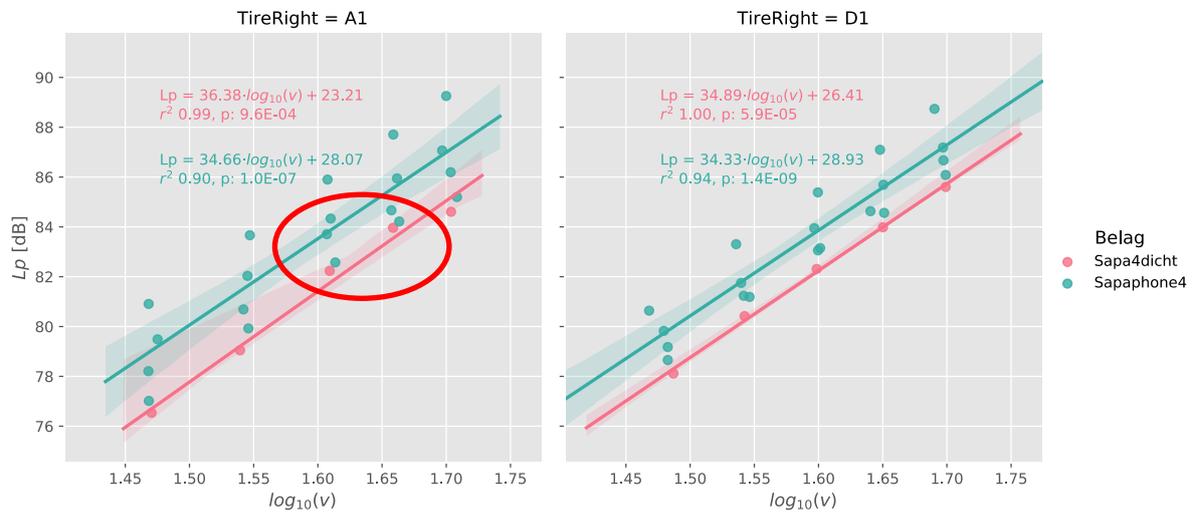


Abbildung 17: Modellbildung für die Beläge Sapaphone4 und Sapa4dicht. Dargestellt sind die Regressionsgeraden des CPX-Pegels L_p gegen die logarithmierte Geschwindigkeit $\log_{10}(v)$ für die beiden Reifen.

30. November 2020

3.4.5 Belagskategorische und spektrale Korrektur

Abbildung 18 zeigt die Verifizierungsergebnisse für die Belagskategorisierte, spektrale Geschwindigkeitskorrektur für die vier von 50 km/h abweichenden Messgeschwindigkeiten.

