



Wirkung kombinierter Lärmschutzmassnahmen: Tempo 30 und lärmarme Strassenbeläge

Forschungsprojekt

10. Mai 2022
Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

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, 3006 Bern

Autor/Autorin: Johannes Schindler, Felix Schlatter, Tina Saurer, Erik Bühlmann

Begleitung BAFU: Sarah Stéhly, Simon Steiner, Dominique Schneuwly, Alexia Roschi, Sophie Hoehn

Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

Abstract

Als effektive Lärmschutzmassnahmen an der Quelle sind sowohl lärmarme Strassenbeläge als auch Temporeduktionen etabliert. Um Aussagen zur kombinierten Lärmwirkung beider Massnahmen – Tempo 30 und lärmarmen Strassenbelag – zu machen, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes Langzeitmessungen an sechs Standorten mit lärmarmen, semi-dichten Asphalt (SDA 4, SDA 8) und konventionellem Belag durchgeführt.

Die Messungen von Lärmimmissionen und Verkehrsdaten umfassen dabei je mindestens zehn Tage, in welchen die geltende Geschwindigkeit für mindestens drei Tage von 50 km/h auf 30 km/h umsignaliert wurde. So konnte die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA Belägen in Echtbedingungen erfasst werden. Im Rahmen dieses Projekts wurden standortübergreifend Einflüsse auf die Lärmwirkung analysiert.

Die Lärmwirkung einer Temporeduktion bei SDA Belägen ist im Vergleich zu konventionellen Belägen kleiner. Da eine Temporeduktion zu einer Minderung des Rollgeräuschs (Anregung, Entlüftung und Schallabsorption) führt, wird bei konventionellen Belägen, welche über einen höheren Rollgeräuschanteil als SDA Beläge verfügen, eine entsprechend grössere Lärmwirkung erzielt. Es zeigt sich, dass für SDA Beläge die Lärmwirkung einer Temporeduktion nicht primär durch die akustische Belagsgüte beeinflusst wird, sondern im Rahmen der Messunsicherheiten für alle untersuchten SDA Beläge vergleichbar gross ist. Bei der Beurteilung der kombinierten Wirkung von lärmarmen Strassenbelägen und Temporeduktionen ist hingegen die akustische Belagsgüte sehr wohl massgebend als direkte Einflussgrösse auf die akustische Wirkung des Belagsersatzes. Zudem konnte eine leichte Abhängigkeit der Lärmwirkung einer Temporeduktion von der Verkehrszusammensetzung bestimmt werden - bei niedrigem Schwerverkehrsanteil fällt diese höher aus als bei hohem Schwerverkehrsanteil.

Basierend auf den Messdaten der vier Standorte mit SDA 4 Belag wurden empirische Konstanten ermittelt um die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen rechnerisch in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit sowie des Schwerverkehrsanteils zu prognostizieren. Zusammen mit der verbundenen Unsicherheitsangabe sind diese Ergebnisse für typische Eingangswerte in Nachschlagetabellen zusammengefasst. Bei einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h auf SDA 4 Belag sind demnach in Abhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil (15 % bis 0 %) Lärmreduktionen um 1.9 dB bis 2.5 dB zu erwarten. Zur Prognose einer kombinierten Wirkung von Belagsersatz zu SDA 4 und einer Temporeduktion kann diese Wirkung direkt zur Belagswirkung addiert werden (gemäss der etablierten Praxis basierend auf der Differenz der Belagskennwerte bei 50 km/h).

Im Vergleich mit den Strassenlärmmodellen *sonROAD18* (empfohlen seit 2021) und *Modell VSS* (Lärmwirkung von Tempo 30, 2017) zeigen sich in erster Linie vergleichbare Wirkungsprognosen mit einer reduzierten Modellabhängigkeit vom Schwerverkehrsanteil für die hier erarbeitete empirische Methode. Dies ist in Übereinstimmung mit früheren Studien zum Einfluss der Schwerverkehrs-Geschwindigkeiten auf den Strassenlärm.

Während diese Studie die Lärmwirkung von Temporeduktionen auf SDA Belägen detailliert untersucht, besteht weiterer Forschungsbedarf in der direkten Bestimmung der Belagswirkung von lärmarmen Strassenbelägen bei reduzierten Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der Verkehrszusammensetzung, Fahrverhalten und weiteren Einflussfaktoren.

Inhalt

1.	Einleitung und Hintergrund.....	6
1.1	Lärmschutzmassnahmen an der Quelle.....	6
1.2	Bestehende Modelle.....	6
1.3	Ziel der Forschungsarbeit.....	7
2.	Messkonzept, Messmethoden und Messkampagne	8
2.1	Messkonzept.....	8
2.2	Standortwahl	8
2.3	Messmethoden	10
2.4	Messkampagne	12
3.	Datenaufbereitung	14
3.1	Konzept	14
3.2	Aufbereitung Verkehrsdaten.....	14
3.3	Aufbereitung Lärmmessungen.....	15
3.4	Aufbereitung CPX Messung	17
3.5	Korrekturen und Normalisierung.....	17
3.6	Synthese.....	19
4.	Ergebnisse.....	21
4.1	Wirkung von Umsignalisation je Standort	21
4.2	Lärmwirkung von Temporeduktion	24
4.3	Lärmwirkung von Belag	29
4.4	Lärmwirkung kombinierter Lärmschutzmassnahmen Tempo 30 und LAB.....	29
5.	Bezug zu bestehenden Modellen	33
6.	Synthese: Matrix zur Wirkungsabschätzung	36
6.1	Wirkungsprognose Temporeduktion auf SDA 4.....	36
6.2	Wirkungsprognose Temporeduktion kombiniert mit Belagsersatz zu SDA 4.....	38
6.3	Wirkungsprognose Belagsersatz zu SDA 4 bei bestehender Tempo 30 Situation	38
6.4	Anwendungsbeispiele	39
6.5	Leitfaden zur Auswahl der Berechnungsmethode	41
7.	Zusammenfassung und Ausblick.....	43

Anhang

I	Abkürzungen und Glossar.....	45
II	Literaturverzeichnis.....	47
III	Abbildungsverzeichnis.....	48
IV	Tabellenverzeichnis	50
V	Standortdetails Aarau, Entfelderstrasse	51

VI	Standortdetails Brugg, Zurzacherstrasse	53
VII	Standortdetails Küttigen, Bibersteinerstrasse	55
VIII	Standortdetails Luzern, Ruopigenstrasse	57
IX	Standortdetails Safenwil, Köllikerstrasse	59
X	Standortdetails Sulz, Hauptstrasse	61
XI	Lärmwirkung durch Temporeduktion je Standort	63
XII	Lärmwirkung durch Temporeduktion nach N2-Kategorie	65
XIII	Modellierungsergebnisse lineare Regression nach $\lg(v50)$	67
XIV	Matrix zur Wirkungsabschätzung	68

1. Einleitung und Hintergrund

1.1 Lärmschutzmassnahmen an der Quelle

Zum Schutz der Bevölkerung vor übermässigem Strassenlärm sind gemäss Umweltschutzgesetz [1] und Lärmschutzverordnung [2] in erster Priorität Massnahmen an der Lärmquelle umzusetzen. Im Gegensatz zu Lärmschutzmassnahmen (LSM) auf dem Ausbreitungsweg, wie z.B. Lärmschutzwände oder Schallschutzfenster, wirken LSM an der Quelle flächendeckend und bieten Lärmschutz für viele Personen. Spätestens mit Inkrafttreten des Nationalen Massnahmenplans zur Verringerung der Lärmbelastung im Jahr 2017 [3] sind LSM an der Quelle schweizweit als primäres Instrument in der Daueraufgabe Lärmschutz etabliert [4].

Als Lärmschutzmassnahmen an der Quelle werden besonders lärmarme Strassenbeläge (LAB) und Temporeduktionen eingesetzt, zusätzliche Möglichkeiten bestehen im Einsatz leiser Reifen, Verkehrsklenkungsmassnahmen oder Sensibilisierungskampagnen zu Strassenlärm und Fahrverhalten.

Dank diversen Forschungsprojekten und der Praxiserfahrung der letzten Jahre konnten viele Fragen zum praktischen Einsatz von LAB und deren Lärminderung geklärt werden [5]. In der Schweiz wurde in den letzten Jahren in fast in allen Kantonen eine grosse Anzahl semidichter Asphalte (SDA) im Innerortsbereich eingebaut. Durch die neu gewonnenen Erkenntnisse etablierten sich LAB als wichtigste Lärmschutzmassnahme an der Quelle [6]. Wo die Lärmbelastung besonders hoch ist, reicht die langfristig erzielte Lärminderung von LAB jedoch nicht immer aus, um die Lärmimmissionen unter die geltenden Grenzwerte zu bringen [4].

Aktuelle Forschungsarbeiten und Praxisbeispiele haben weiter gezeigt, dass Tempo 30 auch auf stark lärmbelasteten Hauptverkehrsachsen eine effektive Lärmschutzmassnahme an der Quelle darstellen kann [7]. Vermehrt beschäftigen sich die Kantone, Städte und Gemeinden mit Temporeduktionen als effektive und kostengünstige Lärmschutzmassnahme, wie beispielsweise die geplante, fast flächendeckende Umsetzung von Tempo 30 nachts in der Stadt Lausanne [8]. Doch auch bei der Massnahme Tempo 30 reichen die realisierten Lärminderungen nicht immer aus, um die Lärmbelastungen unter die Grenzwerte zu senken.

Um die Bevölkerung an stark lärmbelasteten Strassen ausreichend zu schützen, können die Lärmschutzmassnahmen LAB und Tempo 30 kombiniert zur Anwendung kommen. Bei einer Massnahmenkombination kommt es bei beiden Massnahmen zu einer Verminderung der realisierten Wirkung¹. Zudem variiert die Wirkung von kombinierten Massnahmen als Funktion diverser Einflussfaktoren. Die Wirkungsmechanismen bei der kombinierten Anwendung sind bisher kaum erforscht und werden im Rahmen dieser Studie mit Messungen unter Echtbedingungen untersucht.

1.2 Bestehende Modelle

Aufgrund dem im bestehenden Verkehrslärmmodell StL-86+ nur mangelhaft abgedecktem tiefem Geschwindigkeitsbereich unter 50 km/h, wurden in dem im Jahr 2017 publizierten VSS Bericht *Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30* [9] gezielt Messdaten zu Lärmemissionen eines

¹ Durch eine Verschiebung der Quellenanteile von Roll- und Antriebsgeräusch bei niedrigen Geschwindigkeiten reduziert sich die Wirksamkeit des LAB, wie z.B. im Strassenlärmmodell *sonROAD18* abgebildet.

aktuellen Fahrzeugparks bei Geschwindigkeiten um 30 km/h erhoben und in eine Quellformulierung überführt. Auch das seit 2021 gültige Strassenlärmmodell *sonROAD18* [10] deckt tiefere Geschwindigkeiten ab und verfügt zudem über eine Belagsschnittstelle die LAB in der Emissionsberechnung berücksichtigt. In beiden Fällen ist die ausgewiesene kombinierte Wirkung von Tempo 30 und LAB jedoch rein rechnerisch ermittelt und wurde nicht mit direkten Messdaten überprüft.

1.3 Ziel der Forschungsarbeit

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde mit gezielten Lärmmessungen unter Echtbedingungen untersucht, welche Parameter die Wirkung der kombinierten Lärmschutzmassnahmen Tempo 30 und LAB beeinflussen und wie gross diese ist. Hierzu wurden an verschiedenen Standorten mit SDA Belägen und einem Standort mit konventionellem Strassenbelag Langzeitmessungen zu Lärmimmissionen und Verkehrsmenge, Verkehrszusammensetzung und Geschwindigkeiten in zwei verschiedenen Signalisationsregimes (Tempo 50 und Tempo 30) durchgeführt. Damit kann die Wirkung einer Temporeduktion auf LAB abgeschätzt werden und basierend darauf eine empirische Methode zur Wirkungsabschätzung etabliert werden.

2. Messkonzept, Messmethoden und Messkampagne

2.1 Messkonzept

Um Aussagen über die Wirkung einer Kombination der Lärmschutzmassnahmen LAB und Tempo 30 machen zu können, wurden an verschiedenen Standorten mit bestehendem LAB die Lärmimmissionen in Abhängigkeit von der effektiven mittleren Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer erfasst. Hierzu ist eine ausreichende Bandbreite der Geschwindigkeitsvariation nötig um die Wirkung einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h nachvollziehen zu können.

Zudem ist die Wirkung beider Massnahmen von weiteren Einflussgrössen abhängig, z.B. der Verkehrszusammensetzung, dem Verkehrsregime oder der akustischen Belagsgüte und Bauart des Strassenbelags. Um diese möglichen Einflüsse zu erfassen ist eine Variation des entsprechenden Parameters nötig. Die Verkehrszusammensetzung und das Verkehrsregime variieren je Standort über die Tageszeit. Durch die Wahl von Standorten mit SDA Belägen unterschiedlicher akustischer Belagsgüte und Korngrösse konnte zudem der betrachtete Strassenbelag variiert werden. Zusätzlich wurde ein Standort mit Strassenbelag konventioneller Bauweise gewählt.

Um dieses Messkonzept mit «Echtbedingungen» umzusetzen, wurden an den gewählten Standorten über mehrere Wochen Lärmimmissionsmessungen kombiniert mit Verkehrserhebungen durchgeführt. Zudem wurde für jede Strecke die akustische Belagsgüte mittels Close-Proximity-Methode (CPX Messung, siehe Kapitel 2.3.3) erfasst. Die so ermittelten Parameter zu Verkehr (Verkehrslast, Verkehrszusammensetzung und Geschwindigkeiten), Strasse (Belagsgüte, Belagstyp) und Lärmimmission ermöglichen eine Ableitung genereller Wirkmechanismen in Bezug auf die Kombination der beiden Lärmschutzmassnahmen LAB und Tempo 30.

2.2 Standortwahl

Eine Vorstudie zeigte, dass die natürliche Geschwindigkeitsvariation im Tagesverlauf an geeigneten Standorten zwar ausreichend bezüglich der erfassten Geschwindigkeitsbandbreite ist, jedoch stark durch unterschiedliche Verkehrsregimes (reduzierte Geschwindigkeit in Stausituationen) geprägt ist und so einen Vergleich der entsprechenden Lärmimmissionen verhindert. Daher wurden Standorte gewählt, an welchen entweder eine temporäre Umsignalisation von Tempo 50 zu Tempo 30 möglich war oder eine dauerhafte, unabhängig geplante Umsignalisation messtechnisch begleitet werden konnte. Hier bieten sich besonders SDA 4 Beläge an, da diese innerorts sehr verbreitet eingesetzt werden und die für Tempo 30 relevante Klasse von LAB gut repräsentieren. Als Vergleich zu akustisch dichten Belägen und um mögliche Abhängigkeiten von der maximalen Korngrösse im SDA Belag abzuleiten wurden zudem ein konventioneller Belag und ein SDA 8 Belag gewählt.

Zusätzlich zur Möglichkeit der Umsignalisation waren die entscheidenden Kriterien zur Standortwahl:

- Belagstyp: mehrere Beläge des Typ SDA 4, ein Belag des Typen SDA 8, ein Belag konventioneller Bauweise (akustisch dicht)
- Akustische Belagsgüte: mehrere verschiedene, für SDA Bauweise repräsentative Werte zwischen den Standorten; zudem ein akustisch neutraler Belag konventioneller Bauweise
- Ausreichend grosse Verkehrsmenge
- Kein Steigungseinfluss (Steigung kleiner 3 %)

- Übersichtliche, einspurige Verkehrssituation mit fließendem Verkehr und ausreichend Abstand zu relevanten Knoten oder Ampeln
- Möglichst wenig Einfluss potenzieller verkehrsfremder Störgeräusche
- Möglichst neutrale akustische Ausbreitungssituation mit wenigen Reflexionen
- Geeigneter Messstandort zur Installation von Verkehrszählgeräten und der Lärmimmissionsmessung (Einwilligung von betroffenen Anwohnern benötigt)

In Tabelle 1 sind die so gewählten Standorte zusammenfassend beschrieben. Für jeden Standort sind zudem in Anhang V bis X weitere detaillierte Informationen inkl. einer Standortkarte gezeigt. Alle Standorte erfüllen diese umfangreichen Mindestanforderungen bzgl. Umsignalisation, Belag und Eignung zur Messung. Auch ist die gewünschte Variabilität zwischen den Standorten gegeben, zugleich zeichnen sich alle Standorte durch einen generell guten Verkehrsfluss und nur geringe Publikumsorientierung aus, so dass durch die Umsignalisation jeweils von einer Tempo 30 Situation vom Typ *Strecke*² ausgegangen werden kann.

Tabelle 1: Übersicht der gewählten Standorte für die Messkampagne mit Informationen zu Belag, akustischer Belagsgüte (MV8)³, Verkehrslast (DTV), der Funktion im Messkonzept und Standortcharakter.

Standort	Belag und MV8 ³	DTV	Konzept	Charakter
Aarau Entfelderstrasse	SDA 4-12 -4.6 dB	15'400	SDA 4	Urban, hohe Verkehrslast
Brugg Zurzacherstrasse	SDA 4-12 -5.0 dB	16'300	SDA 4	Urban, hohe Verkehrslast
Küttigen Bibersteinerstrasse	SDA 4-12 -6.7 dB	5'600	SDA 4	Ländlich
Luzern Ruopigenstrasse	Konventionell ⁴ +1.5 dB	9'100	Referenz	Urban, hohe Verkehrslast
Safenwil Köllikerstrasse	SDA 4-16 -5.3 dB	7'900	SDA 4	Ländlich
Sulz Hauptstrasse	SDA 8-12 -4.2 dB	2'100	SDA 8	Ländlich, wenig Verkehr

² Der Tempo 30 Zonentyp *Strecke* ist durch eine Realisierung nur mit Geschwindigkeitssignalisation, ohne begleitende Massnahmen und ohne Zonengestaltung charakterisiert. Im Gegensatz dazu stehen die Zonentypen *Zone übersichtlich* und *Zone eng* mit entsprechenden weiteren Massnahmen.

³ MV8: akustische Belagsgüte mit Schwerverkehrsanteil 8% (N2-Anteil), ausgewiesen als Wirkung im Vergleich zum EMPA-Modell StL-86+

⁴ Belag konventioneller, akustisch dichter Bauweise, detaillierte Informationen zum Belagstyp bestehen nicht, Baujahr deutlich vor 2010.

2.3 Messmethoden

2.3.1 Verkehrserhebung

Zur Erhebung der Verkehrsdaten wurden radartechnologiebasierte Geräte vom Typ *TOPO.box* des Herstellers *RTB* verwendet. Die Verkehrszählgeräte erfassen alle Verkehrsteilnehmende mit Zeitstempel, Geschwindigkeit, Typ⁵ und Länge.

Während in Küttigen und Sulz aufgrund der geringen Verkehrsmenge nur ein Gerät installiert wurde, wurde an allen anderen Standorten auf jeder Fahrbahenseite ein Gerät verwendet. Die Ausrichtung der Geräte erfolgte so, dass der akustisch wirksame Bereich um die Immissionsmessung verkehrstechnisch erfasst werden konnte. Beispielhaft ist der Messaufbau mit zwei Verkehrszählgeräten in Abbildung 1 gezeigt.

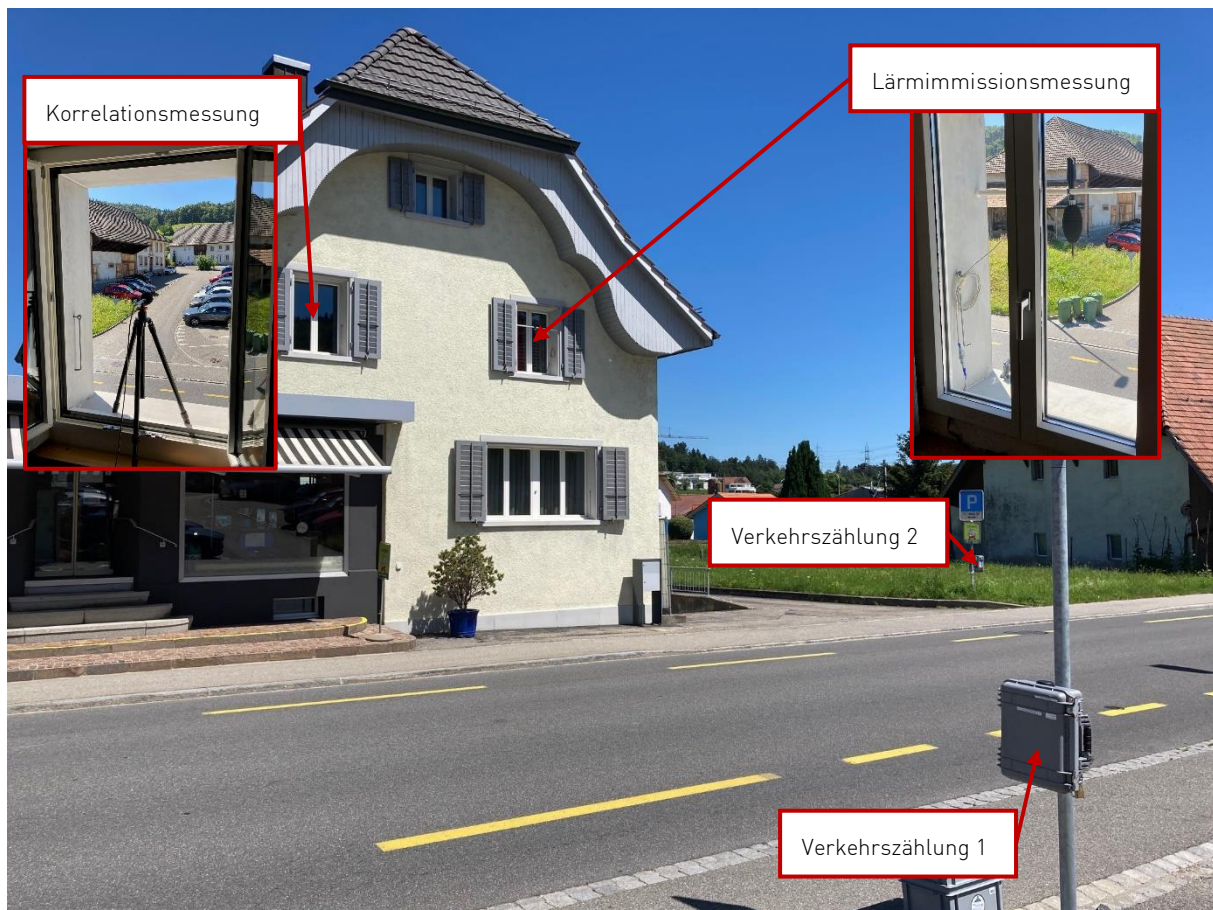


Abbildung 1: Messaufbau am Standort Safenwil mit 2 Verkehrszählgeräten und der Lärmimmissionsmessung am Fenster im ersten Obergeschoss. Zusätzlich sind Bilder zum Detailaufbau der Lärmimmissionsmessung und während der Durchführung der Korrelationsmessung am anderen Fenster eingebildet.

⁵ Die Typen umfassen Fahrrad, unbekannt, Motorrad, PW, Lieferwagen, PW mit Anhänger, Lieferwagen mit Anhänger, LKW, LKW mit Anhänger, Sattelschlepper und Bus. Eine Umrechnung in die swiss10 Fahrzeugklassen bzw. N1 und N2 Klassierung ist somit möglich.