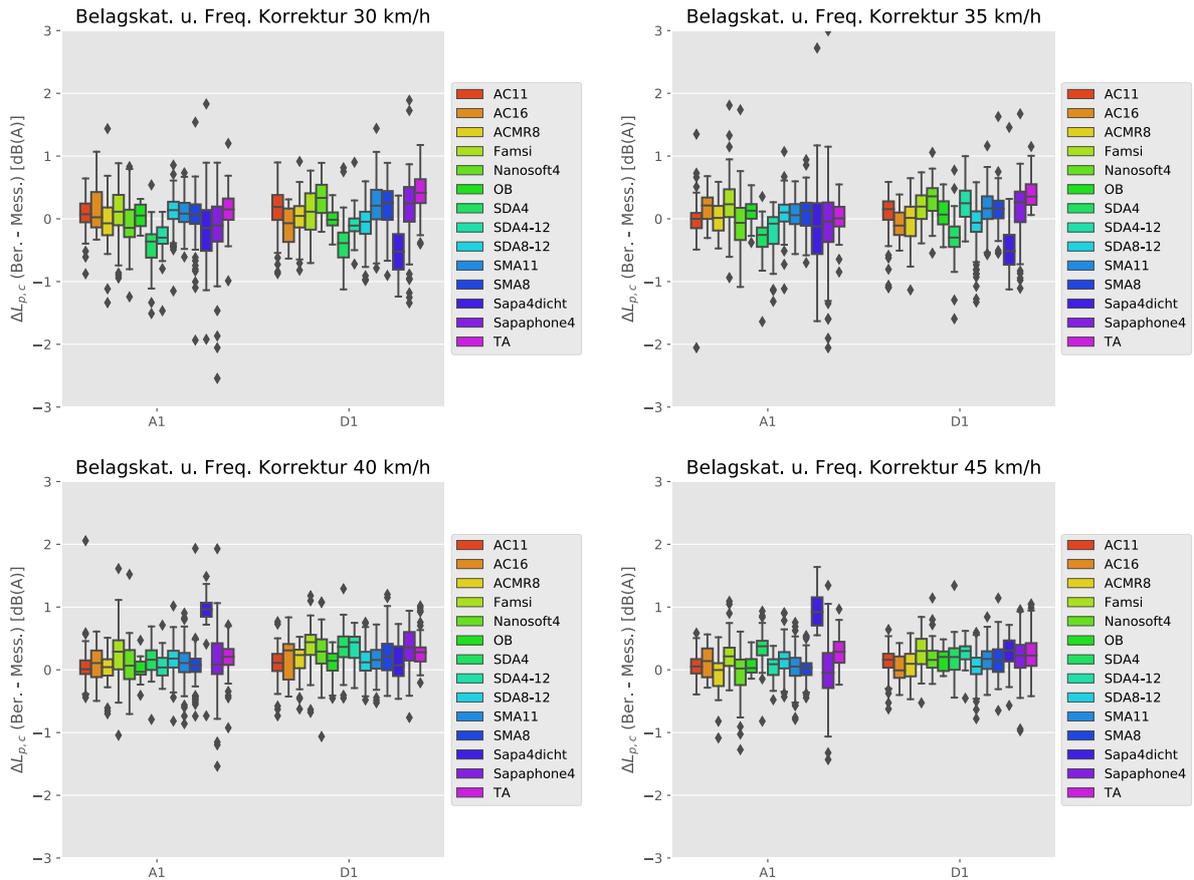


Abbildung 18: Vergleich der Korrektur für verschiedene Geschwindigkeiten und unterschiedliche Beläge für die beiden Reifen A1 und D1. $\Delta L_{p,c}$ stellt dabei die Differenz des berechneten und des gemessenen A-bewerteten CPX-Pegels, zwischen der Geschwindigkeit $i \in \{30, 35, 40, 45\}$ und der Referenzgeschwindigkeit 50 km/h) dar.

30. November 2020

3.5 Spektrale Verifizierung

In diesem Kapitel werden zwei einzelne Geschwindigkeitskorrekturschemen auf die CPX-Frequenzpegel angewendet. Die Geschwindigkeitskorrektur ist sowohl in der Norm als Gesamtpegelmodell linear für alle Frequenzen definiert. Das heisst, dass alle Frequenzen mit den gleichen Faktoren korrigiert werden. Angewandt auf das gesamte Terzbandspektrum der CPX-Pegel ergeben sich für das Norm- und das Belagsspezifische Korrekturschema teilweise grössere Differenzen im Vergleich zu spektralen Korrekturmodellen.