2.3.2 Lärmmessung

Zur Messung der Lärmimmissionen kamen Geräte vom Typ *Nor150* oder *Nor140* vom Hersteller *Norsonic* in Einsatz. Hiermit wurden folgende akustische Parameter für die weitere Verarbeitung erfasst (Auflösung 500 ms): Leq , L_{min} , L_{max} und L_f (Leq je Terzband im Frequenzbereich 50 Hz bis 20 kHz). Zudem wurden für die spätere Qualitätskontrolle automatisiert Audiomitschnitte erstellt, sobald ein standortspezifischer Leq -Triggerwert überschritten wurde. Parallel dazu wurde an den meisten Standorten aus Redundanzgründen ein Lärmlogger vom Typ *nsrt_mk2* des Herstellers *Convergence Instruments* verwendet (nur Leq und L_{max}).

Nach Kalibration der verwendeten Messkette wurde das Mikrophon samt Wetterschutz an der exponierten Hausseite im ersten Obergeschoss in Höhe der Fenstermitte fixiert und das Fenster geschlossen. Um diese standortspezifische Installation vergleichbar im Sinne einer Beurteilung nach LSV zu machen, wurde anschliessend am Nachbarfenster eine Korrelationsmessung zur Korrektur des geschlossenen Fensters durchgeführt. Hierzu wurde mit einer weiteren kalibrierten Messkette parallel zur Langzeitmessung eine Kurzzeitmessung in der Mitte des offenen Fensters durchgeführt. Hierbei betrug die Messungszeit 20 min, bzw. umfasste mindestens 100 Fahrzeuge. Mit den durch die Korrelationsmessung erhaltenen Lärmpegeln der Kurzzeitmessung am offenen Fenster und der Langzeitmessung am geschlossenen Fenster kann so eine verallgemeinerbare Bezugsgrösse geschaffen werden. Der entsprechende Messaufbau ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

Ergänzend wurden geometrische Grössen zur örtlichen und lokalen Ausbreitungssituation für spätere Korrekturen vermessen. Ebenso wurde während dem Messaufbau die Verkehrssituation aufgenommen, der Strassenzustand erfasst und mögliche Störeinflüsse am Standort beobachtet.

2.3.3 Akustische Belagsgüte

Zur Bestimmung der aktuellen akustischen Belagsgüte wurden an allen Standorten CPX Messungen durchgeführt. Bei der CPX Messmethode werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit einem Messanhänger ermittelt.

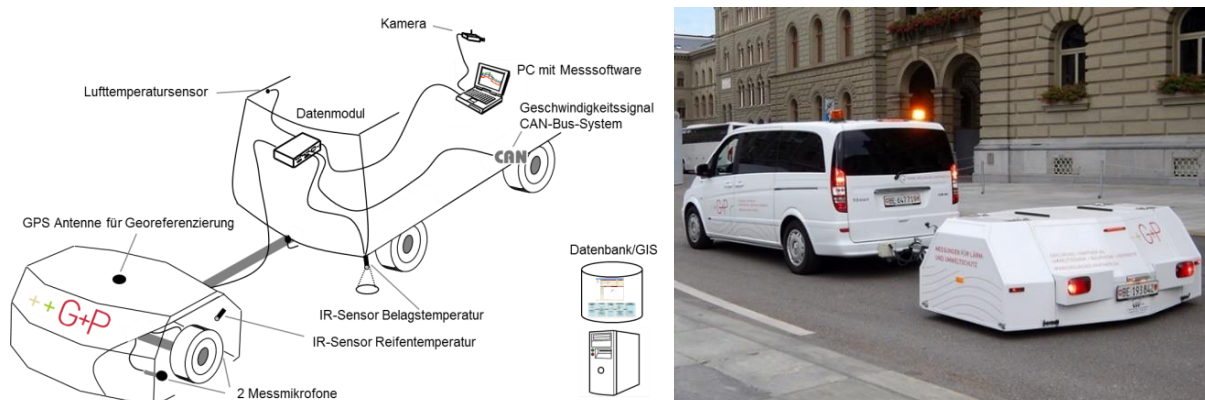


Abbildung 2: Schematische Übersicht und Foto des CPX-Messsystems.

Beim CPX-Messsystem wird der Schallpegel in zwei separaten schallgedämmten Kammern innerhalb des Messanhängers in unmittelbarer Reifennähe mit je zwei Mikrofonen gemessen. Der eingesetzte Anhänger muss die in der ISO 11819-2:2017 [11] festgelegten Kriterien betreffend Beeinflussung der

Messergebnisse durch geräteeigene Schallreflexionen sowie durch interne und externe Schallgeräusche erfüllen. Eine schematische Übersicht eines CPX-Messsystems ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Signale der vier Messmikrofone (zwei Messmikrofone je Seite), das Geschwindigkeitssignal aus dem CAN-Bus-System des Zugfahrzeuges, das GPS-Signal für die Georeferenzierung der Messdaten, sowie die Signale der Temperatursensoren zur Temperaturkorrektur werden im zentralen Datenmodul verarbeitet und von der Messsoftware aufgezeichnet. Die A-bewerteten Schallpegel werden kontinuierlich auf der gesamten Messstrecke erfasst. Dabei werden die Mikrofonensignale mit einer Frequenz von 8 Hz aufgezeichnet und pro Messsegment (Länge 20 m) energetisch gemittelt.

Für die CPX Messung wurden an jedem Standort jede Fahrspur mit dem SRTT-Reifen (Referenzpneu PW) und dem Avon-Reifen (Referenzpneu LKW) bei möglichst konstanter Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h doppelt gemessen.

2.4 Messkampagne

2.4.1 Testsignalisation Aargau

Dank der auf diese Weise einzigartigen Unterstützung des Tiefbauamts Aargau war es möglich an den Standorten mit LAB (Aarau, Brugg, Küttigen, Safenwil und Sulz) eine temporäre Umsignalisation zu realisieren. Hierzu wurde in Zusammenarbeit mit den Werkhöfen das entsprechende Signalisationskonzept umgesetzt. Während die Lärmmessung und Verkehrszählung liefen, wurde so mit «Höchstgeschwindigkeit 30 km/h»-Schildern für jeweils mindestens drei volle Tage umsinalisiert. Wie in Abbildung 3 gezeigt, wurden zudem ergänzend Informationstafeln («Temporäre Signalisation für Belagsmessung») installiert, um Irritationen vorzubeugen und die Unterstützung der Verkehrsteilnehmenden zu gewinnen. Die Messungen fanden zwischen dem 7. Juli und dem 8. August 2020 statt, je Standort betrug die gesamte Messdauer zwischen 13 und 16 Tagen.

2.4.2 Neusignalisation Luzern

Dank dem Tiefbauamt der Stadt Luzern ergab sich weiter die Möglichkeit eine bereits geplante, dauerhafte Umsignalisation von Tempo 50 auf Tempo 30 messtechnisch zu begleiten. Auf der Ruopigenstrasse mit konventionellem Strassenbelag wurde vom 28. September bis zum 4. Oktober 2020 die bestehende Tempo 50 Situation gemessen. Anschliessend, nach den Bauarbeiten zur Umgestaltung (Demarkierung Fahrbahnmitte, «30» Markierungen, Markierung Velostreifen) wurde die neue Tempo 30 Situation weiter bis zum 9. November 2020 erfasst. Ein Abschnitt der umgestalteten Ruopigenstrasse ist in Abbildung 4 gezeigt.



Abbildung 3: Temporäre Umsignalisation in Aarau



Abbildung 4: Dauerhafte Umsignalisation in Luzern

3. Datenaufbereitung

3.1 Konzept

Um die Daten sowohl frei von nichtrepräsentativen Störeinflüssen als auch vergleichbar zwischen den verschiedenen Standorten zu machen, wurde im Anschluss an die Messungen eine umfangreiche Datenaufbereitung durchgeführt. Dies ist vereinfacht und schematisch in Abbildung 5 dargestellt und in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Prinzipiell zielt die Datenaufbereitung auf folgende Punkte ab:

- Ausschluss von fehlerhaften oder nicht repräsentativen Messdaten: Messgerätfehler, Störgeräusche, Wettereinflüsse (Wind, nasse Fahrbahn), nichtrepräsentative Verkehrsregimes (Stau).
- Normalisierung, um Vergleiche zwischen den Standorten zu ermöglichen: Verkehrsmenge, Temperaturkorrektur, Korrelationsmessung, Korrektur akustischer Ausbreitungseffekte.
- Das standortspezifische Fahrverhalten (Stil, Gangwahl, Beschleunigungen) konnte nicht im Rahmen des Projektes erfasst werden, wird aber dank der generell übersichtlichen Verkehrssituation und dem fliessenden Verkehrsregime als vergleichbar angenommen.
- Um einen potenziellen Einfluss des Schwerverkehrsanteils (N2-Anteil) berücksichtigen zu können, ohne künstliche Modellkorrekturen einfließen zu lassen, werden alle Daten mit dem N2-Anteil verknüpft, in N2-Kategorien geführt und nur innerhalb dieser Kategorien verglichen.

Als übrige, gewünschte Variablen verbleiben die Geschwindigkeit und standortübergreifend betrachtet der Strassenbelag.

3.2 Aufbereitung Verkehrsdaten

Wie in Abbildung 5 dargestellt, erfolgte die Aufbereitung der Verkehrsdaten mit folgenden Schritten:

- «Excludes_V»: Die Rohdaten (Geschwindigkeit je Verkehrsteilnehmer, Typ je Verkehrsteilnehmer, beides mit Zeitstempel) wurden zeitsynchronisiert, zusammengeführt (mehrere Geräte) und vorgefiltert. Hierbei wurden erfasste Verkehrsteilnehmer vom Typ *Velo* oder vom Typ *unbekannt* ausgeschlossen (typischerweise ca. 5 % der Daten). Ein weiterer Filter entfernt Verkehrsteilnehmer mit Geschwindigkeiten über 80 km/h, da es sich hier meist um Messfehler aufgrund von Interferenzen handelt (typischerweise weniger als 0.5 ‰ der Daten).
- «T=30min»: Die gefilterten Daten werden auf 30 Minuten Intervalle zusammengefasst und den Fahrzeugklassen N1 und N2 zugeordnet⁶. Die Anzahl der Verkehrsteilnehmer ergibt sich als die reine Summe über den Zeitraum, für die entsprechende Geschwindigkeit wurde der Median der in den 30 Minuten einzeln gemessenen Geschwindigkeiten gebildet (v50).
- «QC_V»: in mehreren Schritten wird anhand verschiedener Parameter die Datenkonsistenz geprüft. Mittels der Geschwindigkeitsverteilung je 30 Minuten Intervall können Stausituationen erkannt und ausgeschlossen werden. Tagesganglinien zum Vergleich des Verkehrs zwischen Tag/Nacht, Wochenende/Wochentags werden zur Detektion von ungewöhnlichen Daten, welche auf Fehler hinweisen

⁶ Zuordnung:

swiss10 Klasse	1	2	3	4	5	8	9	10
N1 oder N2	N2	N2	N1	N1	½ N1, ½ N2	N2	N2	N2

können, verwendet. Fahrtrichtungsaufgelöste Differenzen je N2-Kategorie über den Zeitverlauf sind ein weiteres Indiz zur Suche möglicher Unregelmässigkeiten bei der Datenaufnahme oder Problemen mit den Messgeräten.

Nach der Filterung, Aggregation und Qualitätskontrolle stehen die Verkehrsdaten mit den zentralen Parametern Anzahl Fahrzeuge pro 30 Minuten (n), N2-Anteil pro 30 Minuten (n2%) und Median der Geschwindigkeit pro 30 Minuten bereit (v50).

3.3 Aufbereitung Lärmmessungen

Wie in Abbildung 5 dargestellt, erfolgte die Aufbereitung der Lärmmessungen mit folgenden Schritten:

- «Excludes_L»: nach Import der Rohdaten werden diese in einem essenziellen ersten Schritt von verkehrsfremden Störgeräuschen gefiltert – laute Fahrzeuge sollen nicht entfernt werden, hingegen nichtrepräsentative Ereignisse oder Störgeräusche wie Vorbeifahrten von Einsatzfahrzeugen mit Signalhorn, Baulärm, Rasenmäher, Regen, Tiergeräusche, Gespräche, Hierzu helfen einerseits die visuelle Analyse der Pegelverläufe von Leq und Lmin auf verschiedenen Zeitskalen bzw. wo vorhanden die Audiomitschnitte von überdurchschnittlich lauten Ereignissen. Bei Standorten mit regelmässigen Störgeräuschen (z.B. Zug im Hintergrund, Helikopterüberflüge) wurde diese sehr aufwändige Analyse durch Filter anhand der Flankensteilheit spezifischer Indikatorfrequenzen erleichtert.
- «T=30min»: die gefilterten Daten für Leq und Lf werden als äquivalente Dauerschallpegel über 1 min Messzeit berechnet (ursprüngliche Auflösung 500 ms) und stehen so für die Qualitätskontrolle im nächsten Schritt bereit. Diese 1-minütigen Werte werden durch energetische Mittelung auf die 30 Minuten Intervalle aggregiert. Die erhaltenen Werte für Leq beziehen sich jeweils auf das zugehörige 30 Minuten Intervall und werden basierend auf der effektiven Messzeit berechnet (30 min abzüglich eventueller Excludes).
- «QC_L»: ergänzend zur Filterung von Störgeräuschen werden weitere Qualitätskontrollen durchgeführt. Mit den Pegelverläufen für Leq und Lf über 1 min Messzeit können die Excludes aus Schritt 1 validiert werden bzw. weitere Abweichungen einzelner Frequenzen erkannt werden. Mit den Leq-Werten je 30 Minuten Intervall werden Tagesganglinien zum Vergleich zwischen Tag/Nacht, Wochenende/Wochentags gebildet und helfen zum Bestimmen weiterer möglicher Unregelmässigkeiten. Zusätzlich zu den so bestimmten Excludes werden 30 Minuten Leq Werte mit einer effektiven Messzeit von weniger als 10 Minuten ausgeschlossen.

Nach der Filterung, Aggregation und Qualitätskontrolle stehen die Lärmdaten anhand von Leq Werten je 30 Minuten Intervall bereit (Leq).

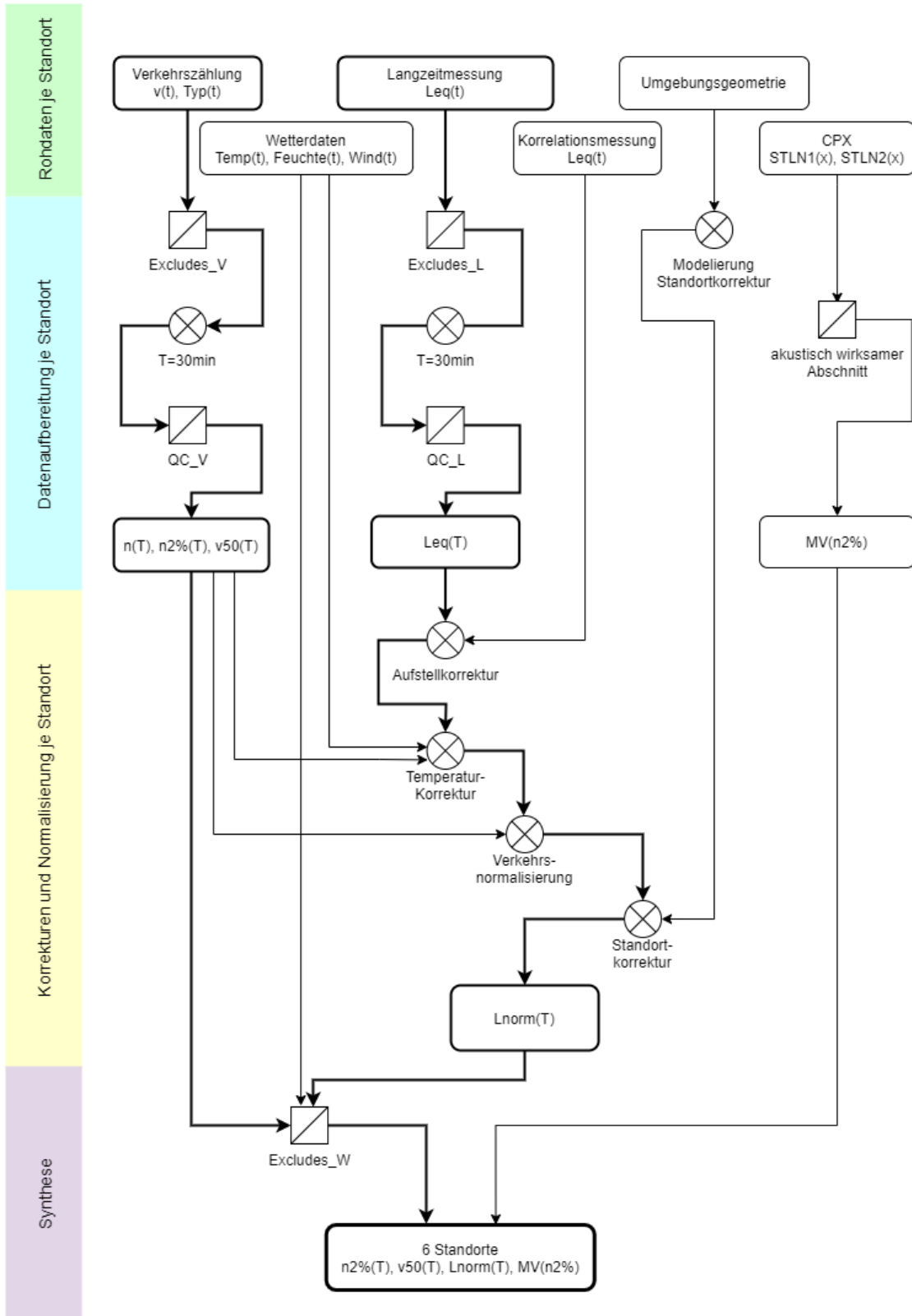


Abbildung 5: Vereinfachtes Schema zur Datenaufbereitung und Normalisierung, in den zugehörigen Kapiteln 3.2 bis 3.6 finden sich die entsprechenden Beschreibungen der Arbeitsschritte und Abkürzungen.

3.4 Aufbereitung CPX Messung

Die Datenaufbereitung erfolgt nach den Vorgaben der in ISO 11819-2:2017 [11], ISO/TS 11819-3:2017 [12] und ISO/TS 13471-1:2017 [13] geschilderten Vorgehensweise. Die Messresultate werden entsprechend der Messgeschwindigkeit sowie bezüglich geräteeigener Schallreflexionen, der in-situ gemessenen Lufttemperatur auf 1.5 m Höhe über dem Boden und der spezifischen Reifenhärte korrigiert. Die in den je Fahrt (zwei je Fahrbahn und Messreifen für PW und LKW) ermittelten und wie beschrieben korrigierten Messwerte werden als akustische Belagswirkung im Vergleich zum Modell StL-86+ je 20 m Strassensegment in Abhängigkeit vom Messreifen ausgegeben. Aus diesen Werten wird die effektive akustische Belagsgüte im akustisch wirksamen Umfeld der Immissionsmessung berechnet. Hierzu werden die relevanten 20 m Segmente in Abhängigkeit ihrer Entfernung zum Ort der Immissionsmessung als gewichteter Mittelwert berechnet (Segmente bis 50 m Entfernung wurden berücksichtigt). Aus den resultierenden Werten für den PW und den LKW-Wert kann entsprechend dem gewählten N2-Anteil die effektive Belagsgüte im sogenannten Mischverkehrswert berechnet werden ($MV(n2\%)$ in Abbildung 5).

3.5 Korrekturen und Normalisierung

Die je Standort und wie in Kapitel 3.3 beschrieben aufbereiteten Leq Werte wurden weiter korrigiert und normalisiert (siehe auch Abbildung 5). Dabei ist zu bemerken, dass die Aufstellkorrektur und die akustische Standortkorrektur einen globalen Offset der Daten bewirken und somit nur Einfluss auf Betrachtungen zwischen verschiedenen Standorten haben. Die Temperaturkorrektur und Verkehrsnormalisierung hingegen sind für jedes 30 Minuten Intervall individuell und machen die Daten sowohl innerhalb als auch zwischen den Standorten vergleichbar.

Abschliessend stehen die so korrigierten und normalisierten Leq Werte als sogenannte L_{norm} Werte je 30 Minuten Intervall der Synthese mit den anderen Messdaten und der Datenanalyse zur Verfügung. L_{norm} ist somit keine direkte Messgrösse mehr, sondern entspricht dem je Fahrzeug gemittelten (Verkehrsnormalisierung), temperaturkorrigierten Emissionspegel (Standortkorrektur), der die gemessenen Immissionswerte am offenen Fenster (Aufstellkorrektur) bewirken würde.

3.5.1 Aufstellkorrektur

Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben wurde zusätzlich zur Langzeitmessung (LZM) eine Kurzzeitmessung in der Mitte des offenen Fensters durchgeführt, um den Messpunkt der LZM auf diesen relevanten und vergleichbaren Bezugspunkt zu fixieren. Dazu wurden die Leq Pegelverläufe beider paralleler Messungen zeitsynchronisiert und von allfälligen Störgeräuschen gefiltert. Aus dem über die gesamte Messzeit (20 min oder mindestens 100 Fahrzeuge) berechneten Leq für beide Messungen wird die Differenz ermittelt und als globale Korrektur von der LZM abgezogen. Dieser Offset reduziert die Pegel der LZM typischerweise um wenige Dezibel.

3.5.2 Temperaturkorrektur

In Anlehnung an die ISO/DTS 13471-2:2020 [14] wurde eine Temperaturkorrektur je 30 Minuten Intervall vorgenommen, um den Einfluss der Temperatur auf die Reifen-Fahrbahngeräusche zu minimieren. Dieser Einfluss liegt vornehmlich in der Temperaturabhängigkeit der Pneu-Gummihärte und kann wie folgt in Abhängigkeit der Temperatur, Fahrzeugtyp, Geschwindigkeit und Belagstyp bestimmt werden:

$$\Delta L_{\text{temp}} = (\text{Temperatur} - \text{Referenztemperatur}) * \gamma_{\text{Roll}} * \gamma_{\text{Antrieb}} * \gamma_0$$

, wobei:

- ΔL_{temp} : Temperatur-Pegelkorrektur je 30 Minuten Intervall
- Temperatur: die im Messintervall mittlere Lufttemperatur auf 2 m Höhe der nächstgelegenen, repräsentativen MeteoSchweiz Wetterstation
- Referenztemperatur: 20 °C
- γ_{Roll} : berücksichtigt den Einfluss der Temperatur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch und beträgt für konventionellen Strassenbelag -0.1 bzw. -0.06 für PW bzw. LKW-Pneu. Für LAB wird entsprechend -0.05 und -0.04 verwendet. Aus diesen jeweils zwei Werten wird eine entsprechend dem effektiven N2-Anteil gewichtete Summe gebildet.
- γ_{Antrieb} : berücksichtigt den Anteil des Antriebsgeräusches am Gesamtgeräusch in Abhängigkeit von Fahrzeugtyp und Geschwindigkeit. Hier wurden die Werte der tiefsten Geschwindigkeitsklasse 45 bis 64 km/h für PW und LKW gewählt: 0.9 und 0.6 und entsprechend dem effektiven N2-Anteil gewichtet.
- γ_0 : um dem Sachverhalt Rechnung zu tragen, dass Temperatureffekte bei Messungen idealisierter Vorbeifahrten (Norm) im Gegensatz zu einer Dauermessung des Gesamtverkehrs überschätzt werden, wurde die Korrektur mit $\gamma_0 = 0.8$ um 20 % abgeschwächt.