30. November 2020

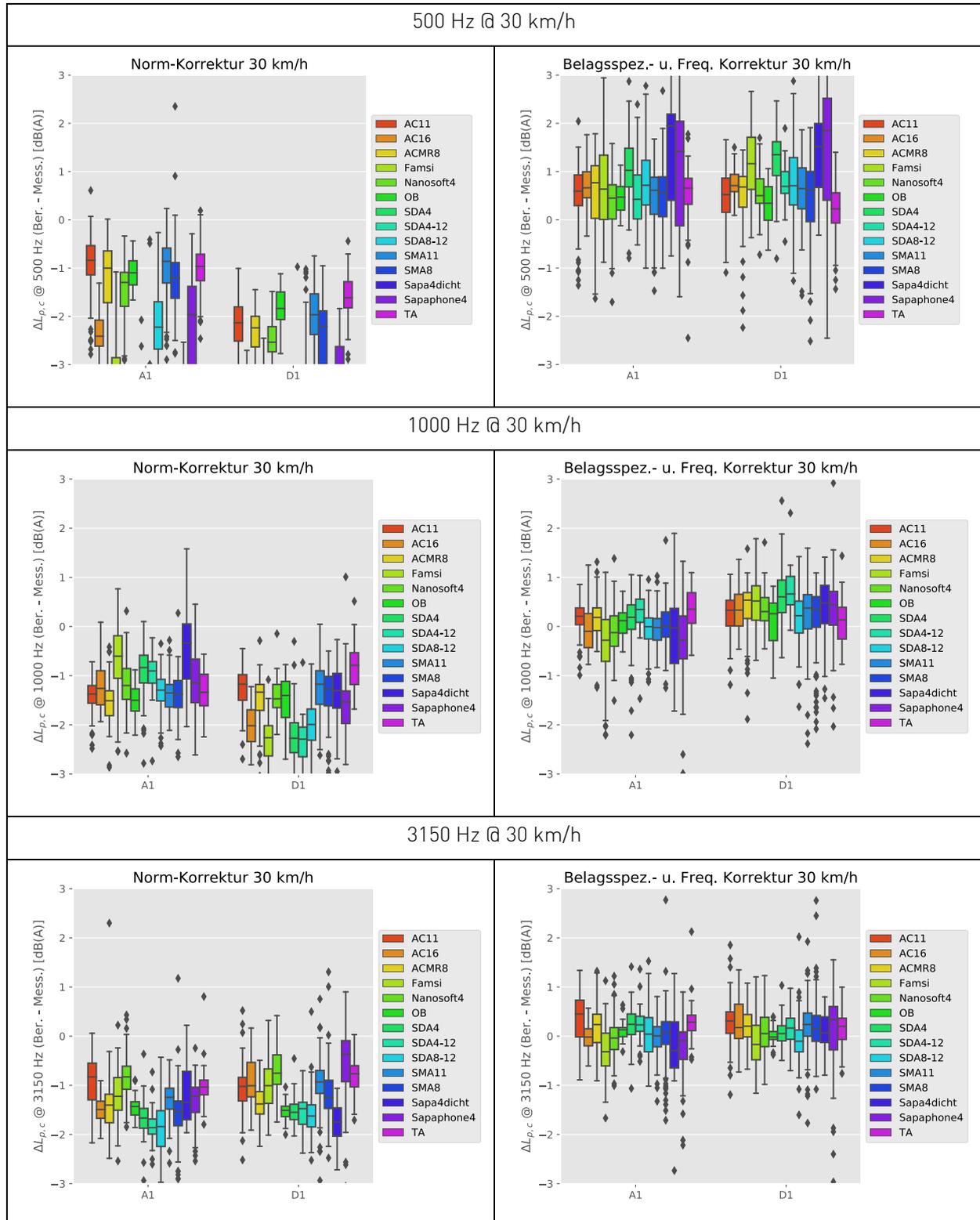


Abbildung 19: Vergleich von dem Norm-Geschwindigkeitskorrekturmodell und dem spektralen, belagsspezifischen Geschwindigkeitsmodell bei drei Terzbändern und 30 km/h. Dargestellt ist jeweils die Differenz des berechneten – des gemessenen Terzbandpegels

In Abbildung 19 zeigt sich, dass die globalen Korrekturen nur sehr bedingt auf einzelne Frequenzbänder angewendet werden können. Das spektrale, belagsspezifische Geschwindigkeitskorrekturmodell kann die gemessenen Terzbandpegel über alle Frequenzen sehr gut abbilden. Bei den tiefen Frequenzen ergibt sich hingegen eine grössere Streuung. Diese Streuung lässt sich allerdings mit dem gewählten linearen Modellansatz erklären. (Siehe Kapitel 3.1.1)