In Abhängigkeit dieser Parameter variiert die Temperaturkorrektur für die 30 Minuten Intervalle zwischen -1.1 dB und 0.5 dB und beträgt im Mittel 0.2 dB.

3.5.3 Verkehrsnormalisierung

Jedem aufbereiteten Leq Wert liegt als massgebliche Einflussgrösse die Anzahl der Lärmquellen, also der vorbeifahrenden Fahrzeuge zugrunde. Um dies vergleichbar zu machen, wird der Leq entsprechend der Anzahl der Fahrzeuge im selben 30 Minuten Intervall zu einem Durchschnittspegel pro Fahrzeug normalisiert:

$$Leq_{\text{proFz}} = 10 * \lg(10^{(0.1 * Leq)} / n)$$

, wobei n der Anzahl der Fahrzeuge entspricht und Leq_{proFz} dem Durchschnittspegel pro Fahrzeug.

Bei dieser Betrachtung besteht ein Einfluss des N2-Anteils, da ein lautes Fahrzeug durchschnittlich mehr zum Gesamtlärmpegel beiträgt als ein leises. Da für alle Datenpunkte der zugehörige N2-Anteil mit in die Datenanalyse einfließt und nur Datenpunkte aus der gleichen N2-Kategorie miteinander verglichen werden, kann dieser Einfluss jedoch ohne weitere Modellierungen vernachlässigt werden.

3.5.4 Akustische Standortkorrektur

Ein direkter Vergleich der verschiedenen Standorte ist nur möglich, wenn die standortspezifischen, akustischen Ausbreitungsverhältnisse berücksichtigt werden. Hierzu wurden die Häuser und andere akustisch relevanten Strukturen im Umfeld der jeweiligen Immissionsmessung mit der Software SLIP von G+P AG, Version 7 modelliert. Damit wird basierend auf dem EMPA-Berechnungsmodell StL-86+ unter Berücksichtigung von Zweifachreflexionen eine Standortkorrektur berechnet. Dieser so erhaltene globale Offset je Standort transferiert die Immissionsmessung aus der standortspezifischen Umgebung und Geometrie zu einem Emissionswert im Abstand von 1 m zu einer Quelle in der Strassenmitte und ist somit auch zwischen den Standorten vergleichbar.

3.6 Synthese

3.6.1 Aufbereitete Datengrundlage Verkehr

Die Geschwindigkeitsverteilung der wie in Kapitel 3.2 beschrieben aufbereiteten Verkehrsdaten ist in Abbildung 6 dargestellt, unterteilt in Tag und Nacht. Besonders tagsüber ist klar zu erkennen, dass entsprechend der Umsignalisation zwei Geschwindigkeitsregimes bestehen, nachts ist dies je nach Standort weniger stark ausgeprägt. Die Wirkung der Umsignalisation wird in Kapitel 4.1 besprochen.

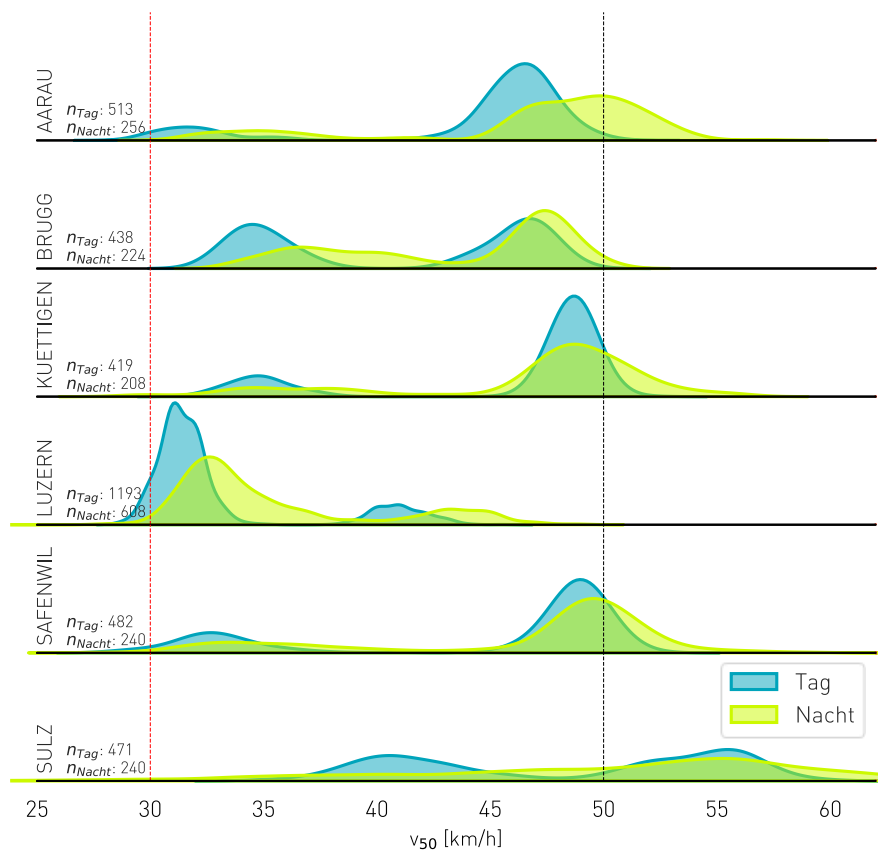


Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilungen des v_{50} der Messwerte (Anzahl normalisiert) für Tag und Nacht bei allen Standorten. Die Zahlen für n_{Tag} und n_{Nacht} geben an wie viele Datenpunkte (30 Minuten Intervalle) bestehen.

3.6.2 Synthese der Lärm-, Wetter- und Verkehrsdaten

Um die abschliessende Datengrundlage je Standort zu erhalten, wurden Verkehrsdaten, Lärmdaten und Wetterdaten kombiniert und die Daten so gefiltert, dass nur Datenpunkte ohne Ausschlüsse in jeglicher Dimension bestehen bleiben (siehe Abbildung 5).

- «Excludes_W»: über die Umgebungstemperatur hinausgehend, hat das Wetter weitere zu berücksichtigende Einflüsse auf die Lärmmessungen: starker Wind führt zu Störgeräuschen, eine nasse Fahrbahn – besonders bei LAB – wirkt akustisch anders als eine trockene Fahrbahn (Grundzustand). Daher wurden die Wetterdaten der nächstgelegenen, repräsentativen MeteoSchweiz Wetterstation auf 30 Minuten Intervalle aggregiert (Mittelwert der Temperatur und Luftfeuchtigkeit 2 m über dem

Boden, Maximum der Windgeschwindigkeit, Summe der Niederschlagsmenge) und für folgende Filterkriterien verwendet: Messintervalle mit Windgeschwindigkeiten über 20 km/h und mit Niederschlag wurden ausgeschlossen. Zudem wurde anhand der Luftfeuchte, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer nach jedem Niederschlagsereignis bewertet, ab wann die Fahrbahn wieder getrocknet ist und davor ebenfalls ausgeschlossen.

- Durch die Synthese dieser drei Datensätzen zu Wetter, Lärm und Verkehr je 30 Minuten Intervall konnte ein zusammenfassender Datensatz je Standort gebildet werden, der nur Datenpunkte berücksichtigt in welchen keine Ausschlüsse, weder bei Wetter, Lärm oder Verkehr vorliegen. Zentrale Parameter je Datenpunkt sind der normalisierte und korrigierte Schallpegel L_{norm} , der Median der Geschwindigkeiten v_{50} und der N2-Anteil $n_{2\%}$. Zudem kommt je Standort die effektive akustische Belagsgüte $MV(n_{2\%})$ zur Charakterisierung des Strassenbelags.

Beispielhaft für die zur weiteren Datenanalyse bereitstehende aufbereitete, korrigierte und normalisierte Datengrundlage sind in Abbildung 7 die entsprechenden Daten für Brugg dargestellt. In den Anhängen V bis X sind diese Ausgangsdaten für jeden Standort gezeigt.

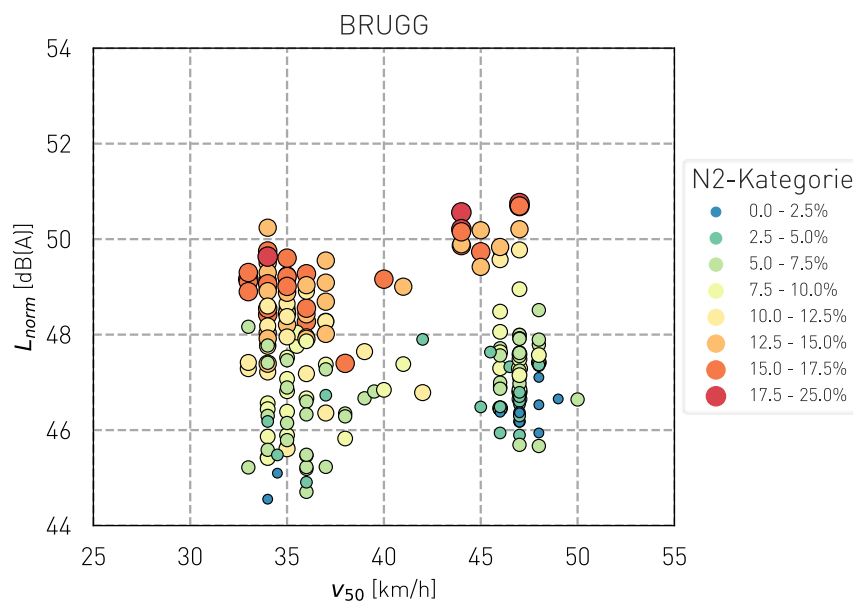


Abbildung 7: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Brugg.

4. Ergebnisse

4.1 Wirkung von Umsignalisation je Standort

Um die direkte Auswirkung der Umsignalisation auf die effektiven Geschwindigkeiten und den resultierenden Strassenlärm zu betrachten, können die Messdaten in Abhängigkeit der geltenden Geschwindigkeitssignalisation (Höchstgeschwindigkeit 50 km/h oder 30 km/h) ausgewertet werden.

Hierzu werden je Standort alle aufbereiteten Daten in Abhängigkeit von der signalisierten Geschwindigkeit und Tageszeit verglichen. Anstelle des korrigierten und normalisierten Lärmpegels L_{norm} wird der direkt gemessene Pegel L_{eq} verwendet, da für die Vergleichbarkeit der Differenz $\Delta L_{eff} = L(1) - L(2)$ die Normalisierung nicht benötigt wird und so kein Einfluss der Verkehrsnormalisierung berücksichtigt werden muss (bzw. eine Betrachtung in einzelnen N2-Kategorien, was eine reduzierte Zahl der verfügbaren Datenpunkte mit sich bringt). So kann die totale, direkt gemessene Wirkung auf die Lärmsituation erfasst werden - diese Aussage ist allerdings nicht verallgemeinerbar, da hierbei nicht für eventuell verschiedene Verkehrsmengen oder Verkehrszusammensetzungen bei den verschiedenen Signalisationen T30 und T50 korrigiert wurde.

In Tabelle 2 und in Abbildung 8 sind die so berechneten Wirkungen gezeigt, diese unterscheiden sich je Standort stark bzgl. der Ausgangsgeschwindigkeiten, Geschwindigkeitswirkung und Lärmwirkung. Generell hat die Umsignalisation einen deutlichen Effekt auf die gefahrenen Geschwindigkeiten (Reduktion Δv_{50} zwischen knapp 10 km/h und 16 km/h), dies ist tagsüber ausgeprägter als nachts und gilt ebenso für die Geschwindigkeitsstreuung (siehe auch Abbildung 6). Zugleich fällt auf, dass bei signalisierter Höchstgeschwindigkeit 30 km/h der Median der gemessenen Geschwindigkeiten durchwegs grösser als 30 km/h ist. Dies kann z.B. an einer gewissen benötigten «Gewöhnungszeit» bzgl. der Umsignalisation liegen, oder auch an eingeschränkter Akzeptanz der Testsignalisation.

Die Lärmwirkung fällt sehr variabel aus, von einer Zunahme um 0.6 dB bis zu einer Reduktion um über 3 dB. Hierbei ist zu beachten, dass die Unsicherheiten (1σ -Standardabweichung) der einzelnen L_{eq} Werte je Signalisationsregime meist grösser ist als die hier ausgewiesene Wirkung ΔL_{eff} und zudem keine Bereinigung bzgl. möglicher unterschiedlicher Stichproben bei T30 und T50 besteht. Die ausgewiesenen Unsicherheiten spiegeln somit die Variabilität in Verkehrsmenge und -zusammensetzung wider. Die mittlere gemessene Wirkung über alle Standorte - unbereinigt bzgl. Stichprobeneinflüssen - liegt bei 1.3 dB Lärmreduktion tags und bei 1.8 dB Lärmreduktion nachts.

Je Standort betrachtet zeigen sich folgende Auswirkungen auf Geschwindigkeit und Lärmpegel:

- Aarau: sowohl tags wie nachts wird eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion von ca. 14 km/h und eine entsprechende Lärmreduktion von 1.3 dB bzw. 1.4 dB beobachtet.
- Brugg: trotz einer Geschwindigkeitsreduktion von 10 km/h bis 12 km/h wird sowohl tags als auch nachts nur ein sehr geringer Einfluss ohne klaren Trend (tags Zunahme Mittelwert um 0.6 dB, nachts Reduktion Mittelwert um 0.6 dB) auf den Lärmpegel beobachtet. Diese Werte lassen sich mit den gemessenen Verkehrsdaten gut durch das Strassenlärmmodell *sonROAD18* reproduzieren, was nahelegt, dass die wenig ausgeprägte Wirkung bzw. scheinbare Lärmpegelerhöhung auf die unterschiedlichen Verkehrszusammensetzungen der Stichproben bei T50 und bei T30 zurückzuführen ist und nicht auf die Temporeduktion selbst.

- Küttigen: die Absolutwerte und Wirkung auf die Geschwindigkeiten sind vergleichbar mit Aarau, die gemessene Lärmwirkung beträgt 0.9 dB tags und 2.6 dB nachts.
- Luzern: hier wurden sowohl die tiefsten Absolutgeschwindigkeiten als auch die geringste Geschwindigkeitsänderung (um 10 km/h) gemessen. Zugleich fällt die Lärmwirkung mit 1.7 dB tags und 3.1 dB nachts deutlich aus, dies wohl auch aufgrund der ausgeprägteren Tempowirkung auf den Lärm am konventionellen Belag.
- Safenwil: die beobachtete Geschwindigkeitsreduktion ist hier am ausgeprägtesten mit 15 km/h bis 16 km/h. Ebenso ist die Lärmreduktion mit 2.8 dB und 2.9 dB tags und nachts deutlich.
- Sulz: der Standort zeichnet sich durch die höchsten Absolutgeschwindigkeiten (v50 bei 55 km/h bzw. 57 km/h tags bzw. nachts) aus. Auch wird hier die stärkste Streuung bzgl. der Geschwindigkeiten je Temporegime beobachtet (siehe auch Abbildung 6). Bei einer Temporeduktion von 10 bis 14 km/h wird eine Lärmreduktion von 1.5 dB tags und 0.1 dB nachts beobachtet. Nachts sind aufgrund der sehr tiefen Verkehrsmenge allerdings nur wenige Daten verfügbar (neun Datenpunkte à 30 Minuten) und somit ist die Aussagekraft hier stark eingeschränkt.

Aufgrund der starken Streuung der Lärmpegel und der unspezifischen Betrachtung in Hinblick auf Verkehrszusammensetzung und -menge sind diese Aussagen nur als erste, grobe Betrachtung geeignet. Eine verallgemeinerte Betrachtung mit Bereinigung bzgl. Verkehrszusammensetzung und -menge sowie eine Generalisierung des Geschwindigkeitseinflusses wird in den folgenden Kapiteln hergeleitet.

Tabelle 2: Medianwerte der gemessenen Geschwindigkeiten (v50) je 30 Minuten für Tag und Nacht bei allen Standorten für die beiden Signalisationen T50 und T30. $\Delta v50$ gibt die Änderung der v50 Werte durch Umsignalisation für Tag und Nacht an, $\Delta Leff$ gibt die entsprechende Änderung des gemessenen Lärmpegels Leq in dB(A) an.

Standort, Belag	Tag				Nacht			
	v50 bei T50 (km/h)	v50 bei T30 (km/h)	$\Delta v50$ (km/h)	$\Delta Leff$ (dB)	v50 bei T50 (km/h)	v50 bei T30 (km/h)	$\Delta v50$ (km/h)	$\Delta Leff$ (dB)
Aarau, SDA 4-12	46.4	32.0	-14.4	-1.3	48.4	34.9	-13.5	-1.4
Brugg, SDA 4-12	46.4	34.8	-11.6	+0.6	47.3	37.3	-10.0	-0.6
Küttigen, SDA 4-12	48.7	34.8	-13.9	-0.9	48.5	36.0	-12.6	-2.6
Luzern, konventionell	41.0	31.3	-9.7	-1.7	43.2	32.6	-10.6	-3.1
Safenwil, SDA 4-16	48.9	32.8	-16.1	-2.8	49.1	34.5	-14.6	-2.9
Sulz, SDA 8-12	54.9	40.9	-14.1	-1.5	56.5	46.7	-9.8	-0.1

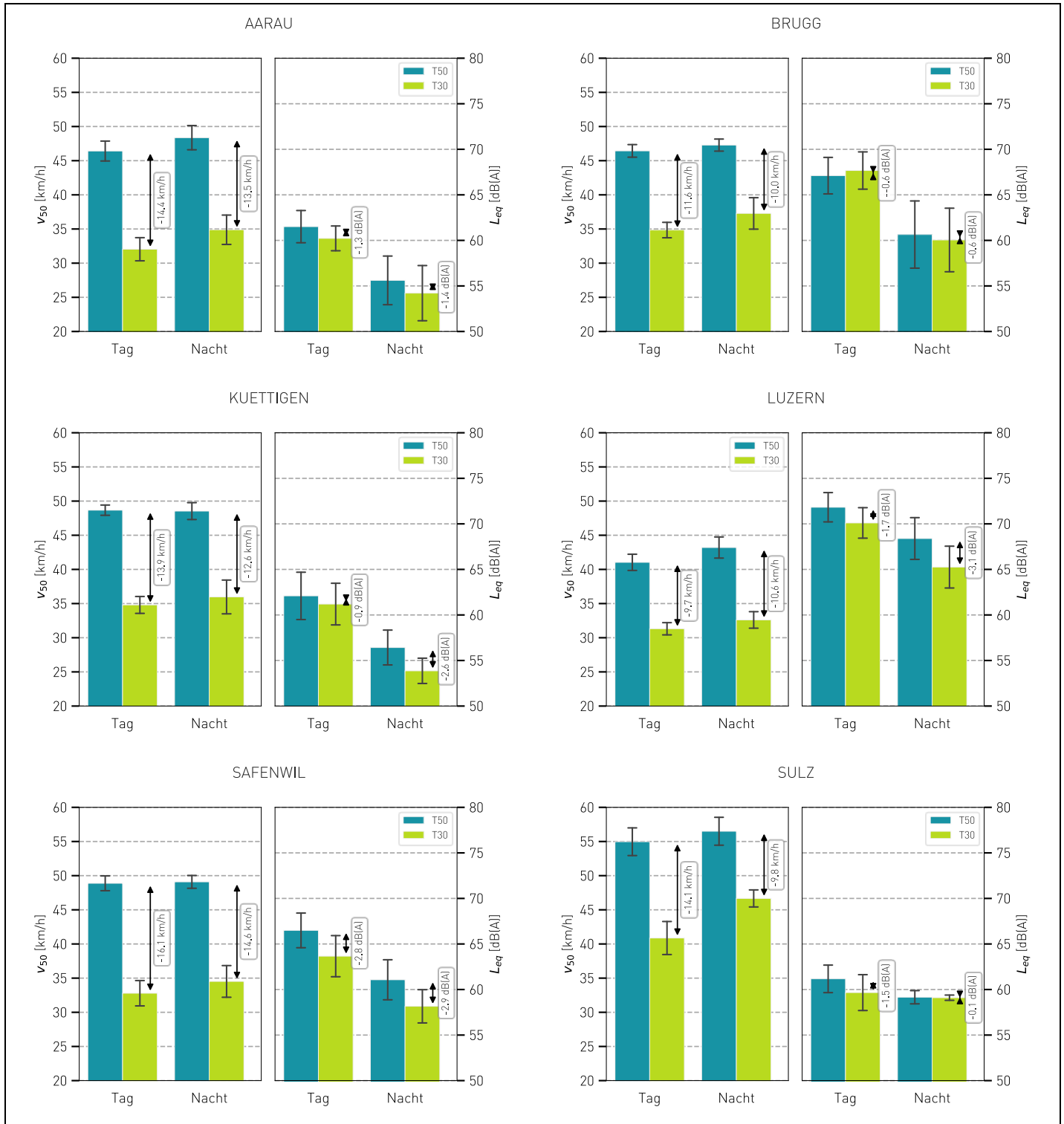


Abbildung 8: Tempo- und Lärmwirkung durch die Umsignalisation für alle Standorte für Tag und Nacht. Es sind jeweils für beide Geschwindigkeits-Signalisationen die absoluten Lärm- und Geschwindigkeitswerte inkl. der Standardabweichung angegeben. Der Doppelpfeil zeigt die jeweilige Änderung von Geschwindigkeit oder Lärmpegel aufgrund der Umsignalisation.

4.2 Lärmwirkung von Temporeduktion

Zur weitergehenden Analyse der aufbereiteten Messdaten wurden diese – betrachtet je Standort und N2-Kategorie⁷ – mittels linearer Regression gefittet:

$$L_{\text{norm}} = a_0 + a_1 \cdot \lg(v_{50})$$

, wobei a_0 dem Offset und a_1 der Steigung im linearen Modell nach $\lg(v_{50})$ entspricht⁸. Um robustere Fits zu erhalten, wurden nur Datensätze modelliert, welche mindestens drei Datenpunkte (jeweils 30 Minuten Messzeit) in jedem Signalisationsregime (Tempo 30 und Tempo 50) aufweisen bzw. realistische Modellwerte (Unsicherheitsbereiche, vergleichbare Fitparameter) zeigen.

In Anhang XI und Anhang XII sind die so gefitteten Messdaten, aufgeschlüsselt nach Standort bzw. N2-Kategorie dargestellt. Die resultierenden Fitparameter a_0 und a_1 sind in Tabelle 4 in Anhang XIII zusammengestellt. Um die Interpretation des linearen Modells nach $\lg(v_{50})$ zu erleichtern, ist dort zudem die jeweilige rechnerische Lärmwirkung ΔL in dB für eine Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h angegeben.

Als Beispiel der beobachteten Zusammenhänge sind in Abbildung 9 und in Abbildung 10 die gefitteten Messdaten, aufgeschlüsselt nach N2-Kategorie bzw. nach Standort gezeigt. Wie am Beispiel Safenwil in Abbildung 9 zu sehen, haben die Fits aller N2-Kategorien eine positive Steigung a_1 , welche im Rahmen der Unsicherheiten vergleichbar ist. Der Offset a_0 steigt hingegen tendenziell mit dem N2-Anteil an.

Vergleicht man hingegen die verschiedenen Standorte untereinander bei einer bestimmten N2-Kategorie zeigt sich ein Bild wie in Abbildung 10 für N2-Anteile von 5 bis 7.5 %: während die Steigungen a_1 der Standorte mit SDA Belag im Rahmen der Unsicherheiten vergleichbar sind, ist die Steigung am Standort Luzern mit konventionellem Belag vergleichsweise steiler. Die Offsets a_0 sind hingegen für jeden Standort verschieden und massgeblich durch die jeweilige Aufstellkorrektur und akustische Standortkorrektur beeinflusst.

Im Folgenden werden die aus den aufbereiteten Messdaten gewonnenen Fitparameter, bzw. die rechnerische Lärmwirkung auf mögliche Einflussfaktoren Belagsgüte, Belagstyp und N2-Anteil hin untersucht.

⁷ Die N2-Kategorien wurden zu 2.5 % Intervallen gewählt und reichen von 0 – 2.5 % bis zu 15 – 17.5 % N2-Anteil.

⁸ Ein lineares Modell nach $\log_{10}(v_{50})$ wurde entsprechend der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollgeräusches gewählt.

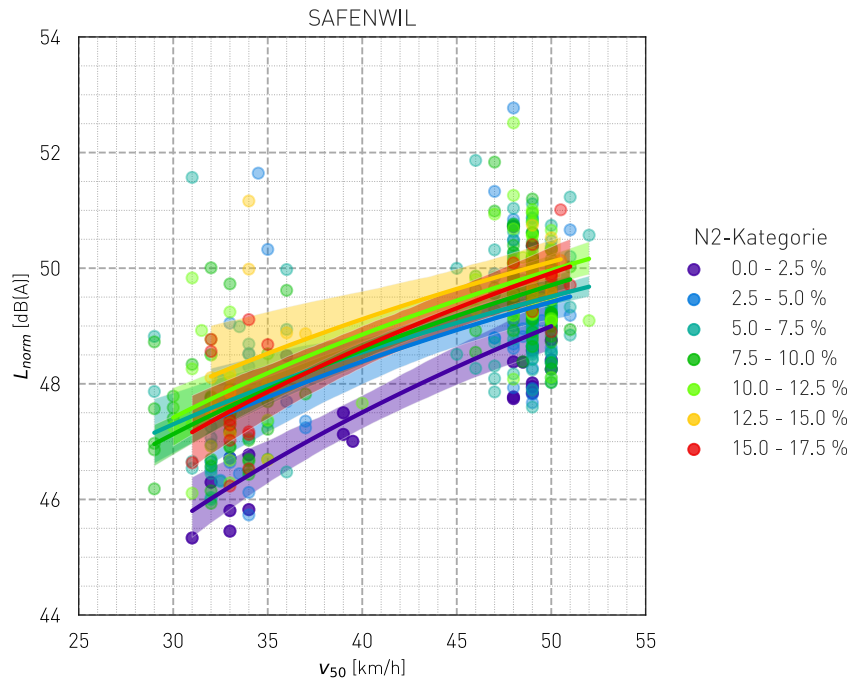


Abbildung 9: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v_{50} Wert und N2-Kategorie für den Standort Safenwil. Die Daten jeder N2-Kategorie mit genügend Messdaten wurden mittels linearer Regression nach $\lg(v_{50})$ gefittet, der schattierte Bereich gibt die Unsicherheit der Regression an (95 % Vertrauensintervall).

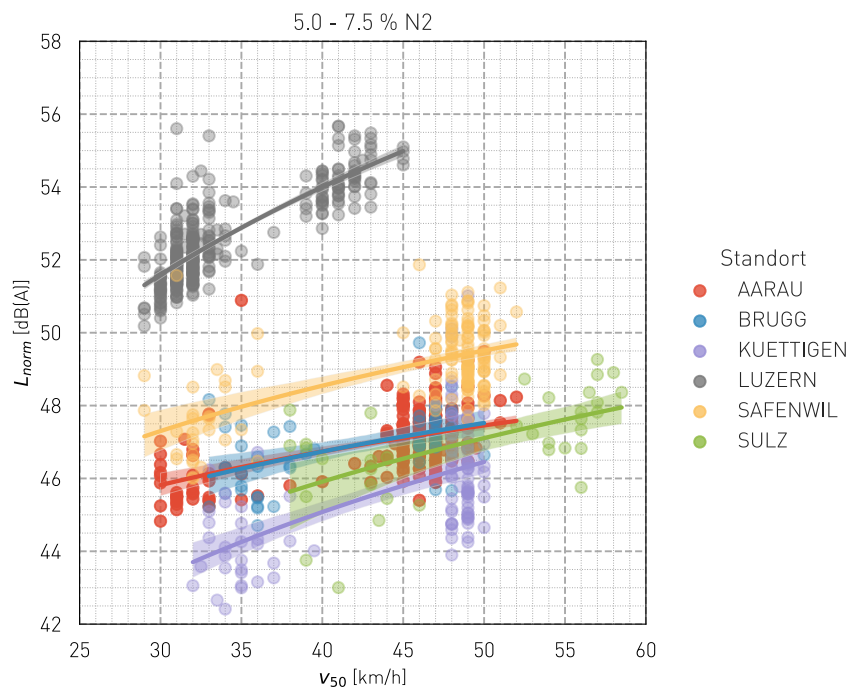


Abbildung 10: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v_{50} Wert und alle Standorte für die N2-Kategorie 5 - 7.5 %. Die Daten wurden mittels linearer Regression nach $\lg(v_{50})$ gefittet, der schattierte Bereich gibt die Unsicherheit der Regression an (95 % Vertrauensintervall).

4.2.1 Einflussfaktor Belagsgüte

Abbildung 11 zeigt die rechnerische Lärmwirkung einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h in Abhängigkeit der akustischen Belagsgüte im Mischverkehrswert $MV8^9$ für die verschiedenen N2-Kategorien. Die SDA Beläge weisen Belagsgütewerte zwischen -6.7 dB und -4.2 dB auf, der Standort Luzern mit konventionellem Belag 1.5 dB. Die rechnerische Lärmwirkung ΔL variiert je nach N2-Kategorie zwischen -0.7 dB und -3.4 dB für LAB und -4.0 dB und -4.8 dB beim konventionellen Belag. Zu beachten ist die mit jedem Punkt verbundene beträchtliche Fehlerangabe (95% Vertrauensintervall aus $\lg(v50)$ Modell).

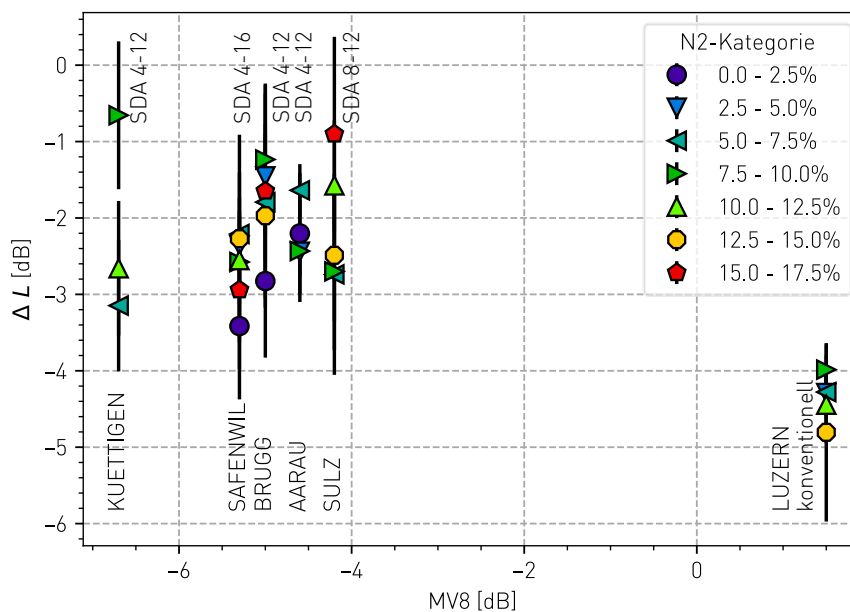


Abbildung 11: Lärmwirkung ΔL einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h in Abhängigkeit der akustischen Belagsgüte $MV8$ und der N2-Kategorie. Zudem sind je Standort der Belagstyp angegeben.

Im Rahmen der Werte für ΔL und den verbundenen Unsicherheiten lässt sich im Bereich der gemessenen Belagsgütewerte für SDA Beläge kein Einfluss der akustischen Belagsgüte auf die Lärmwirkung der Temporeduktion beobachten. Hierzu wurden mittels linearer Regressionsanalyse für $\Delta L(MV8)$ die Datenpunkte für LAB untersucht. Die so je N2-Kategorie gefundene Abhängigkeit für ΔL vom $MV8$ Wert streut über alle Kategorien beträchtlich (-0.8 dB/dB bis 1.7 dB/dB) und zeigt keinen konsistenten Zusammenhang zwischen der akustischen Belagsgüte des LAB und der Lärmwirkung einer Temporeduktion von 50 auf 30 km/h.¹⁰ Dies wird durch eine generell vergleichbare Wirkungsweise der SDA Beläge (jedenfalls für die hier untersuchte Stichprobe) in Bezug auf Rollgeräusche (Anregung, Entlüftung und Schallabsorption) erklärt.

Bei der Beurteilung der kombinierten Wirkung von LAB und Temporeduktionen ist hingegen die akustische Belagsgüte sehr wohl massgebend (vgl. Kapitel 4.3).

⁹ Die akustische Belagsgüte weist die mit der CPX-Methode gemessenen Rollgeräuschpegel als Wirkung im Vergleich zum EMPA-Modell StL-86+ aus. $MV8$ gibt hierbei den entsprechende Mischverkehrswert mit 8 % N2-Anteil an.

¹⁰ Die Ergebnisse der Regressionsanalyse sind sowohl für alle Beläge vom Typ SDA als auch nur für Beläge vom Typ SDA 4 inkonsistent über die verschiedenen N2-Kategorien. Eine negative Steigung in dieser Betrachtung bedeutet, dass eine Temporeduktion lärmwirksamer ist, je höher die Werte der akustischen Belagsgüte sind.

Ein Modell zum Einfluss der akustischen Belagsgüte unter Einbezug der Messung in Luzern auf konventionellem Belag herzuleiten ist nicht zulässig. Weder ist ein entsprechender Zusammenhang mit der Belagsgüte innerhalb der LAB Beläge gegeben (jedenfalls für die hier untersuchte Stichprobe), noch sind die physikalischen Wirkmechanismen aufgrund der unterschiedlichen Bauweise von LAB und konventionellen Belägen vergleichbar.

4.2.2 Einflussfaktor Belagstyp

Auch wenn im Rahmen der untersuchten Bandbreite an Belägen und der Unsicherheiten kein direkter Einfluss der akustischen Belagsgüte auf die Lärmwirkung einer Temporeduktion bei SDA Belägen feststellbar ist (Kapitel 4.2.1), fällt in Abbildung 11 auf, dass der konventionelle Belag ($MV8 = 1.5$ dB) eine deutlich grössere Lärmwirkung hat als die SDA Beläge. Aufgrund des hier fehlenden Zusammenhangs zwischen Belagsgüte und ΔL bei SDA Belägen, schlagen wir als Ursache für diese Beobachtung den Belagstyp als primäre Einflussgrösse für die Bestimmung einer Temporeduktion vor. Bautechnisch bestehen zwischen konventionellem Belag (akustisch dicht) und SDA Belag (akustisch wirksame Hohlräume) grosse Unterschiede, die eine solche Interpretation unterstützen. Die Lärmwirkung einer Temporeduktion bei SDA Belägen ist im Vergleich zu konventionellen Belägen kleiner. Da eine Temporeduktion zu einer Minderung des Rollgeräuschs (Anregung, Entlüftung und Schallabsorption) führt, wird bei konventionellen Belägen, welche über einen höheren Rollgeräuschanteil als SDA Beläge verfügen, eine entsprechend grössere Lärmwirkung erzielt.

Bei der Beurteilung der kombinierten Wirkung von LAB und Temporeduktionen ist hingegen die akustische Belagsgüte der SDA Beläge sehr wohl massgebend (vgl. Kapitel 4.3).

Am Standort Sulz wurden die Messungen auf einem SDA 8 Belag durchgeführt (im Gegensatz zu Belägen vom Typ SDA 4 bei den anderen LAB Standorten). Basierend auf den in Abbildung 11 gezeigten Werten kann hierzu im Rahmen der Unsicherheiten keine Aussage zum Einfluss des Belagsuntertyps (Korngrösse 8 mm statt 4 mm) gemacht werden. Es fällt trotzdem auf, dass die Streuung der einzelnen Werte mit unterschiedlichem N2-Anteil beim SDA 8 Belag am höchsten ausfällt. Zugleich muss berücksichtigt werden, dass beim Standort Sulz das tiefste Verkehrsaufkommen und die höchsten Geschwindigkeiten beobachtet wurden. Dank der Datenaufbereitung sind diese Einflüsse zwar minimiert, aber nicht ganz auszuschliessen.

Setzt man den Standort Luzern mit dem konventionellen Belag als Bezugspunkt bzgl. der Tempowirkung lässt sich hierzu die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA Belägen vergleichen. Indirekt begründet dies ebenfalls eine Abhängigkeit der Belagswirkung von der Geschwindigkeit: wenn die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf zwei Belägen unterschiedlich ist, so ist auch die resultierende Differenz der Belagswirkungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten unterschiedlich. Konkret ergibt sich hier, gemittelt über alle SDA Standorte und N2-Kategorien, eine Tempowirkung von (50 ± 15) % für die gemessenen SDA Beläge im Bezug zum konventionellen Belag in Luzern. Diese Minderung ist konstant über die verschiedenen N2-Anteile. Eine Temporeduktion am Standort Luzern (konventioneller Belag) zeigt somit eine doppelt so grosse akustische Wirkung wie an den gemessenen Standorten mit LAB.

4.2.3 Einflussfaktor N2-Anteil

Abbildung 12 zeigt die rechnerische Lärmwirkung einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h in Abhängigkeit der N2-Kategorie. Die gefüllten Bereiche zeigen den interpolierten Unsicherheitsbereich (95% Vertrauensintervall aus $\lg(v50)$ Modell).

Am Standort Luzern (konventioneller Belag) ist der Trend mit der bestehenden Datenauswahl leicht steigend, jedoch stark von dem Datenpunkt in der N2-Kategorie 12.5 bis 15 % N2-Anteil beeinflusst, welcher selbst eine grosse Unsicherheit hat. Alle anderen Steigungen sind negativ, was der Erwartung entspricht, dass mit erhöhtem N2-Anteil die Wirkung einer Temporeduktion abnimmt.¹¹ Der un stetige Signalverlauf von Küttigen bei 7.5 bis 10 % N2-Anteil wird durch robuste Messdaten und Stichprobe gestützt, kann jedoch bis dato nicht direkt erklärt werden. Am steilsten ist diese Steigung – und somit Einfluss des N2-Anteils – beim Standort Sulz mit dem Belag des Typen SDA 8.

Betrachtet man den Mittelwert der für jeden Standort mit SDA 4 Belag ermittelten Steigung, ergibt sich ein Wert von $-0.4 \text{ dB}/(10\% \text{ N2-Anteil})$. Das bedeutet beispielsweise, dass die Wirkung einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h an einem Standort mit SDA 4 Belag und 0 % N2-Anteil um 0.4 dB grösser ist als an einem Standort mit SDA 4 Belag und 10 % N2-Anteil.

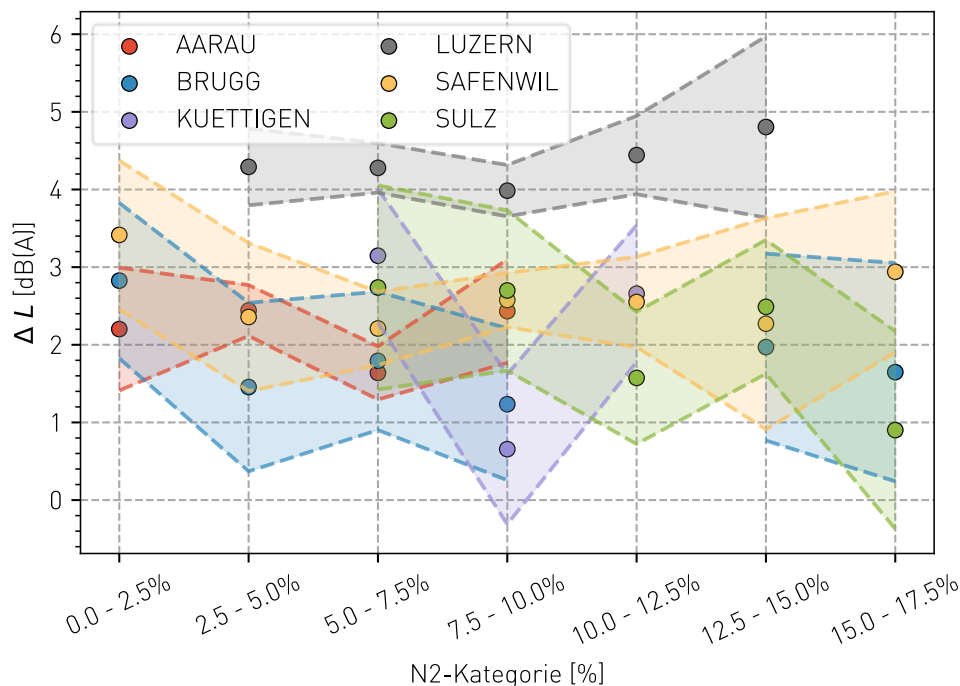


Abbildung 12: Lärmwirkung ΔL einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h in Abhängigkeit der N2-Kategorie. Die Daten sind je Standort inklusive interpolierter Unsicherheitsangaben (gestrichelte Linien und gefüllter Bereich) gezeigt.

¹¹ Bei Fahrzeugen der Kategorie N2 dominiert im Allgemeinen das Antriebsgeräusch stärker über dem Reifen-Fahrbahngeräusch als bei Fahrzeugen der Kategorie N1. Das Antriebsgeräusch ist weniger von der Geschwindigkeit beeinflusst als das Reifen-Fahrbahngeräusch, daher hat eine Geschwindigkeitsreduktion weniger Lärmwirkung für Fahrzeuge der Kategorie N2.

4.3 Lärmwirkung von Belag

Um die Belagswirkung (entsprechend der akustischen Belagsgüte) in unterschiedlichen Temporegimes zu untersuchen, wurden die Offsets a_0 der linearen Regressionsmodelle nach $\lg(v_{50})$ aus Kapitel 4.2 je Standort und N2-Kategorie verglichen. Während die Steigungen a_1 (Tempowirkung) unabhängig von standortspezifischen Korrekturen sind, sind die Offsets a_0 hingegen direkt abhängig von den je Standort angewendeten Korrekturen wie z.B. der Aufstellkorrektur oder akustischen Standortkorrektur (Kapitel 3.5). Das macht diese Analyse fehleranfällig und nicht repräsentativ, da diese Korrekturen weitere Modellunsicherheiten mit sich bringen.

So sollten zum Beispiel die relativen Abstände zwischen den $\lg(v_{50})$ Modellen bei $v_{50} = 50$ km/h den relativen Differenzen der mit den CPX Messungen (Reifen-Fahrbahn Geräusch bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h) ermittelten MV8 Werte je Standort entsprechen. Wie sich diese Verhältnisse bei der Geschwindigkeit $v_{50} = 30$ km/h verändern, gäbe Aufschluss darüber, wie sich die Lärmwirkung des Belags bei tieferen Geschwindigkeiten verhält. Eine solche Analyse ist im Rahmen der Messunsicherheiten, aber auch vom Messkonzept (primärer Fokus ist hier die Tempowirkung) her nicht realisierbar, und eine entsprechende Auswertung zeigt keine konsistenten Ergebnisse. Um Aussagen zur Belagswirkung von LAB bei reduzierten Geschwindigkeiten zu machen wäre ein z.B. Messkonzept im Sinne einer Vorher-Nachher Messung bei einem Belagsersatz in Tempo 30 Situation umzusetzen.

In einer Untersuchung von statistischen Vorbeifahrtsmessungen (SPB Messungen, [15]) bei 30 km/h und 50 km/h auf SDA Belägen im Kanton Aargau [16] konnte eine Reduktion der Belagswirkung um 25 % bei 30 km/h im Vergleich zu 50 km/h ermittelt werden. Bei diesen SPB Messungen handelt es sich im Gegensatz zur hier verwendeten Langzeitmessung jedoch um einzelne Messungen idealisierter Vorbeifahrten bei N2-Anteil 0 %¹². Zur abschliessenden Beantwortung der Belagswirkung unter verschiedenen Temporegimes und Verkehrszusammensetzungen sind gezielte Erhebungen im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten nötig.

Trotzdem kann basierend auf den Ergebnissen dieser Studie indirekt eine Abhängigkeit der Belagswirkung von der Geschwindigkeit gezeigt werden: wenn die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf zwei Belägen unterschiedlich ist, so ist auch die resultierende Differenz der Belagswirkungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten unterschiedlich. Demnach kann die Gesamtwirkung von kombinierten LSM zusammengesetzt werden aus der «Tempowirkung» (Kapitel 4.2, unabhängig von der akustischen Belagsgüte) und der Wirkung eines Belagsersatzes, welche direkt von der Differenz der akustischen Belagsgütewerte beider Beläge abhängt.

4.4 Lärmwirkung kombinierter Lärmschutzmassnahmen Tempo 30 und LAB

4.4.1 Empirische Berechnungsmethode

Basierend auf den Ergebnissen zur Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA Belägen kann folgende empirische Berechnungsmethode zur Abschätzung der Lärmwirkung der kombinierten Lärmschutzmassnahmen Tempo 30 und LAB hergeleitet werden. Diese basiert im Gegensatz zu bestehenden Strassenlärmmodellen auf direkten Ergebnissen aus Langzeitmessungen auf SDA Belägen im betrachteten Geschwindigkeitsbereich.

¹² Die Stichprobe enthielt jeweils nur Personenwagen.

Wie in Abbildung 13 schematisch dargestellt, setzt sich die Lärmwirkung einer kombinierten Lärmschutzmassnahme Tempo 30 (Geschwindigkeitsreduktion) und LAB (Belagsersatz) aus den beiden Teilen $\Delta L(1-2)$ und $\Delta L(2-3)$ zusammen. $\Delta L(1-2)$ entspricht der akustischen Wirkung eines Belagsersatzes zu einem LAB (ursprünglicher Belag: rote Kurve, neuer Belag: blaue Kurve) und kann bei $v = 50$ km/h durch die Differenz der akustischen Belagsgüte abgeschätzt werden. $\Delta L(2-3)$ entspricht der akustischen Wirkung einer Temporeduktion auf LAB (inklusive der dadurch verminderten Belagswirkung) und wurde für SDA Beläge in dieser Studie durch Messungen bestimmt. Wie in Kapitel 4.2 gezeigt, besteht für diese Lärmwirkung eine Abhängigkeit von der Ist- und der Zielgeschwindigkeit sowie vom N2-Anteil, nicht aber von der akustischen Belagsgüte. Hingegen bei der Beurteilung der kombinierten Wirkung von LAB und Temporeduktionen ist die akustische Belagsgüte sehr wohl massgebend (direkter Einfluss auf $\Delta L(1-2)$).