30. November 2020

4. Diskussion

In der Studie «Untersuchung zur Entwicklung einer Methodik zur Auswertung von CPX-Messungen bei Tempo 30 und 40» wurden verschiedene Modelle entwickelt, welche eine Umrechnung von gemessenen CPX-Pegeln bei niedrigen Geschwindigkeiten auf die Normgeschwindigkeit von 50 km/h zulassen. Die Modelle weisen einen unterschiedlichen Komplexitätsgrad auf und reichen von ganz einfachen Gesamtpegel-Modellen, bis hin zu spektralen und belagsspezifischen Geschwindigkeitskorrekturmodellen.

4.1 Frequenzabhängigkeit der Korrektur

Innerhalb des Projektes wurde die Umrechnung von CPX-Pegeln bei niedrigeren Geschwindigkeiten auf CPX-Pegel bei Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h mit der Normkorrektur als Gesamtpegelkorrektur mit Messungen verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Normkorrektur den Gesamtpegel gerade bei niedrigen Geschwindigkeiten deutlich unterschätzt.

Die Geschwindigkeitskorrekturkoeffizienten verlaufen bei tiefen Frequenzen eigentlich mehrheitlich deutlich tiefer als von der Norm vorgeschlagen. Gerade bei tiefen Frequenzen zeigte sich, dass eine globale Gesamtpegelkorrektur, in einzelnen Terzbändern zu grossen Abweichungen führen kann.

Weiter wurde bei einigen tieferen Frequenzen, insbesondere bei 400 Hz, ein negativ quadratischer Zusammenhang zwischen CPX-Pegeln und Geschwindigkeiten festgestellt. Dabei zeigt sich das Muster besonders deutlich beim Reifen D1. Es kann daher vermutet werden, dass die auftretenden Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeit und abgestrahltem Schall in diesem Frequenzband stark mit der Profilierung des Reifens und somit dem Abstand der einzelnen Reifenblöcke zusammenhängt (Die Lärmentstehung verschiebt sich somit zwischen den einzelnen Terzbändern). Dieser Umstand wird in einer gesamtheitlichen, linearen Korrektur, wie die Normkorrektur völlig vernachlässigt und führt somit in den einzelnen Terzbändern sowie schlussendlich im Gesamtpegel zu deutlichen Unterschieden. Die quadratische Geschwindigkeitsabhängigkeit bei gewissen Terzbändern wurde in den in diesem Forschungsprojekt entwickelten spektralen Korrekturmodellen ebenfalls nicht berücksichtigt. Die spektralen Korrekturen wurden jeweils nur linear angewandt. Das lineare Modell ist in der Praxis deutlich einfacher handhabbar, und vermag zumindest dem Trend der Geschwindigkeitsabhängigkeit folgen. Im Falle einer detaillierten Frequenzanalyse muss die quadratische Abhängigkeit weiter untersucht und in die Auswertung einbezogen werden.

4.2 Altersabhängigkeit der Geschwindigkeitskorrektur

Bei der Entwicklung der Methodik zeigte sich ebenfalls, dass die Korrekturfaktoren deutlich vom Alter/Zustand der Beläge abhängen. Von einem Modell, was diesen Umstand Rechnung trägt, wurde aber innerhalb dieses Projektes abgesehen. Denn die verfügbare Datengrundlage war zu klein für ein statistisch robustes und breit anwendbares Modell zu erstellen, das viele Belagszustände abdeckt.

30. November 2020

4.3 Modellklassifizierung

Jedes untersuchte Modell weist bezüglich Komplexität, Praktikabilität, Robustheit und der Zuverlässigkeit der Abbildung von Gesamt- und Terzbandpegel unterschiedliche Vor- und Nachteile bezüglich der Umrechnung von CPX-Pegeln von 30 km/h auf 50 km/h auf. Diese sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Legende der Tabelle:

++	Grosser Vorteil
+	Vorteil
+-	Eher vorteilig
-+	Eher nachteilig
-	Nachteil
--	Grosser Nachteil

Modellname	Komplexität	Praktikabilität	Robustheit	Abbildung Gesamtpegel	Abbildung Frequenzbereich
Norm-Korrektur	++	++	+	-	--
Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur	-+	-	+-	+	-
Belagskategorische Gesamtpegelkorrektur	+	+	+	+	-
Belagsspezifische, spektrale Korrektur	--	--	-	+	++
Belagskategorische, spektrale Korrektur	+-	+	+	+	+-

30. November 2020

- Normkorrektur → Unzureichend bezüglich Zuverlässigkeit der abgebildeten Gesamt- und Terzbandpegel
- Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur: Ermitteln von fehlenden Belägen sehr aufwändig und wenig praktikabel. Gefahr von overfitting durch nicht ausreichend repräsentative Datengrundlage.
- Belagskategorische Gesamtpegelkorrektur: Einfaches Modell, breite Anwendbarkeit. Vernachlässigung der frequenzspezifischen Geschwindigkeitsabhängigkeit.
- Belagsspezifische, spektrale Korrektur: Unpraktikabel in Bezug auf fehlende Beläge. Gefahr von overfitting durch nicht ausreichend repräsentative Datengrundlage.
- Belagskategorische, spektrale Korrektur: Korrekturverfahren von mittlerer Komplexität. Robuste Resultate in Bezug auf Gesamtpegel. Tiefer Frequenzbereich wird besser abgebildet als mit Gesamtpegelkorrekturen.

4.4 Kommentare zu den Modellen

Allgemein sollte berücksichtigt werden, dass die ermittelten Grundlagendaten auf spezifischen Belägen im Kanton Freiburg und Aargau ermittelt wurden. Die Repräsentativität und die Übertragbarkeit der Daten und der damit ermittelten Korrekturmodelle können an anderen Standorten weniger gut ausfallen. Mit der durchgeführten Verifizierung konnten die Modelle an den gemessenen Standorten überprüft werden. Ob die Modelle sich auch an anderen Messstandorten mit unterschiedlichen Belagstypen, sowie Belagszuständen anwendbar sind, sollte in einer Validierung überprüft werden.

30. November 2020

5. Weiterer Forschungsbedarf

Im Rahmen des Projektes hat sich gezeigt, dass das Geschwindigkeitsverhalten von Reifen-Fahrbahngeräuschen durch unterschiedliche Lärmentstehungsmechanismen beeinflusst wird. Im Forschungsprojekt wurde für eine möglichst hohe Repräsentativität eine Vielzahl an unterschiedlichen Belägen und Belagszuständen erfasst und damit verschiedene Modellansätze entwickelt. Mit fortschreitender Forschung haben innerhalb der ursprünglichen Fragestellung sich weitere Fragen gestellt, welche weiteren Forschungsbedarf aufgezeigt:

- Weitere Datenerhebung und Analysen für die Handhabung Belagsalter/Zustände. Damit kann einerseits die Robustheit der erstellten Modelle verifiziert und verbessert werden. Andererseits können spezifische Einflüsse der Alterung auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit untersucht werden.
- Mit zusätzlichen Daten kann dem nichtlinearen Verhalten bei niedrigen Frequenzen besser nachgegangen werden und allenfalls verbesserte Geschwindigkeitskorrekturfaktoren ermittelt werden.
- Die erstellten Modelle sollten mit unabhängigen Messdaten überprüft und verifiziert werden.