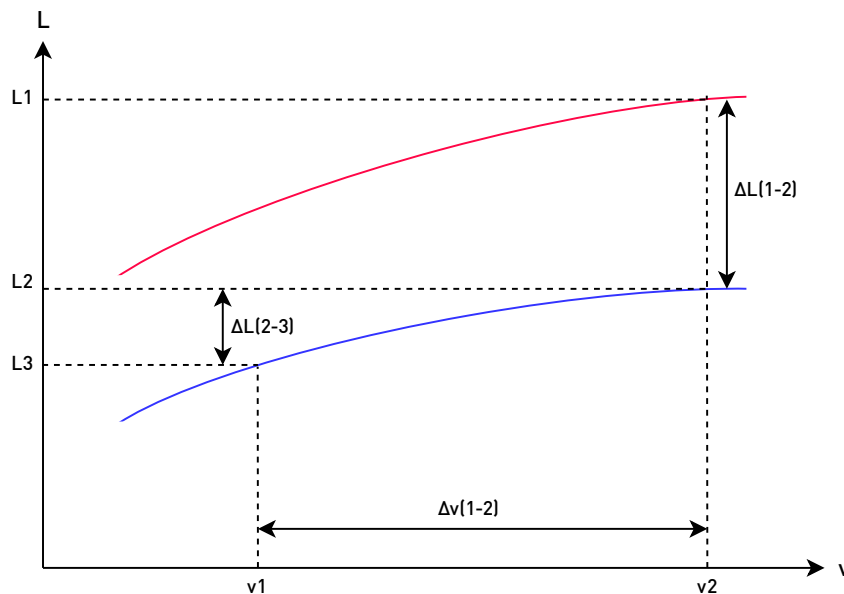


Abbildung 13: Schema zur Lärmwirkung einer Temporeduktion auf zwei Belägen (Belag 1: rote Kurve, Belag 2: blaue Kurve). $\Delta L(1-2)$ entspricht einer Wirkung des Belagsersatzes bei v_2 , $\Delta L(2-3)$ der Wirkung einer Temporeduktion (inklusive der dadurch verminderten Belagswirkung) auf Belag 2.

In diesem Modellverständnis kann $\Delta L(2-3)$ ausgedrückt werden als:

$$\Delta L = [\lg(v_1) - \lg(v_2)] * (b_0 + b_1 * n2\%)$$

mit:

- ΔL ... Lärmwirkung der kombinierten Lärmschutzmassnahmen Belagsersatz und Temporeduktion
- $\lg(v_1) - \lg(v_2)$... Differenz der Logarithmen von Zielgeschwindigkeit (v_1) und Ist-Geschwindigkeit (v_2)
- b_0 ... Offset der linear modellierten Abhängigkeit vom N2-Anteil
- b_1 ... Steigung der linear modellierten Abhängigkeit vom N2-Anteil
- $n2\%$... N2-Anteil in % am Gesamtverkehr

Die beiden Konstanten b_0 und b_1 wurden basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.2 empirisch hergeleitet. Hierzu wurden ein lineares Modell der N2-Abhängigkeit der Lärmwirkung einer Tempore-

duktion erstellt, basierend auf dem gewichteten Mittelwert der Resultate für SDA 4 Beläge. Die Auswertung dazu wurde in den einzelnen N2-Kategorien durchgeführt, um einen Einfluss der Verkehrsnormalisierung auszuschliessen und ergibt folgende Werte:

- $b_0 = 11.4 \text{ dB}/(\lg(\text{km/h}))$
- $b_1 = -0.18 \text{ dB}/(\% * (\lg(\text{km/h})))$

Für den SDA 8 Belag ergibt sich ein grösserer Offset und eine stärkere N2-Abhängigkeit (Steigung b_1), hier liegt jedoch nur eine Messung an einem Standort vor. Daher werden hier nur die SDA 4 Beläge separat betrachtet.

Eine auf diesen Werten basierende Berechnung für vorgegebene Geschwindigkeiten und N2-Anteile findet sich in der Matrix zur Wirkungsabschätzung (Kapitel 6 und Anhang XIV). Die hier für eine Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h ermittelte Lärmwirkung auf SDA Belägen beläuft sich auf -2.5 dB (0 % N2-Anteil) bis -1.9 dB (15 % N2-Anteil).

4.4.2 Unsicherheiten der empirischen Berechnungsmethode

Die empirische Unsicherheit wird durch die Unsicherheiten der ermittelten Konstanten b_0 und b_1 bestimmt. Diese Unsicherheiten δb_0 und δb_1 können durch die Standardabweichung der Eingangsdaten berechnet werden:

- $b_0 \pm \delta b_0 = (11.4 \pm 1.6) \text{ dB}/(\lg(\text{km/h}))$
- $b_1 \pm \delta b_1 = (-0.18 \pm 0.19) \text{ dB}/(\% * (\lg(\text{km/h})))$

Mittels Fehlerfortpflanzung kann so die Unsicherheit der empirischen Berechnungsmethode ($\delta \Delta L$) berechnet werden:

$$\delta \Delta L = [\{ \delta b_0 * (\log(v_{\text{ziel}}) - \log(v_{\text{ist}})) \}^2 + \{ \delta b_1 * (\log(v_{\text{ziel}}) - \log(v_{\text{ist}}) * n2\%) \}^2]^{1/2}$$

Eine auf diesen Werten basierende Abschätzung der Unsicherheiten für vorgegebene Geschwindigkeiten und N2-Anteile findet sich in der Matrix zur Wirkungsabschätzung (Kapitel 6 und Anhang XIV). Die hier für eine Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h ermittelte Unsicherheit der Lärmwirkung beläuft sich auf $\pm 0.4 \text{ dB}$ (0 % N2-Anteil) bis $\pm 0.7 \text{ dB}$ (15 % N2-Anteil).

Zusätzlich zur Unsicherheit der empirischen Berechnungsmethode sind Unsicherheiten im effektiven N2-Anteil und der effektiven Ziel- und Ist-Geschwindigkeit zu berücksichtigen. Für eine mögliche Abschätzung dieser Unsicherheiten bietet sich wiederum die Matrix zur Wirkungsabschätzung (Kapitel 6 und Anhang XIV) an – hier können Geschwindigkeiten und N2-Anteil variiert werden und so eine entsprechende Variation der resultierenden Lärmwirkung abgeschätzt werden. Kombiniert mit den Unsicherheiten der empirischen Berechnungsmethode kann so eine umfängliche Abschätzung der Gesamt-Unsicherheiten gemacht werden.¹³

4.4.3 Grenzen der empirischen Berechnungsmethode

Die empirische Berechnungsmethode beruht auf den Messergebnissen der vier Standorten mit SDA 4 Belag, diese umfassen folgende Bandbreiten in den Verkehrsparametern:

- stündliches Verkehrsaufkommen zwischen 60 Fahrzeuge und 1540 Fahrzeuge

¹³ Für typische Werte ergibt sich so eine totale Unsicherheit von ca. $\pm 1 \text{ dB}$, was gut in Einklang mit der mittleren Streuung der Messwerte je Temporegime und Standort von $\pm 0.9 \text{ dB}$ steht.

- N2-Anteil zwischen 0 % und 17.5 %
- Geschwindigkeit (v50) zwischen 29 km/h und 53 km/h
- SDA 4 Beläge mit akustischer Belagsgüte MV8 von -6.7 dB bis -4.6 dB

Eine Anwendung der empirischen Berechnungsmethode beschränkt sich daher auf SDA 4 Beläge mit hierfür typischen akustischen Belagsgütewert. Der SDA 8 Belag zeigt prinzipiell vergleichbare Ergebnisse, jedoch eine verstärkte Abhängigkeit der Lärmwirkung durch Temporeduktion von dem N2-Anteil. Ab einem lärmrelevanten Verkehrsaufkommen deckt die empirische Berechnungsmethode bis zu hohen DTV Werten alle Verkehrsaufkommen ab, ebenso sind N2-Anteile von 0 % bis 17.5 % abgedeckt. Der Geschwindigkeitsbereich erstreckt sich über Geschwindigkeiten von über 50 km/h bis unter 30 km/h. Geschwindigkeiten (v50) deutlich unterhalb von 30 km/h sollten zurückhaltend bewertet werden.

5. Bezug zu bestehenden Modellen

Um die auf Messungen unter Echtbedingungen basierende und empirisch erarbeitete Methode zur Abschätzung der Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen zu plausibilisieren, wurde diese in Relation zu dem bestehenden, seit 2021 gültigen Strassenlärmmodell *sonROAD18* [10] und dem *Modell VSS* [9] gestellt. Beide Modelle decken auch tiefe Geschwindigkeiten ab, das *Modell VSS* wurde spezifisch zur Beurteilung von Tempo 30 Situationen entwickelt. Allerdings ist in beiden Modellen die Anwendung auf SDA Beläge rein rechnerisch umgesetzt und wurde nicht mit direkten Messdaten überprüft.

Für einen Vergleich wurden für die drei Standorte Küttigen, Safenwil und Sulz die jeweiligen CPX-Messwerte zur Definition des Strassenbelags über eine Belagsschnittstelle in *sonROAD18* und *Modell VSS* verwendet. Mit diesen Standorten kann so die maximale Variation der akustischen Belagsgüte im Rahmen der Messungen dieser Untersuchung abgebildet werden (MV8 von -4.2 dB bis -6.7 dB), wobei zu berücksichtigen ist, dass in Sulz ein SDA 8 Belag gemessen wurde. Auf dieser Grundlage wurde für diese Standorte mit *sonROAD18*, *Modell VSS* und der in diesem Projekt erarbeiteten Methode (*empirische Methode*, unabhängig von der akustischen Belagsgüte) modelliert:

- Lärmwirkung $\Delta L_{85\%}$ in Abhängigkeit der Zielgeschwindigkeit bei Ausgangsgeschwindigkeit 50 km/h und N2-Anteil 8 % (Abbildung 14).
- Lärmwirkung $\Delta L_{85\%}$ in Abhängigkeit des N2-Anteils bei Ausgangsgeschwindigkeit 50 km/h und Zielgeschwindigkeit 30 km/h (Abbildung 15).

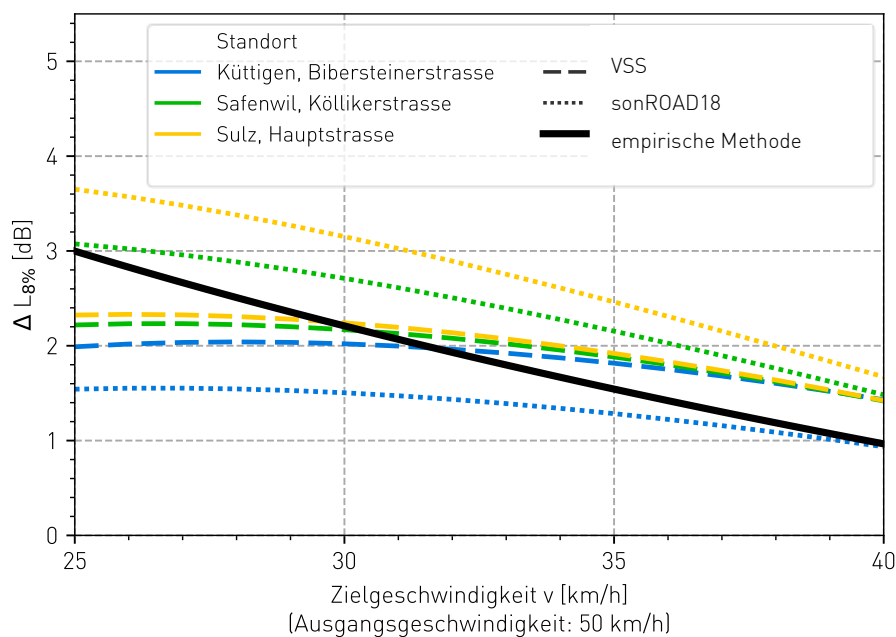


Abbildung 14: Vergleich verschiedener Modellprognosen zur Lärmwirkung einer Temporeduktion bei N2-Anteil 8 % und Ausgangsgeschwindigkeit 50 km/h in Abhängigkeit der Zielgeschwindigkeit. Die Modelle *sonROAD18* und *Modell VSS* wurden mit den für Küttigen, Safenwil und Sulz erfassten Belagswerten modelliert. Bei der in diesem Projekt erarbeiteten Methode (*empirische Methode*) ist die Wirkung hingegen unabhängig von einer Belagskorrektur.

Die in Abbildung 14 gezeigte Abhängigkeit der Lärmwirkung von der Zielgeschwindigkeit liegt für die empirische Methode im Bereich der in *sonROAD18* prognostizierten Wirkungen für die verschiedenen Standorte – bei *sonROAD18* ist eine starke Abhängigkeit von der akustischen Belagsgüte zu beobachten¹⁴. Im Vergleich zum *Modell VSS* ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit bei der empirischen Methode ausgeprägter und es finden sich bei Zielgeschwindigkeiten über 30 km/h weniger grosse, unter 30 km/h grössere Lärmwirkungen für die in diesem Projekt erarbeitete empirische Berechnungsmethode¹⁵.

Besonders bei Geschwindigkeiten unter 30 km/h ist die Abhängigkeit von der Zielgeschwindigkeit bei der empirischen Berechnungsmethode ausgeprägter als in *sonROAD18* und *Modell VSS*. Da die der empirischen Berechnungsmethode zugrundeliegenden Messungen nur Datenpunkte bis $v_{50} = 29$ km/h umfassen, sollte dieser Bereich mit tiefen Zielgeschwindigkeiten zurückhaltend beurteilt werden.

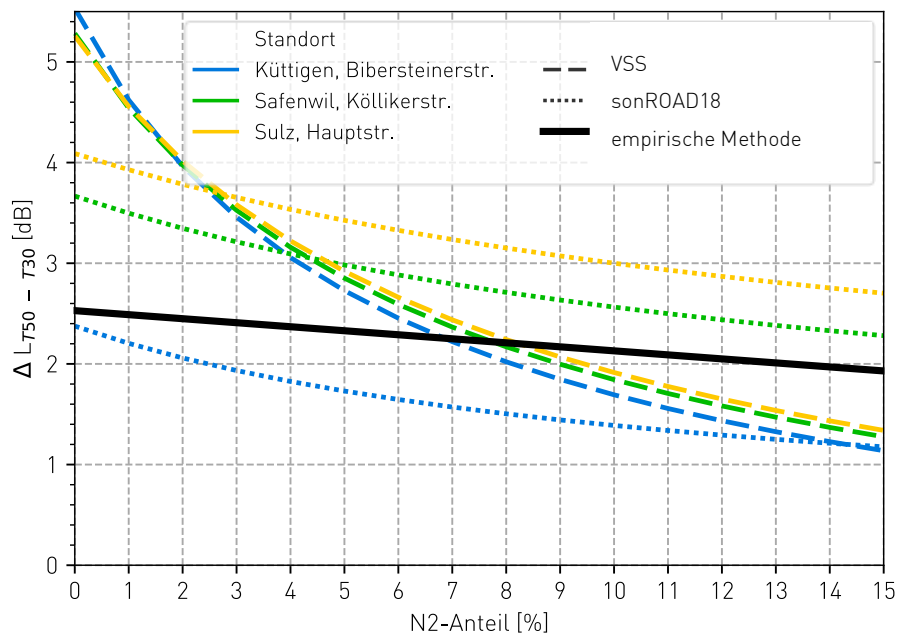


Abbildung 15: Vergleich verschiedener Modellprognosen zur Lärmwirkung einer Temporeduktion bei Ausgangsgeschwindigkeit 50 km/h und Zielgeschwindigkeit 30 km/h in Abhängigkeit des N2-Anteils. Die Modelle *sonROAD18* und *Modell VSS* wurden mit den für Küttigen, Safenwil und Sulz erfassten Belagswerten modelliert. Bei der in diesem Projekt erarbeiteten Methode (*empirische Methode*) ist die Wirkung hingegen unabhängig von einer Belagskorrektur.

Abbildung 15 zeigt den Einfluss des N2-Anteils in den verschiedenen Modellen. In der mittels Daten aus Langzeitmessungen entwickelten empirischen Berechnungsmethode ist dieser am wenigsten stark ausgeprägt und linear. Diese Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus der Studie *Lärmwirkung von Tempo 30 bei LKW* [17]. Das *Modell VSS* zeigt wiederum nur geringen Einfluss der akustischen Belagsgüte, jedoch eine sehr ausgeprägte Abhängigkeit vom N2-Anteil mit sehr grossen

¹⁴ Je kleiner der Belagsgütewert (MV8), desto kleiner fällt die Lärmwirkung einer Temporeduktion aus. Im untersuchten Bereich der Belagswirkungen von -4.2 bis -6.7 beträgt der Wirkungsunterschied bis zu 2 dB.

¹⁵ Die bei tiefen Geschwindigkeiten prognostizierte Wirkung stagniert im *Modell VSS*, da hier Einflüsse vom Antriebsgeräusch dominieren und weitere Faktoren wie Fahrstil und Gangwahl mit einbezogen werden.

Lärmwirkungen bei tiefen N2-Anteilen. Für die Lärmwirkung einer Temporeduktion prognostiziert *sonROAD18* neben der Abhängigkeit von der akustischen Belagsgüte einen deutlichen Einfluss des N2-Anteils, ebenfalls stärker als in der hier entwickelten empirischen Berechnungsmethode.

Der insgesamt abgeschwächte Einfluss des N2-Anteils in der empirischen Berechnungsmethode kann durch die unterschiedliche Herleitung erklärt werden: im *Modell VSS* und *sonROAD18* wird die Gesamtemission aus einzelnen, idealisierten Quellen zusammengesetzt, wohingegen bei den der empirischen Berechnungsmethode zugrundeliegenden Messungen unter Echtbedingungen die resultierende Gesamtemission erfasst wird.

6. Synthese: Matrix zur Wirkungsabschätzung

Die in Kapitel 4.4 beschriebene empirische Berechnungsmethode zur Abschätzung der Lärmwirkung von kombinierten Lärmschutzmassnahmen Tempo 30 und LAB wird hier für unterschiedliche Anwendungsszenarien mit für vorgegebene Geschwindigkeiten und N2-Anteile berechneten Werten als Nachschlagetabelle dargestellt. Die sogenannte Matrix zur Wirkungsabschätzung findet sich für N2-Anteile von 0 % bis 15 % im Anhang XIV und wird folgend erläutert. Die Grenzen (siehe Kapitel 4.4.3) und Unsicherheiten der empirischen Berechnungsmethode (siehe Kapitel 4.4.2) sind hierbei zu beachten.

6.1 Wirkungsprognose Temporeduktion auf SDA 4

Wird auf einem bestehenden SDA 4 Belag die effektive Geschwindigkeit reduziert, kann die zu erwartende Lärmwirkung der Temporeduktion direkt aus der entsprechenden Matrix zur Wirkungsabschätzung abgelesen werden. Wie in Abbildung 16 mit dem grünen Pfeil gezeigt, ändert sich der Lärmpegel entsprechend der Temporeduktion und hängt nur von den drei Variablen Ist-Geschwindigkeit, Zielgeschwindigkeit und N2-Anteil ab.

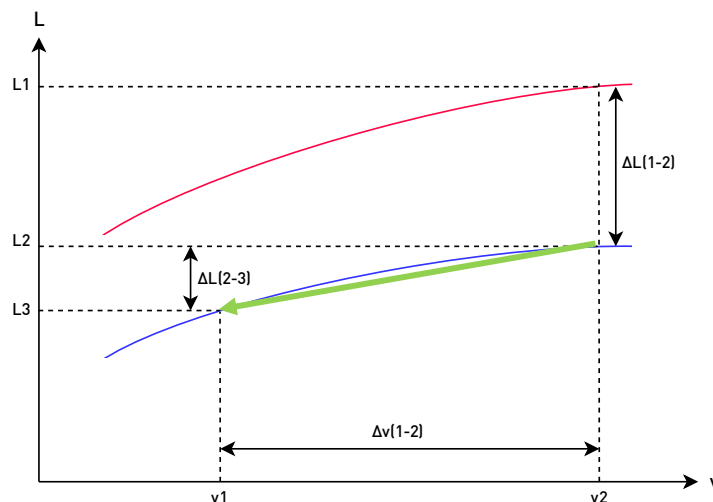


Abbildung 16: Schema zur Lärmwirkung einer Temporeduktion (grüner Pfeil)

In Tabelle 3 ist die Matrix zur Wirkungsabschätzung für einen N2-Anteil von 8 % gezeigt, weitere Matrizen für 0 %, 3 %, 6 %, 9 %, 12 % und 15 % N2-Anteil finden sich in Anhang XIV. Durch die Wahl der Ist-Geschwindigkeit und der Zielgeschwindigkeit kann die Prognose der entsprechenden Lärmwirkung abgelesen werden. Mit dem unteren Teil der Matrix kann die entsprechende Unsicherheit der Berechnungsmethode bestimmt werden. Hierzu kommen noch ggf. weitere Unsicherheiten wie in Kapitel 4.4.2 beschrieben dazu.

Tabelle 3: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 8 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
8 %		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-2.0	-1.9	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	0.0
	41	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
	42	-2.3	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
	43	-2.4	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3
	44	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4
	45	-2.6	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
	46	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6
	47	-2.7	-2.6	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7
	48	-2.8	-2.7	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8
	49	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9
	50	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
	51	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
	52	-3.2	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1
	53	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2
	54	-3.3	-3.2	-3.0	-2.8	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3
	55	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	42	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	43	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	45	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	46	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	47	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	48	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	49	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	50	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	51	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2
	52	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2
	53	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	54	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	55	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3

6.2 Wirkungsprognose Temporeduktion kombiniert mit Belagsersatz zu SDA 4

Wird ein Belagsersatz von einem konventionellen Belag zu einem SDA 4 Belag kombiniert mit einer Temporeduktion, können beide Wirkungen addiert werden, wie in Abbildung 17 mit dem durchgezogenen orangen und grünen Pfeil dargestellt. Die Lärmwirkung der Temporeduktion wird dazu wie in Kapitel 6.1 beschrieben aus der Matrix zur Wirkungsabschätzung abgelesen. Die Lärmwirkung des Belagsersatzes ergibt sich wie in Kapitel 4.3 beschrieben zu $\Delta KB = KB(\text{Ziel}) - KB(\text{Ist})$ und entspricht der Differenz der akustischen Belagsgüte von Ziel- und Ist-Belag. KB bezieht sich hierbei auf den entsprechenden Mischverkehrswert (N2-Anteil) bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h. Eine von 50 km/h abweichende Ist-Geschwindigkeit ist zusätzlich zu berücksichtigen.

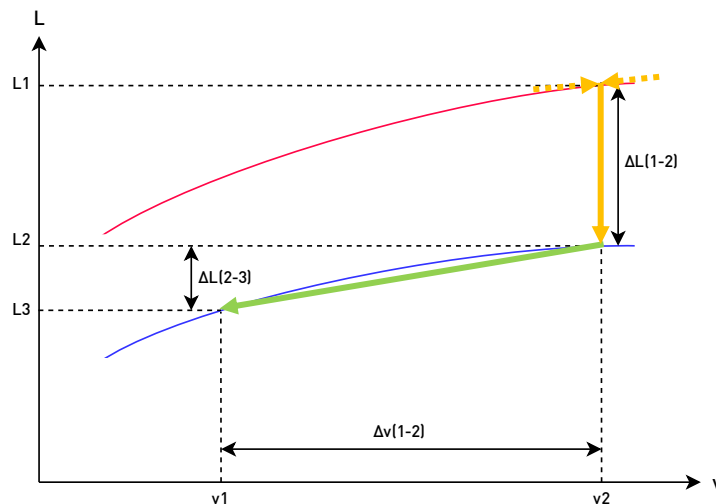


Abbildung 17: Schema Belagsersatz und Temporeduktion mit evtl. von 50 km/h abweichender Ist-Geschwindigkeit ($v_2 = 50$ km/h). Zur bekannten Wirkung der Temporeduktion auf SDA 4 (grüner Pfeil) kann die Wirkung des Belagsersatzes bei 50 km/h hinzuaddiert werden (durchgezogener orangener Pfeil). Eine von 50 km/h abweichende Ist-Geschwindigkeit auf dem Ausgangsbelag ist bezüglich der Lärmwirkung zu berücksichtigen (gestrichelte orangene Pfeile), aber nicht Teil dieser Studie.