Grolimund + Partner AG



Felix Schlatter

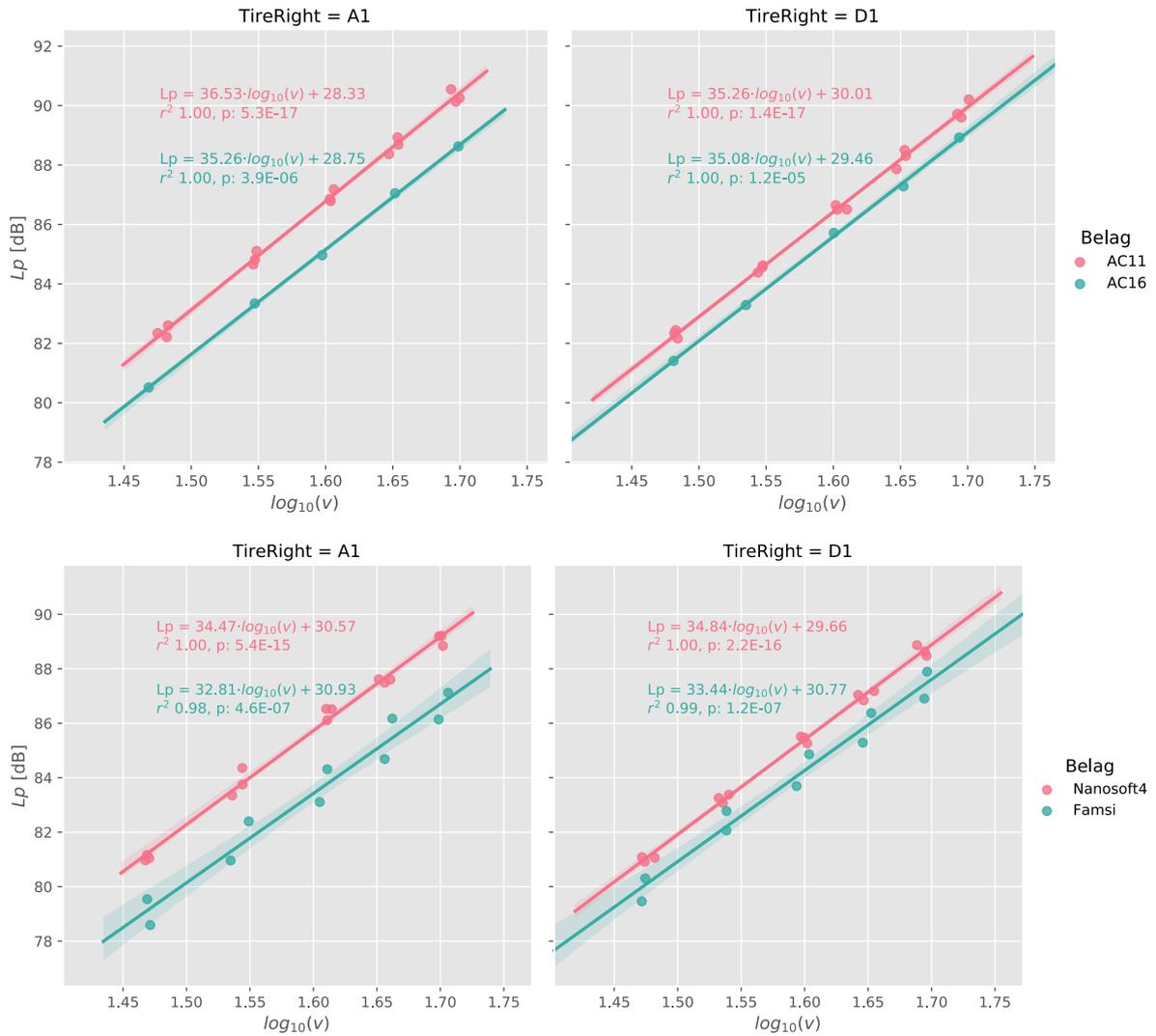


Erik Bühlmann

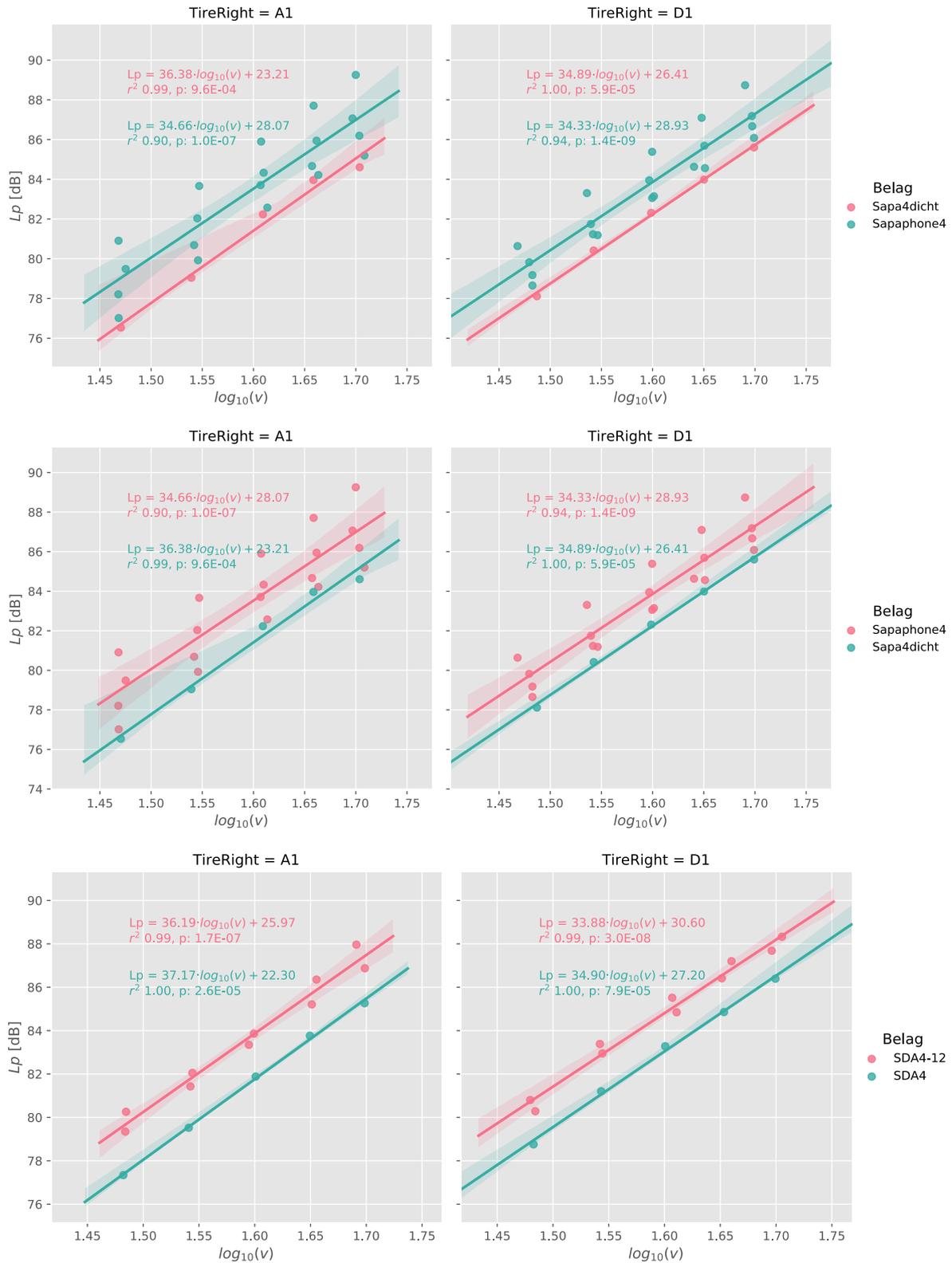
30. November 2020

Anhang

I Belagsspezifische Gesamtpegelkorrektur



30. November 2020



30. November 2020