Wird ΔKB beispielsweise aus einer CPX-Messung bei 50 km/h ermittelt oder aufgrund typischer Werte für die beteiligten Strassenbeläge abgeschätzt, ist zu beachten, dass diese Belagswirkung bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h gilt. Eine von dieser Referenzgeschwindigkeit eventuell abweichende Ist-Geschwindigkeit auf dem bestehenden Belag hat mindernden oder verstärkenden Einfluss auf die Lärmwirkung und muss zusätzlich berücksichtigt werden (gestrichelte orangene Pfeile in Abbildung 17).

Die so beteiligte Lärmwirkung einer eventuell von 50 km/h abweichenden Ist-Geschwindigkeit auf dem ursprünglichen Belag ist abhängig vom bestehenden Belag und nicht Teil dieser Studie. Entweder kann diese aus bestehenden Messungen oder Projekten standortspezifisch bestimmt werden bzw. muss diese mit Strassenlärmmodellen für konventionelle Beläge abgeschätzt werden.

6.3 Wirkungsprognose Belagsersatz zu SDA 4 bei bestehender Tempo 30 Situation

Die Lärmwirkung eines Belagsersatzes in bestehender Tempo 30 Situation kann hier nicht direkt bestimmt werden, da die Belagswirkung von LAB bei reduzierten Geschwindigkeiten im Rahmen dieser Studie nicht direkt bestimmt wurde. Zur indirekten Abschätzung kann die Wirkung eines Belagsersatzes bei 50 km/h (durchgezogener orangener Pfeil in Abbildung 18) mit der Wirkung einer Temporeduktion

auf SDA 4 addiert werden. Davon muss die bestehende Wirkung der Temporeduktion auf dem ursprünglichen Belag (gestrichelter oranger Pfeil) abgezogen werden.

Die Lärmwirkung der Temporeduktion auf SDA 4 wird dazu wie in Kapitel 6.1 beschrieben aus der Matrix zur Wirkungsabschätzung abgelesen. Die Lärmwirkung des Belagsersatzes ergibt sich wie in 4.3 beschrieben zu $\Delta KB = KB(\text{Ziel}) - KB(\text{Ist})$ und entspricht der Differenz der akustischen Belagsgüte von Ziel- und Ist-Belag. KB bezieht sich hierbei auf den entsprechenden Mischverkehrswert (N2-Anteil) bei Referenzgeschwindigkeit 50 km/h. Daher ist zusätzlich die bestehende Lärmwirkung durch die bereits bestehende Tempo 30 Situation auf dem ursprünglichen Belag zu berücksichtigen. Diese Lärmwirkung ist abhängig vom ursprünglichen Belag und nicht Teil dieser Studie. Entweder kann diese aus bestehenden Messungen oder Projekten standortspezifisch bestimmt werden bzw. muss diese mit Strassenlärmmodellen für konventionelle Beläge abgeschätzt werden.

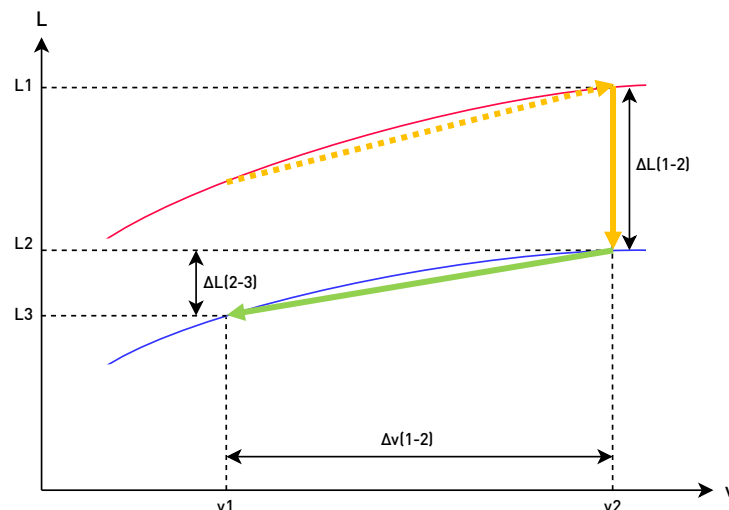


Abbildung 18: Schema Belagsersatz bei bestehender Tempo 30 Situation. Zur bekannten Wirkung der Temporeduktion auf SDA 4 (grüner Pfeil) kann die Wirkung des Belagsersatzes bei 50 km/h hinzuaddiert werden (durchgezogener, oranger Pfeil, $v_2 = 50$ km/h). Die bestehende Lärmwirkung von Tempo 30 auf dem Ausgangsbelag ist davon abzuziehen (gestrichelter oranger Pfeil), deren Bestimmung ist jedoch nicht Teil dieser Studie.

6.4 Anwendungsbeispiele

Zur Illustration einer möglichen Anwendung der hier erarbeiteten Matrix zur Wirkungsabschätzung sind entsprechend den Fällen in Kapitel 6.1 bis 6.3 fiktive Beispielsrechnungen aufgeführt.

6.4.1 Beispiel 1: Einführung Tempo 30 auf SDA 4 Belag

Ausgangslage: Auf einem Strassenabschnitt mit bestehendem SDA 4 Belag in gutem Zustand soll die signalisierte Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h geändert werden. Die Verkehrssituation ist übersichtlich und die Umsignalisation involviert keine strukturellen Änderungen wie Hindernisse o.ä. . Aufgrund einer vorgängigen Verkehrszählung ist bekannt, dass tagsüber der N2-Anteil typischerweise bei 5 % bis 7 % liegt und der Median der gefahrenen Geschwindigkeiten bei 52 km/h.

Fragestellung: Welche Lärmreduktion kann mit der Umsignalisation erzielt werden, angenommen die Verkehrszusammensetzung bleibt vergleichbar und die effektiv gefahrene Geschwindigkeit lässt sich durch die Massnahmen auf $v_{50} = 35$ km/h reduzieren?

Abschätzung: Für N2-Anteil 6 % kann in Tabelle 7 eine Wirkungsprognose von -1.8 dB bei einer Reduktion der Geschwindigkeit von 52 km/h auf 35 km/h nachgeschlagen werden und ebenso die damit verbundene Unsicherheit der Berechnungsmethode von ± 0.3 dB.

Um weitere Unsicherheiten der Prognose zu berücksichtigen, wie die Variation des N2-Anteils (5 % bis 7 %) oder ein erwarteter Bereich der Zielgeschwindigkeit (z.B. 30 km/h bis 37 km/h), kann die entsprechende Variation der Wirkung nachgeschlagen werden und im Sinne einer Fehlerfortpflanzung addiert werden:

$$\delta\Delta L = \text{Wurzel}(\delta_{\text{Modell}}^2 + \{\delta_{\text{n2\%}}\}^2 + \{\delta_{\text{v-Ziel}}\}^2)$$

$$\delta\Delta L = \text{Wurzel}(\{0.3 \text{ dB}\}^2 + \{0.1 \text{ dB}\}^2 + \{1.0 \text{ dB}\}^2) = 1.0 \text{ dB}$$

$\delta_{\text{n2\%}}$ wurde dabei als Differenz der Wirkungsprognose bei N2-Anteil 3 % und N2-Anteil 6 % abgeschätzt und stellt mit 3 % N2-Variation eine obere Grenze dafür dar. Für $\delta_{\text{v-Ziel}}$ wurde die Differenz der Wirkung mit den verschiedenen Zielgeschwindigkeiten ermittelt.

Zusammenfassend kann also eine Lärmreduktion von (-1.8 ± 1.0) dB erwartet werden.

6.4.2 Beispiel 2: Belagsersatz AC 8 zu SDA 4 und Einführung Tempo 30

Ausgangslage: Im Rahmen einer Belagssanierung wird auf einem Strassenabschnitt mit bestehendem AC 8 Belag ein SDA 4 Belag eingebaut. Zusätzlich wird die signalisierte Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h geändert. Die Verkehrssituation ist übersichtlich und die Umsignalisation involviert keine strukturellen Änderungen wie Hindernisse o.ä. . Es wird ein N2-Anteil von 10 % geschätzt. Der Belagskennwert für AC 8 liegt gemäss *Leitfaden Strassenlärm Anhang 1b* [18] bei 0 dB.

Fragestellung: Welche Lärmreduktion kann mit der Belagssanierung, kombiniert mit der Einführung von Tempo 30 erzielt werden?

Abschätzung: Wird für den SDA 4 Belag ein Endwert der akustischen Belagsgüte von -3 dB angenommen, so ergibt sich durch die Belagssanierung eine Lärmwirkung von $(-3 - 0)$ dB = -3 dB.

Hierzu kann die Lärmwirkung der Temporeduktion (inklusive der verminderten Belagswirkung bei niedrigen Geschwindigkeiten) auf SDA 4 addiert werden. Für N2-Anteil 10 % kann in Tabelle 8 (N2-Anteil = 9 % als nächstliegende Abschätzung) eine Wirkungsprognose von (-2.2 ± 0.5) dB bei einer Reduktion der Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h nachgeschlagen werden.

Die Summe beider Wirkungen ergibt sich somit zu $\Delta L = -3 \text{ dB} + (-2.2 \text{ dB}) = -5.2 \text{ dB}$.

Bemerkung: Eine eventuell von 50 km/h abweichende Ist-Geschwindigkeit ist hierbei nicht berücksichtigt und würde bei Werten über 50 km/h zu einer erhöhten Gesamtwirkung führen, bzw. bei Geschwindigkeiten unter 50 km/h zu einer reduzierten Gesamtwirkung. Der Wert dieser Zunahme oder Reduktion der Gesamtwirkung ist durch die geschwindigkeitsabhängige Lärmemission auf dem AC 8 Belag gegeben und kann z.B. mit *sonROAD18* bestimmt werden.

6.4.3 Beispiel 3: Belagsersatz SMA 8 zu SDA 4 in bestehender Tempo 30 Situation

Ausgangslage: Im Rahmen einer Belagssanierung wird auf einem Strassenabschnitt mit bestehendem SMA 8 Belag ein SDA 4 Belag eingebaut. Es besteht bereits eine Tempo 30 Situation vom Typ *Strecke*¹⁶. Mit einer Verkehrszählung wird gemessen, dass die Geschwindigkeit v_{50} bei 28 km/h und der N2-Anteil bei 3 % liegen. Der Belagskennwert gemäss *Leitfaden Strassenlärm Anhang 1b* [18] liegt für den SMA 8 Belag bei +1 dB (Referenzgeschwindigkeit 50 km/h).

Fragestellung: Welche Lärmreduktion kann mit der Belagssanierung in der bestehenden Tempo 30 Situation erwartet werden?

Abschätzung: Wird für den SDA 4 Belag ein Endwert der akustischen Belagsgüte von -3 dB angenommen, so ergibt sich durch die Belagssanierung eine Lärmwirkung von $(-3 - (+1))$ dB = -4 dB bei 50 km/h.

Von diesem Wert muss die Lärmwirkung der bestehenden Tempo 30 Situation abgezogen werden (entsprechend dem gestrichelten orangen Pfeil in Abbildung 18). Diese Wirkung wird z.B. im *Modell VSS* berechnet und ergibt sich in diesem Fall zu -3.7 dB.

Schliesslich wird die Lärmwirkung auf dem SDA 4 Belag abgeschätzt, für eine Temporeduktion von 50 km/h zu 30 km/h ergibt sich gemäss Tabelle 6 eine Lärmwirkung von -2.4 dB.

Die resultierende Gesamtwirkung von Belagsersatz, fiktiver Tempozunahme auf SMA 8 und fiktiver Temporeduktion auf SDA 4 ergibt sich somit zu $\Delta L = -4 \text{ dB} - (-3.7 \text{ dB}) + (-2.4 \text{ dB}) = -2.7 \text{ dB}$.

Bemerkung: Ein Vergleich der Wirkung des Belagsersatzes bei 50 km/h (-4 dB) und bei 30 km/h (-2.7 dB) zeigt eine um gut 30 % reduzierte Wirkung bei 30 km/h. Da die in dieser Studie erarbeitete Wirkungsprognose für Temporeduktionen auf SDA 4 Belägen unabhängig von der akustischen Belagsgüte ist, kann diese Aussage jedoch nicht verallgemeinert werden und muss situationsspezifisch berechnet werden.

6.5 Leitfaden zur Auswahl der Berechnungsmethode

Um für eine spezifische Ausgangssituation betreffend Strassenbelag und Temporegime die geeignetste Methode zur Wirkungsabschätzung verschiedener Lärmschutzmassnahmen zu wählen, ist in Abbildung 19 ein Auswahl-schema dargestellt. In Abhängigkeit der Ausgangssituation (konventioneller Belag vs. LAB, Tempo 50 vs. Tempo 30) und der geplanten LSM (Tempo 30, LAB, Kombination LAB und Tempo 30) gibt dieser Leitfaden eine Empfehlung zur Wahl der Berechnungsmethode um die Lärmwirkung zu prognostizieren: *sonROAD18* [10], *Modell VSS* [9], *Leitfaden Strassenlärm* [18] oder die hier erarbeitete *empirische Berechnungsmethode*. Es sind für jede Methode die entsprechenden Modellgrenzen und Anwendungsgebiete zu berücksichtigen.

¹⁶ Der Tempo 30 Zonentyp *Strecke* ist durch eine Realisierung nur mit Geschwindigkeitssignalisation, ohne begleitende Massnahmen und ohne Zonengestaltung charakterisiert. Im Gegensatz dazu stehen die Zonentypen *Zone übersichtlich* und *Zone eng* mit entsprechenden weiteren Massnahmen.

Ausgangssituation	Belag mit bekannter Wirkung Tempo 50	Belag konventionell Tempo 50	LAB Tempo 50	Belag konventionell Tempo 30	Belag konventionell Tempo 30
Massnahme(n)	LAB	Tempo 30	Tempo 30	Tempo 30 LAB	LAB
Methode Wirkungsabschätzung	→ Ermittlung der Belagswirkung gemäss Leitfaden Strassenlärm	Fall 1: normalverteilte Geschwindigkeiten, konstante Fahrweise → sonROAD18 Fall 2: Geschwindigkeitsverteilungen asymmetrisch, Berücksichtigung von Einfluss Fahrverhalten → Modell VSS (VSS 2012/214)	→ empirische Berechnungsmethode Anwendungsfall Kapitel 6.1 Beispiel Kapitel 6.4.1	→ empirische Berechnungsmethode Anwendungsfall Kapitel 6.2 Beispiel Kapitel 6.4.2	→ empirische Berechnungsmethode mit sonROAD18 bzw. Modell VSS Anwendungsfall Kapitel 6.3 Beispiel Kapitel 6.4.3

Tempo 30 = Geschwindigkeitsreduktion stufenlos möglich

Abbildung 19: Leitfaden zur Auswahl der Methode zur Wirkungsabschätzung der Lärmschutzmassnahmen Tempo 30, LAB oder einer Kombination beider in Abhängigkeit der Ausgangssituation.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Durchgeführte Messungen und Datenaufbereitung

- Zur Messung der Lärmwirkung von Temporeduktionen auf LAB wurden an fünf Standorten mit SDA Belägen im Kanton Aargau und einem Standort mit konventionellem Belag im Kanton Luzern Lärmimmissionen und Verkehrsdaten über jeweils mehr als zehn Tage erfasst. Im Messzeitraum wurde im Rahmen einer Testsignalisation bzw. Neusignalisation die geltende Höchstgeschwindigkeit für mindestens drei Tage von 50 km/h auf 30 km/h geändert, um so in Echtbedingungen die Lärmwirkung einer Temporeduktion zu bestimmen.
- Nach einer umfangreichen Aufbereitung, Korrektur und Normalisierung konnten die Messdaten weitgehend frei von Stör-, Standort- oder Modelleinflüssen betrachtet werden. Hierzu wurden die Daten in N2-Kategorien unterteilt, je 30 Minuten Messzeit verarbeitet.

Einflussfaktoren auf Wirkungen

- Es zeigt sich, dass die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA Belägen im Rahmen der Messunsicherheiten nicht von der akustischen Belagsgüte bestimmt wird, sondern primär vom Belagstyp (konventionell oder LAB).
- Bei der Beurteilung der kombinierten Wirkung von LAB und Temporeduktionen ist hingegen die akustische Belagsgüte sehr wohl massgebend als direkte Einflussgrösse auf die akustische Wirkung des Belagsersatzes.
- Die Lärmwirkung einer Temporeduktion bei SDA Belägen ist im Vergleich zu konventionellen Belägen kleiner. Da eine Temporeduktion zu einer Minderung des Rollgeräuschs (Anregung, Entlüftung und Schallabsorption) führt, wird bei konventionellen Belägen, welche über einen höheren Rollgeräuschanteil als SDA Beläge verfügen, eine entsprechend grössere Lärmwirkung erzielt.
- Eine weitere Variable ist der N2-Anteil – mit steigendem N2-Anteil lässt die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA Belägen leicht nach.

Empirische Berechnungsmethode

- Basierend auf den Messergebnissen der vier Standorte mit SDA 4 Belag wurden empirische Konstanten ermittelt um die Lärmwirkung einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen (inklusive der verminderten Belagswirkung bei niedrigen Geschwindigkeiten) rechnerisch in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit sowie des N2-Anteils abzuschätzen. Demnach ist beispielsweise bei einem N2-Anteil von 6 % für eine Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h eine Lärmwirkung von $-2.3 \text{ dB} \pm 0.4 \text{ dB}$ zu erwarten.
- Zur Plausibilisierung wurde diese empirische Berechnungsmethode mit den Strassenlärmmodellen *sonROAD18* und *Modell VSS* in den Variablen Zielgeschwindigkeit, N2-Anteil und akustischer Belagsgüte verglichen. Die Grössenordnung der prognostizierten Lärmwirkung einer Temporeduktion ist in erster Ordnung vergleichbar, allerdings zeigt die hier erarbeitete Methode eine abgeschwächte Abhängigkeit vom N2-Anteil, einen grösseren Einfluss der Zielgeschwindigkeit für Geschwindigkeiten unter 30 km/h und ist unabhängig von der akustischen Belagsgüte des SDA 4 Belags.

Hinweise für die Anwendung in der Praxis

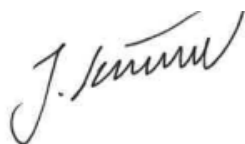
- Zur erleichterten Anwendung der empirischen Berechnungsmethode stehen mehrere Tabellen als Matrix zur Wirkungsabschätzung einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen (inklusive der verminderten Belagswirkung bei niedrigen Geschwindigkeiten) zur Verfügung, ebenso die zugehörige Angabe der Unsicherheit der Berechnungsmethode.
- Für die Prognose der Wirksamkeit von kombinierten Lärmschutzmassnahmen kann mit der empirischen Berechnungsmethode die Wirkung eines Belagsersatzes zur ermittelten Tempowirkung adaptiert werden. Die Anwendung wird dadurch erleichtert, dass die Wirkung des Belagsersatzes gemäss der etablierten Praxis (Belagsgütewerte bei 50 km/h) bestimmt werden kann.

Ausblick

- Eine direkte Ermittlung der Belagswirkung von LAB bei reduzierten Geschwindigkeiten konnte mit dem gewählten Messkonzept nicht allgemein gültig ermittelt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, zum Beispiel mit Vorher-Nachher Messungen bei Belagssanierungen in bestehenden Tempo 30 Situationen.
- Erste Realisierungen kombinierter Lärmschutzmassnahmen LAB und Tempo 30 könnten messtechnisch eng begleitet werden, um weitere Erkenntnisse zu sammeln und die bestehende Arbeit zu verfeinern und auszubauen.
- Als Synergie von Temporeduktionen ist eine Verbesserung der Verkehrssicherheit und Verstetigung des Verkehrsflusses bekannt - speziell auf LAB könnte zudem auch eine Verlängerung der akustischen Lebensdauer vermutet werden. Die Lebensdauer von LAB ist im Vergleich zu konventionellen Belägen reduziert und wird mutmasslich bei niedrigeren Geschwindigkeiten durch kleinere mechanische Belastungen verlängert werden.

Mit dieser, auf akustischen Langzeitmessungen basierten, Studie ist der Grundstein für die Planung und den Einsatz von kombinierten Lärmschutzmassnahmen gelegt. Diese Massnahmenkombination von Temporeduktionen und LAB hilft die Lärmbelastung weiter zu reduzieren.

Grolimund + Partner AG



Johannes Schindler



Felix Schlatter



Erik Bühlmann

Anhang

I Abkürzungen und Glossar

CPX	close proximity; nach ISO 11819-2:2017 normierte Messmethode der Reifen-Fahrbahngeräusche zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen																		
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsmenge in Fahrzeugen pro Tag																		
Exclude	aufgrund von Unregelmässigkeiten, Messfehlern, unpassenden Messbedingungen oder statistischer Regeln von der weiteren Analyse ausgeschlossener Mess- bzw. Datenpunkt																		
KB	Wert der akustischen Belagswirkung im Vergleich zum EMPA-Modell StL-86+ (Einheit dB)																		
KZM	Kurzzeitmessung																		
LAB	lärmarmen Belag (hierfür typische Bauweise ist z.B. SDA)																		
Leq	äquivalenter, A-bewerteter Dauerschallpegel über eine bestimmte Messzeit in dB(A)																		
Lf	Leq je Terzband																		
Lmax, Lmin	maximaler bzw. minimaler Schalldruckpegel innerhalb einem bestimmten Messintervall																		
Lnorm	korrigierter und normalisierter Emissionspegel Leq über 30 Minuten je Fahrzeug in dB(A)																		
LSM	Lärmschutzmassnahmen																		
LZM	Langzeitmessung																		
MV8	akustische Belagsgüte mit N2-Anteil 8%, ausgewiesen als Wirkung im Vergleich zum EMPA-Modell StL-86+ (Einheit dB)																		
N2-Anteil, n2%	Anteil lauter Fahrzeuge am Gesamtverkehr; Zuordnung der swiss10 Klassen in die Klassen N1 und N2 der Lärmschutzverordnung: <table border="1" data-bbox="491 1727 1409 1798" style="margin-left: 40px; border-collapse: collapse; width: 100%;"> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px;">swiss10 Klasse</td> <td style="padding: 2px;">1</td> <td style="padding: 2px;">2</td> <td style="padding: 2px;">3</td> <td style="padding: 2px;">4</td> <td style="padding: 2px;">5</td> <td style="padding: 2px;">8</td> <td style="padding: 2px;">9</td> <td style="padding: 2px;">10</td> </tr> <tr> <td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px;">N1 oder N2</td> <td style="padding: 2px;">N2</td> <td style="padding: 2px;">N2</td> <td style="padding: 2px;">N1</td> <td style="padding: 2px;">N1</td> <td style="padding: 2px;">½ N1, ½ N2</td> <td style="padding: 2px;">N2</td> <td style="padding: 2px;">N2</td> <td style="padding: 2px;">N2</td> </tr> </table>	swiss10 Klasse	1	2	3	4	5	8	9	10	N1 oder N2	N2	N2	N1	N1	½ N1, ½ N2	N2	N2	N2
swiss10 Klasse	1	2	3	4	5	8	9	10											
N1 oder N2	N2	N2	N1	N1	½ N1, ½ N2	N2	N2	N2											
n2n, n2t	mittlerer N2-Anteil nachts bzw. tags																		
nn, nt	mittlere Anzahl Fahrzeuge pro Stunde nachts bzw. tags																		
PW	Personenwagen																		
SDA	semidichter Asphalt (SDA 4 ...maximale Korngrösse 4 mm, SDA 8 ... maximale Korngrösse 8 mm)																		

SPB	statistische Vorbeifahrtsmessung
STLN1TK, STLN2TK	aufbereitete Messergebnisse (temperaturkorrigierte akustischen Belagswirkung im Vergleich zum EMPA-Modell StL-86+) für den PW- bzw. den LKW-Referenzpneu
T30, T50	signalisierte Höchstgeschwindigkeit 30 km/h bzw. 50 km/h
v50	Median der gemessenen Geschwindigkeit

II Literaturverzeichnis

- [1] *Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG) 814.01* vom 7. Oktober 1983 (Stand am 1. Januar 2021)
- [2] *Lärmschutzverordnung (LSV) 814.41* vom 15. Dezember 1986 (Stand am 7. Mai 2019)
- [3] *Nationaler Massnahmenplan zur Verringerung der Lärmbelastung*, Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 15.3840 Barazzone vom 14. September 2015 (2017)
- [4] *Sanierung Strassenlärm*, Bundesamt für Umwelt BAFU, UZ-1922-D (2019)
- [5] *Leise Strassenbeläge als effektive Lärmschutzmassnahme*, E. Bühlmann, Strassenverkehr (2018)
- [6] *Towards semi-dense asphalt mixtures that guarantee acoustic performance and durability*, E. Bühlmann und E. Hammer, Inter-Noise Congress Conference Proceedings (2017)
- [7] *Assessing the noise reduction potential of speed limit 30 km/h*, E. Bühlmann und S. Egger, Inter-Noise Congress Conference Proceedings (2017)
- [8] *30 km/h nocturne pour les avenues de Beaulieu et Vinet*, Direction Générale de la mobilité et des Routes, Canton de Vaud (2018)
- [9] *Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30*, Forschungsprojekt VSS 2012/214 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), (2017)
- [10] *sonROAD18 Berechnungsmodell für Strassenlärm*, Empa, Nr. 5214.010948 (2018)
- [11] *Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method*, ISO Norm, ISO 11819-2:2017 (2017)
- [12] *Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 3: Reference tyres*, ISO Norm, ISO/TS 11819-3:2017 (2017)
- [13] *Acoustics - Temperature influence on tyre/road noise measurement - Part 1: Correction for temperature when testing with the CPX method*, ISO Norm, ISO/TS 13471-1:2017 (2017)
- [14] *Acoustics - Temperature influence on tyre/road noise measurement - Part 2: Correction for temperature when testing with the pass-by methods*, ISO Norm, ISO/DTS 13471-2:2020 (2020)
- [15] *Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical pass-by method*, ISO Norm, ISO 11819-1:2001 (2001)
- [16] *Statistische Vorbeifahrtsmessungen SPB Kanton AG 2020, Messungen auf SDA Belägen bei 30 km/h und 50 km/h*, Grolimund und Partner AG im Auftrag des Departements für Bau, Verkehr und Umwelt, Kanton Aargau (2021)
- [17] *Lärmwirkung von Tempo 30 bei LKW*, Grolimund und Partner AG im Auftrag des Bundesamts für Umwelt BAFU (2019)
- [18] *Leitfaden Strassenlärm – Vollzugshilfe für die Sanierung* vom Dezember 2006, *Anhang 1b* (Version 31.07.2013), Bundesamt für Strassen ASTRA und Bundesamt für Umwelt BAFU (2013)

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messaufbau am Standort Safenwil mit 2 Verkehrszählgeräten und der Lärmimmissionsmessung am Fenster im ersten Obergeschoss.	10
Abbildung 2: Schematische Übersicht und Foto des CPX-Messsystems.	11
Abbildung 3: Temporäre Umsignalisation in Aarau	13
Abbildung 4: Dauerhafte Umsignalisation in Luzern	13
Abbildung 5: Vereinfachtes Schema zur Datenaufbereitung und Normalisierung.	16
Abbildung 6: Geschwindigkeitsverteilungen des v50 der Messwerte (Anzahl normalisiert) für Tag und Nacht bei allen Standorten.	19
Abbildung 7: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v50 und dem N2-Anteil für den Standort Brugg.	20
Abbildung 8: Tempo- und Lärmwirkung durch die Umsignalisation für alle Standorte für Tag und Nacht.	23
Abbildung 9: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v50 Wert und N2-Kategorie für den Standort Safenwil.	25
Abbildung 10: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v50 Wert und alle Standorte für die N2-Kategorie 5 - 7.5 %.	25
Abbildung 11: Lärmwirkung ΔL einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h in Abhängigkeit der akustischen Belagsgüte MV8 und der N2-Kategorie.	26
Abbildung 12: Lärmwirkung ΔL einer Temporeduktion von 50 km/h auf 30 km/h in Abhängigkeit der N2-Kategorie.	28
Abbildung 13: Schema zur Lärmwirkung einer Temporeduktion auf zwei Belägen (Belag 1: rote Kurve, Belag 2: blaue Kurve).	30
Abbildung 14: Vergleich verschiedener Modellprognosen zur Lärmwirkung einer Temporeduktion bei N2-Anteil 8 % und Ausgangsgeschwindigkeit 50 km/h in Abhängigkeit der Zielgeschwindigkeit.	33
Abbildung 15: Vergleich verschiedener Modellprognosen zur Lärmwirkung einer Temporeduktion bei Ausgangsgeschwindigkeit 50 km/h und Zielgeschwindigkeit 30 km/h in Abhängigkeit des N2-Anteils.	34
Abbildung 16: Schema zur Lärmwirkung einer Temporeduktion (grüner Pfeil).	36
Abbildung 17: Schema Belagsersatz und Temporeduktion mit evtl. von 50 km/h abweichender Ist-Geschwindigkeit ($v_2 = 50$ km/h).	38
Abbildung 18: Schema Belagsersatz bei bestehender Tempo 30 Situation.	39
Abbildung 19: Leitfaden zur Auswahl der Methode zur Wirkungsabschätzung der Lärmschutzmassnahmen Tempo 30, LAB oder einer Kombination beider in Abhängigkeit der Ausgangssituation.	42
Abbildung 20: Situationsplan Aarau, Entfelderstrasse.	51
Abbildung 21: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v50 und dem N2-Anteil für den Standort Aarau.	52
Abbildung 22: Situationsplan Brugg, Zurzacherstrasse.	53
Abbildung 23: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v50 und dem N2-Anteil für den Standort Brugg.	54
Abbildung 24: Situationsplan Küttigen, Bibersteinerstrasse.	55

Abbildung 25: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Küttigen.	56
Abbildung 26: Situationsplan Luzern, Ruopigenstrasse.	57
Abbildung 27: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Luzern.....	58
Abbildung 28: Situationsplan Safenwil, Köllikerstrasse.	59
Abbildung 29: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Safenwil.	60
Abbildung 30: Situationsplan Sulz, Hauptstrasse.	61
Abbildung 31: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Sulz.	62
Abbildung 32: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v_{50} Wert und N2-Kategorie für jeden Standort.....	64
Abbildung 33: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v_{50} Wert und Standort für jede N2-Kategorie.	66

IV Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der gewählten Standorte für die Messkampagne mit Informationen zu Belag, akustischer Belagsgüte (MV8), Verkehrslast (DTV), der Funktion im Messkonzept und Standortcharakter.....	9
Tabelle 2:	Medianwerte der gemessenen Geschwindigkeiten (v50) je 30 Minuten für Tag und Nacht bei allen Standorten für die beiden Signalisationen T50 und T30.	22
Tabelle 3:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 8 %.....	37
Tabelle 4:	Fitparameter a0 und a1 für das Modell $L_{norm} = a_0 + a_1 * \lg(v_{50})$ mit den jeweiligen Unsicherheitsbereichen (95% Vertrauensintervall) δa_0 und δa_1 für alle Standorte und die jeweiligen N2-Kategorien für welche ausreichend Messdaten zur Modellierung verfügbar sind.	67
Tabelle 5:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 0 %.....	68
Tabelle 6:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 3 %.....	69
Tabelle 7:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 6 %.....	70
Tabelle 8:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 9 %.....	71
Tabelle 9:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 12 %.....	72
Tabelle 10:	Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 15 %.....	73

V Standortdetails Aarau, Entfelderstrasse

<p>Adresse LZM</p> <p>Entfelderstrasse 41 5001 Aarau</p>	
<p>Koordinaten LZM</p> <p>2646184, 1248624</p>	
<p>Messperiode</p> <p>07.07. – 23.07.2020</p>	
<p>Signalisation T30</p> <p>20.07. – 23.07.2020</p>	

Abbildung 20: Situationsplan Aarau, Entfelderstrasse. Die Markierung zeigt den Ort der Langzeitmessung. Geodaten: swisstopo.

<p>Strassenbelag</p>	<p>Belagstyp: SDA 4-12 Baujahr 2017 Zustand: sehr gut Steigung: 1.8 %</p> <p>Effektive akustische Belagsgütwerte im Untersuchungsperimeter (CPX Messung vom 09.07.2020): Messung mit Referenzpneu PW: STLN1TK = -3.2 dB Messung mit Referenzpneu LW: STLN2TK = -6.3 dB Mischverkehrswert mit 8% N2-Anteil: MV8 = -4.6 dB</p>
<p>Verkehr</p>	<p>Fahrzeuge pro Tag: DTV = 15'400</p> <p>Fahrzeuge pro Stunde Tags: nt = 882 Fahrzeuge pro Stunde Nachts: nn = 157</p> <p>N2-Anteil Tags: n2t = 5.7 % N2-Anteil Nachts: n2n = 4.8 %</p>

Aufbereitete
Datengrundlage

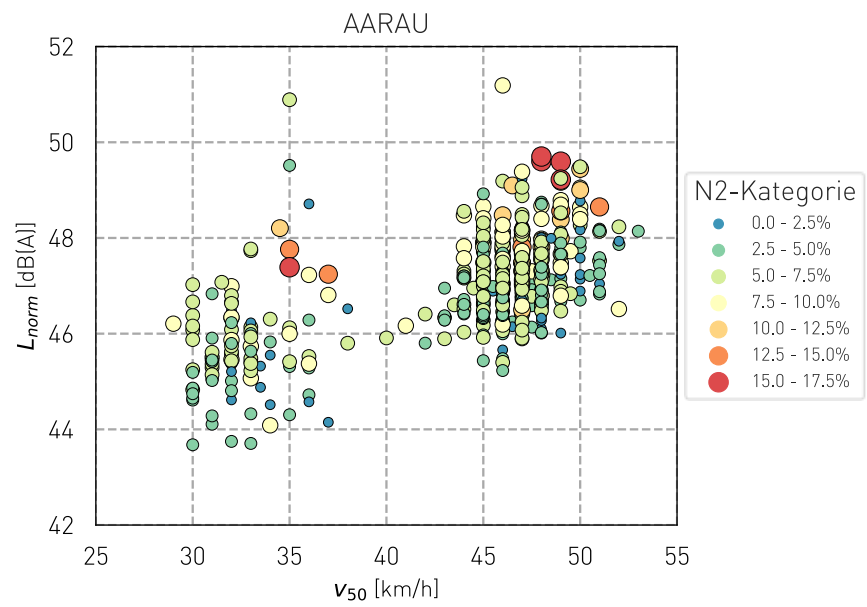


Abbildung 21: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Aarau.

VI Standortdetails Brugg, Zurzacherstrasse


<p>Adresse LZM</p> <p>Rebmoosweg 4 5200 Brugg</p>	
<p>Koordinaten LZM</p> <p>2658416, 1260030</p>	
<p>Messperiode</p> <p>23.07. – 04.08.2020</p>	
<p>Signalisation T30</p> <p>27.07. – 31.07.2020</p>	
<p>Strassenbelag</p>	<p>Belagstyp: SDA 4-12 Baujahr 2019 Zustand: sehr gut Steigung: 0.4 %</p> <p>Effektive akustische Belagsgütwerte im Untersuchungsperimeter (CPX Messung vom 08.05.2020): Messung mit Referenzpneu PW: STLN1TK = -4.4 dB Messung mit Referenzpneu LW: STLN2TK = -5.6 dB Mischverkehrswert mit 8% N2-Anteil: MV8 = -5.0 dB</p>
<p>Verkehr</p>	<p>Fahrzeuge pro Tag: DTV = 16'300</p> <p>Fahrzeuge pro Stunde Tags: nt = 961 Fahrzeuge pro Stunde Nachts: nn = 185</p> <p>N2-Anteil Tags: n2t = 10.0 % N2-Anteil Nachts: n2n = 7.1 %</p>

Abbildung 22: Situationsplan Brugg, Zurzacherstrasse. Die Markierung zeigt den Ort der Langzeitmessung. Geodaten: swisstopo.

Aufbereitete
Datengrundlage

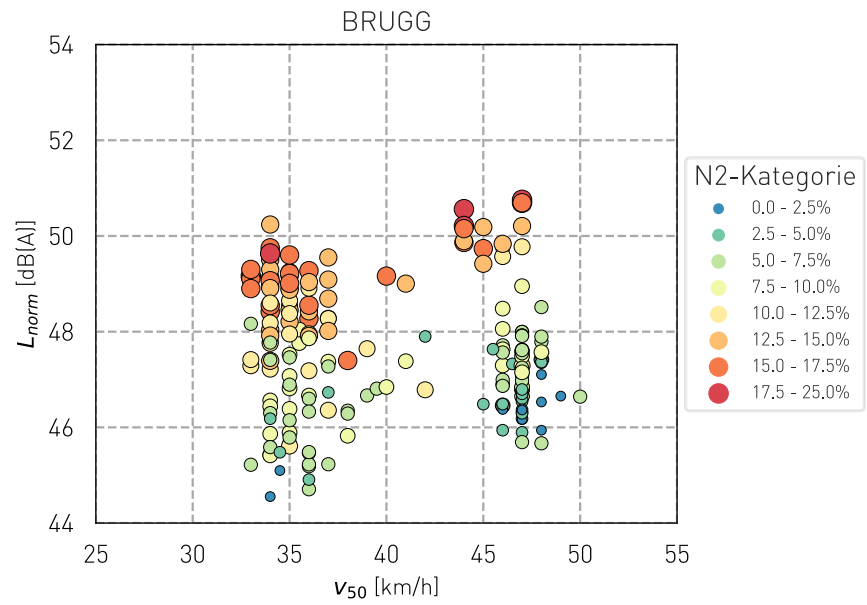


Abbildung 23: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Brugg.

VII Standortdetails Küttigen, Bibersteinerstrasse

<p>Adresse LZM</p> <p>Bibersteinerstr. 67 5022 Rombach</p>	
<p>Koordinaten LZM</p> <p>2646378, 1250661</p>	
<p>Messperiode</p> <p>16.07. – 29.07.2020</p>	
<p>Signalisation T30</p> <p>21.07. – 23.07.2020</p>	

Abbildung 24: Situationsplan Küttigen, Bibersteinerstrasse. Die Markierung zeigt den Ort der Langzeitmessung. Geodaten: swisstopo.

<p>Strassenbelag</p>	<p>Belagstyp: SDA 4-12 Baujahr 2016 Zustand: sehr gut Steigung: 1.3 %</p> <p>Effektive akustische Belagsgütwerte im Untersuchungsperimeter (CPX Messung vom 09.07.2020): Messung mit Referenzpneu PW: STLN1TK = -5.1 dB Messung mit Referenzpneu LW: STLN2TK = -8.7 dB Mischverkehrswert mit 8% N2-Anteil: MV8 = -6.7 dB</p>
<p>Verkehr</p>	<p>Fahrzeuge pro Tag: DTV = 5'600</p> <p>Fahrzeuge pro Stunde Tags: nt = 162 Fahrzeuge pro Stunde Nachts: nn = 46</p> <p>N2-Anteil Tags: n2t = 9.3 % N2-Anteil Nachts: n2n = 6.5 %</p>

Aufbereitete
Datengrundlage

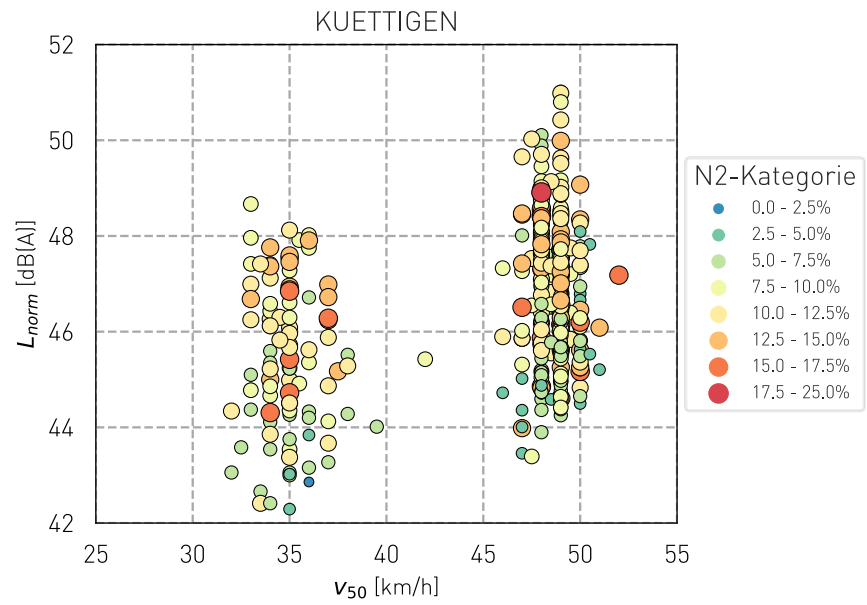



Abbildung 25: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Kuttigen.

VIII Standortdetails Luzern, Ruopigenstrasse

<p>Adresse LZM</p> <p>Ruopigenstrasse 10 6015 Luzern</p> <hr/> <p>Koordinaten LZM</p> <p><u>2664005, 1213007</u></p> <hr/> <p>Messperiode</p> <p>28.09. – 09.11.2020</p> <hr/> <p>Signalisation T30</p> <p>Dauerhaft ab 09.10.2020</p>	 <p>Abbildung 26: Situationsplan Luzern, Ruopigenstrasse. Die Markierung zeigt den Ort der Langzeitmessung. Geodaten: swisstopo.</p>
<p>Strassenbelag</p>	<p>Belagstyp: unbekannt, akustisch dichte Bauweise Baujahr: unbekannt, jedoch vor 2010 Zustand: mangelhaft Steigung: 2.0 %</p> <p>Effektive akustische Belagsgütwerte im Untersuchungsperimeter (CPX Messung vom 30.09.2020): Messung mit Referenzpneu PW: STLN1TK = 3.4 dB Messung mit Referenzpneu LW: STLN2TK = -1.0 dB Mischverkehrswert mit 8% N2-Anteil: MV8 = 1.5 dB</p>
<p>Verkehr</p>	<p>Fahrzeuge pro Tag: DTV = 9'100</p> <p>Fahrzeuge pro Stunde Tags: nt = 522 Fahrzeuge pro Stunde Nachts: nn = 93</p> <p>N2-Anteil Tags: n2t = 7.7 % N2-Anteil Nachts: n2n = 7.1 %</p>

Aufbereitete
Datengrundlage

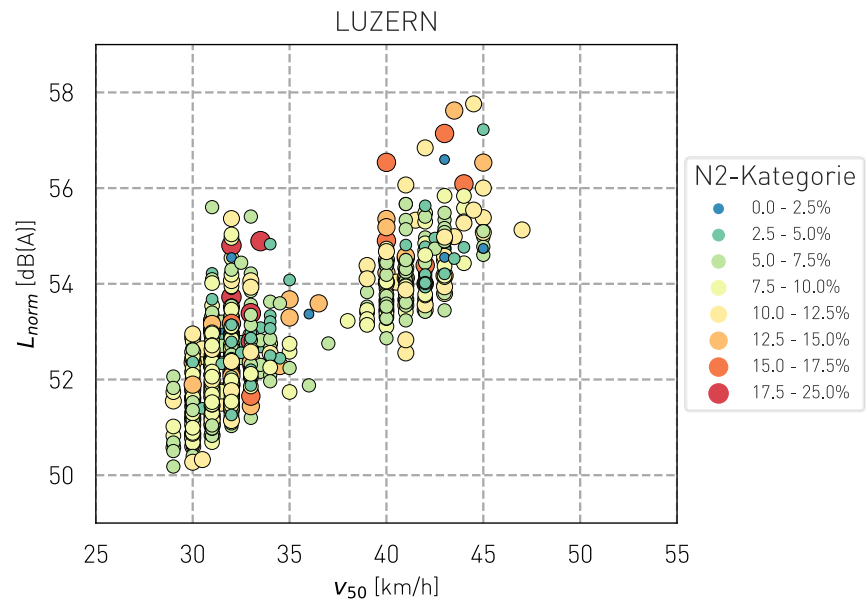


Abbildung 27: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Luzern.

IX Standortdetails Safenwil, Köllikerstrasse

<p>Adresse LZM Köllikerstrasse 31 5745 Safenwil</p>	
<p>Koordinaten LZM 2641815, 1241331</p>	
<p>Messperiode 07.07. – 22.07.2020</p>	
<p>Signalisation T30 17.07. – 21.07.2020</p>	

Abbildung 28: Situationsplan Safenwil, Köllikerstrasse. Die Markierung zeigt den Ort der Langzeitmessung. Geodaten: swisstopo.

<p>Strassenbelag</p>	<p>Belagstyp: SDA 4-16 Baujahr: 2013 Zustand: gut Steigung: 1.5 %</p> <p>Effektive akustische Belagsgütwerte im Untersuchungsperimeter (CPX Messung vom 01.07.2020): Messung mit Referenzpneu PW: STLN1TK = -3.6 dB Messung mit Referenzpneu LW: STLN2TK = -7.4 dB Mischverkehrswert mit 8% N2-Anteil: MV8 = -5.3 dB</p>
<p>Verkehr</p>	<p>Fahrzeuge pro Tag: DTV = 7'900 Fahrzeuge pro Stunde Tags: nt = 461 Fahrzeuge pro Stunde Nachts: nn = 69 N2-Anteil Tags: n2t = 7.9 % N2-Anteil Nachts: n2n = 5.9 %</p>

Aufbereitete
Datengrundlage

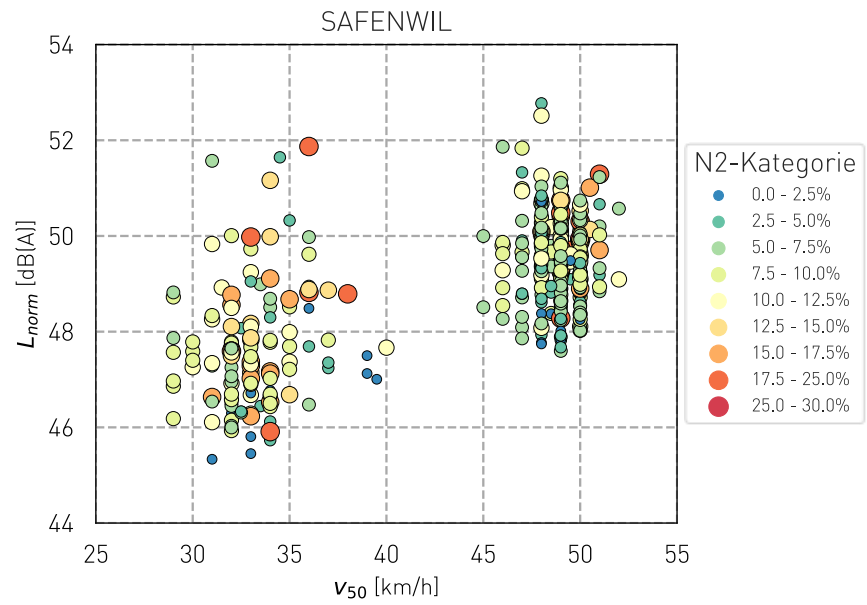


Abbildung 29: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Safenwil.

X Standortdetails Sulz, Hauptstrasse

<p>Adresse LZM</p> <p>Hauptstrasse 34 5085 Sulz</p> <hr/> <p>Koordinaten LZM</p> <p>2649565, 1266047</p> <hr/> <p>Messperiode</p> <p>22.07. – 06.08.2020</p> <hr/> <p>Signalisation T30</p> <p>28.07. – 31.07.2020</p>	
--	---

Abbildung 30: Situationsplan Sulz, Hauptstrasse. Die Markierung zeigt den Ort der Langzeitmessung. Geodaten: swisstopo.

<p>Strassenbelag</p>	<p>Belagstyp: SDA 8-12 Baujahr: 2019 Zustand: gut Steigung: 1.2 %</p> <p>Effektive akustische Belagsgütwerte im Untersuchungsperimeter (CPX Messung vom 25.06.2020): Messung mit Referenzpneu PW: STLN1TK = -2.7 dB Messung mit Referenzpneu LW: STLN2TK = -5.9 dB Mischverkehrswert mit 8% N2-Anteil: MV8 = -4.2 dB</p>
<p>Verkehr</p>	<p>Fahrzeuge pro Tag: DTV = 2'100 Fahrzeuge pro Stunde Tags: nt = 122 Fahrzeuge pro Stunde Nachts: nn = 16</p> <p>N2-Anteil Tags: n2t = 10.6 % N2-Anteil Nachts: n2n = 6.9 %</p>

Aufbereitete
Datengrundlage

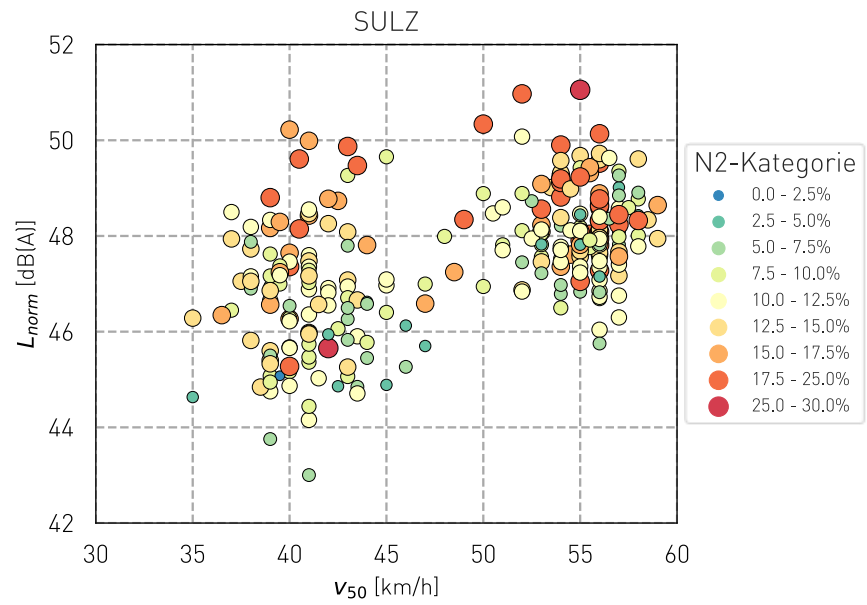
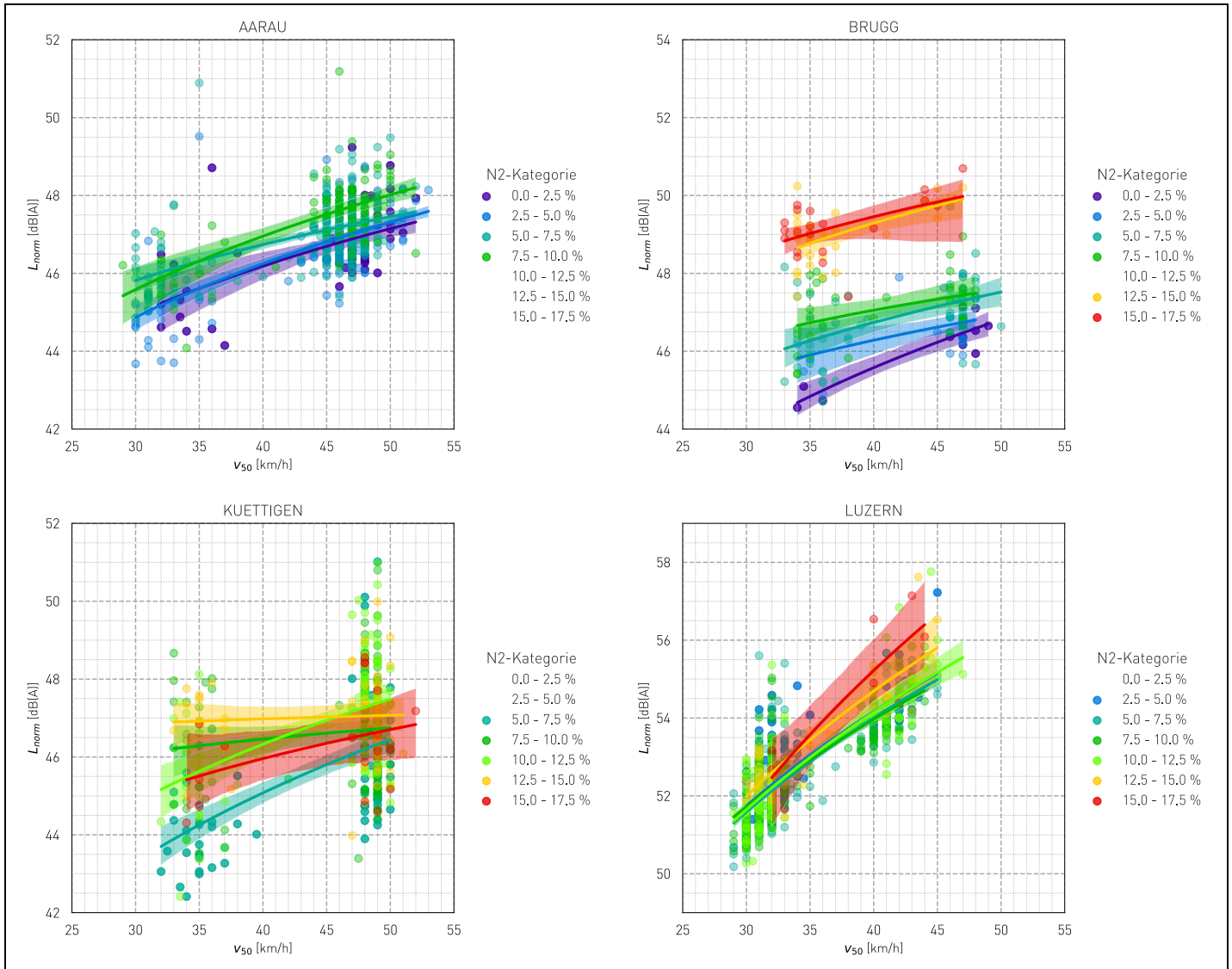


Abbildung 31: Normierte Emissionspegel L_{norm} je 30 Minuten in Abhängigkeit der Geschwindigkeit v_{50} und dem N2-Anteil für den Standort Sulz.

XI Lärmwirkung durch Temporeduktion je Standort



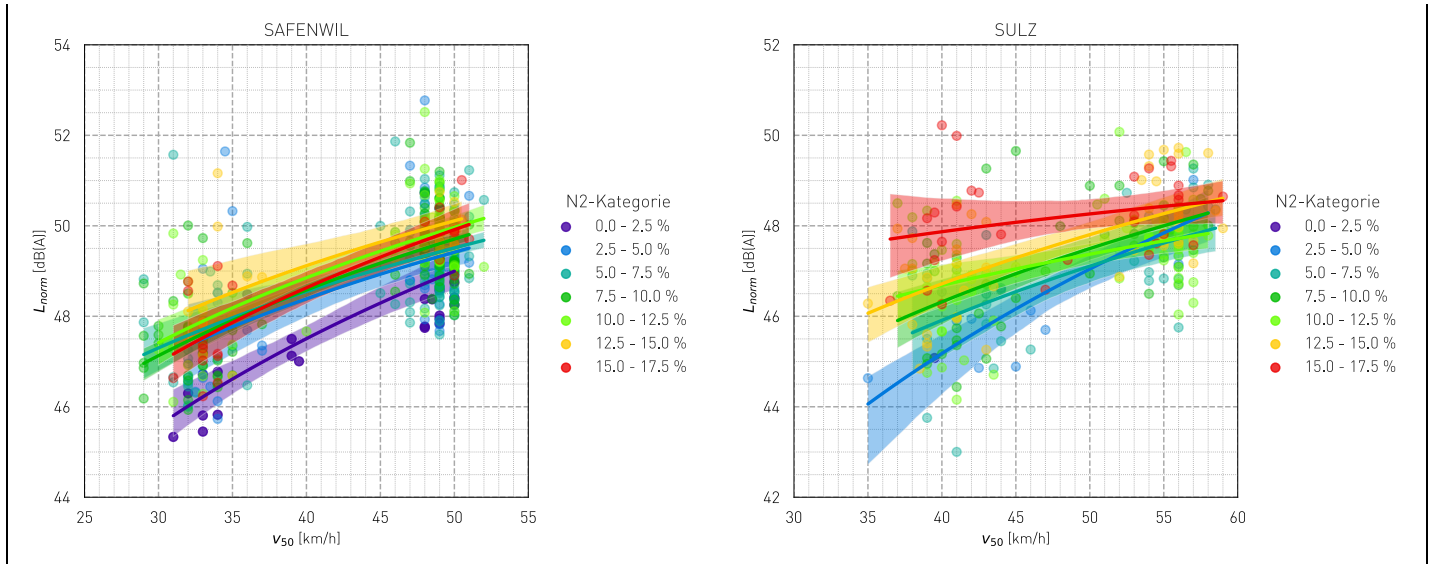
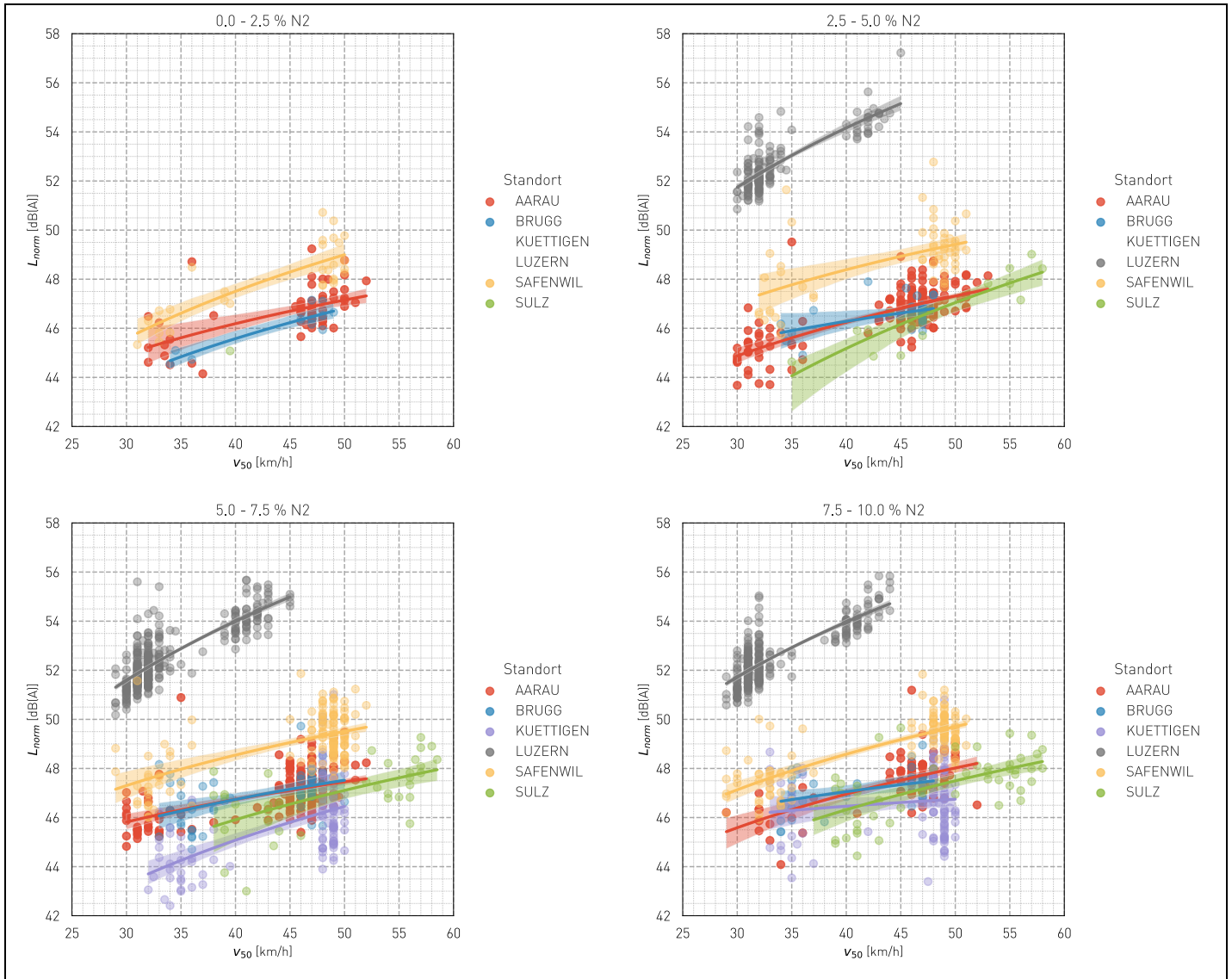


Abbildung 32: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v₅₀ Wert und N2-Kategorie für jeden Standort. Die Daten jeder N2-Kategorie mit genügend Messdaten wurden mittels linearer Regression nach lg(v₅₀) gefittet, der schattierte Bereich gibt die entsprechende Unsicherheit der Regression an (95 % Vertrauensintervall).

XII Lärmwirkung durch Temporeduktion nach N2-Kategorie



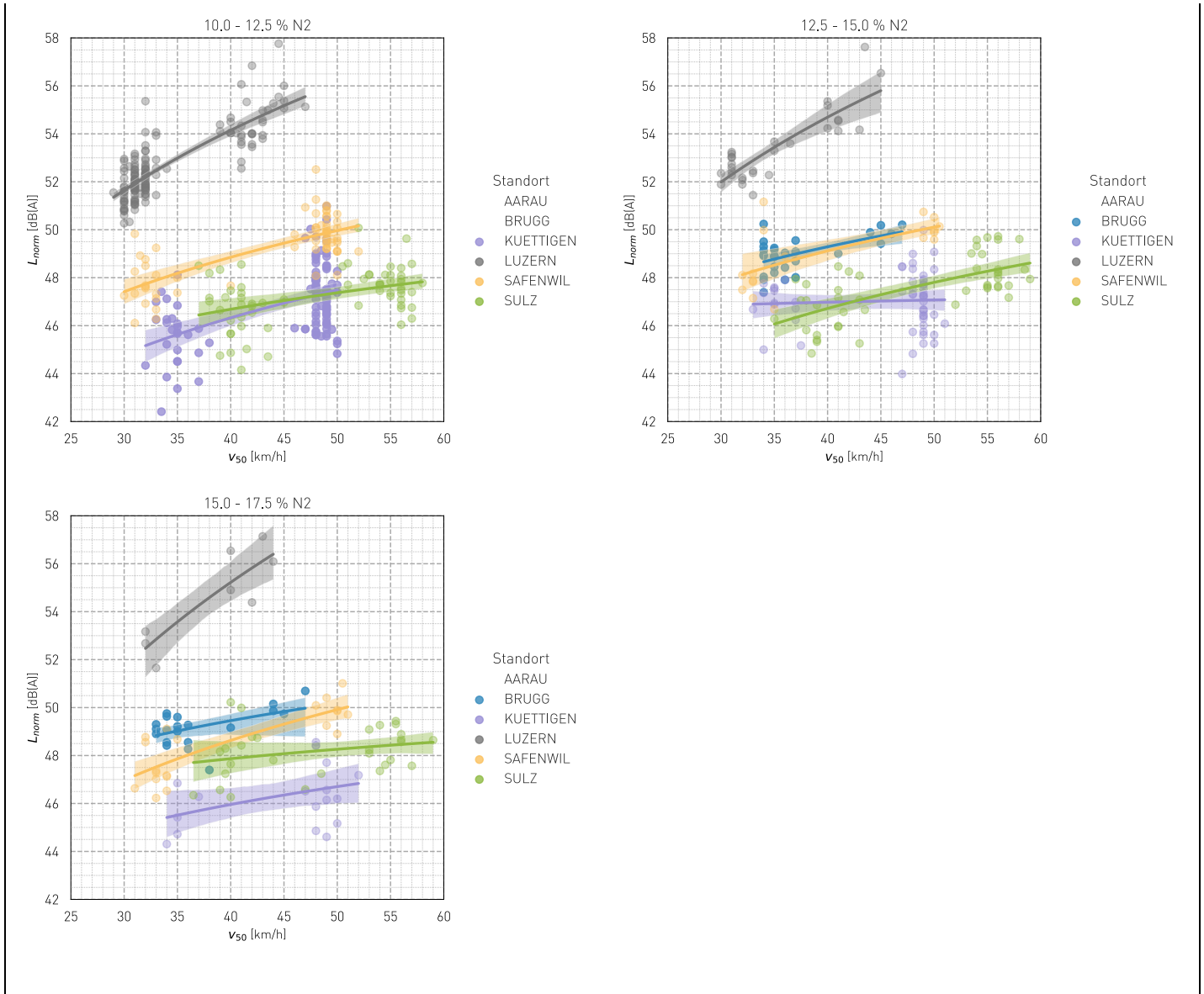


Abbildung 33: Aufbereitete Messdaten L_{norm} je v_{50} Wert und Standort für jede N2-Kategorie. Die Daten jedes Standorts mit genügend Messdaten wurden mittels linearer Regression nach $\lg(v_{50})$ gefittet, der schattierte Bereich gibt die entsprechende Unsicherheit der Regression an (95 % Vertrauensintervall).

XIII Modellierungsergebnisse lineare Regression nach $\lg(v50)$

Tabelle 4: Fitparameter a_0 und a_1 für das Modell $L_{norm} = a_0 + a_1 \cdot \lg(v50)$ mit den jeweiligen Unsicherheitsbereichen (95% Vertrauensintervall) δa_0 und δa_1 für alle Standorte und die jeweiligen N2-Kategorien für welche ausreichend Messdaten zur Modellierung verfügbar sind. Die entsprechende, rechnerische Lärmwirkung bei einer Geschwindigkeitsänderung von 50 km/h zu 30 km/h ist durch ΔL mit Unsicherheit $\delta \Delta L$ angegeben.

Standort	N2-Anteil (%)	a_0 (dB)	δa_0 (dB)	a_1 (dB/ $\lg(\text{km/h})$)	δa_1 (dB/ $\lg(\text{km/h})$)	ΔL (dB)	$\delta \Delta L$ (dB)
Aarau	0 – 2.5	30.3	± 5.9	9.9	± 3.6	- 2.2	± 0.8
Aarau	2.5 - 5	28.6	± 2.4	11.0	± 1.5	- 2.4	± 0.3
Aarau	5 – 7.5	34.9	± 2.5	7.4	± 1.5	- 1.6	± 0.3
Aarau	7.5 - 10	29.4	± 5.0	11.0	± 3.0	- 2.4	± 0.7
Brugg	0 – 2.5	25.2	± 7.4	12.7	± 4.5	- 2.8	± 1.0
Brugg	2.5 - 5	35.8	± 8.0	6.6	± 4.9	- 1.5	± 1.1
Brugg	5 – 7.5	33.8	± 6.5	8.1	± 4.0	- 1.8	± 0.9
Brugg	7.5 - 10	38.1	± 7.1	5.6	± 4.4	- 1.2	± 1.0
Brugg	12.5 - 15	35.1	± 8.5	8.9	± 5.4	- 2.0	± 1.2
Brugg	15 – 17.5	37.6	± 9.9	7.4	± 6.3	- 1.6	± 1.4
Küttigen	5 – 7.5	22.4	± 6.4	14.2	± 3.9	- 3.1	± 0.9
Küttigen	7.5 - 10	41.7	± 7.2	3.0	± 4.4	- 0.7	± 1.0
Küttigen	10 – 12.5	27.1	± 6.6	12.0	± 4.0	- 2.7	± 0.9
Luzern	2.5 - 5	23.2	± 3.4	19.3	± 2.2	- 4.3	± 0.5
Luzern	5 – 7.5	23.1	± 2.2	19.3	± 1.4	- 4.3	± 0.3
Luzern	7.5 - 10	25.2	± 2.3	18.0	± 1.5	- 4.0	± 0.3
Luzern	10 – 12.5	22.1	± 3.5	20.0	± 2.3	- 4.4	± 0.5
Luzern	12.5 - 15	20.0	± 8.1	21.7	± 5.3	- 4.8	± 1.2
Safenwil	0 – 2.5	22.8	± 7.1	15.4	± 4.3	- 3.4	± 1.0
Safenwil	2.5 - 5	31.4	± 7.1	10.6	± 4.3	- 2.4	± 1.0
Safenwil	5 – 7.5	32.6	± 3.5	10.0	± 2.1	- 2.2	± 0.5
Safenwil	7.5 - 10	30.0	± 2.6	11.6	± 1.6	- 2.6	± 0.3
Safenwil	10 – 12.5	30.4	± 4.3	11.5	± 2.6	- 2.6	± 0.6
Safenwil	12.5 - 15	32.7	± 9.8	10.2	± 6.1	- 2.3	± 1.4
Safenwil	15 – 17.5	27.4	± 7.4	13.3	± 4.7	- 2.9	± 1.0
Sulz	5 – 7.5	26.1	± 10.0	12.3	± 5.9	- 2.7	± 1.3
Sulz	7.5 - 10	26.8	± 7.8	12.2	± 4.7	- 2.7	± 1.0
Sulz	10 – 12.5	35.3	± 6.5	7.1	± 3.8	- 1.6	± 0.9
Sulz	12.5 - 15	28.7	± 6.5	11.2	± 3.9	- 2.5	± 0.9
Sulz	15 – 17.5	41.4	± 9.6	4.1	± 5.7	- 0.9	± 1.3

XIV Matrix zur Wirkungsabschätzung

Tabelle 5: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 0 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
0 %		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-2.3	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.1	0.0
	41	-2.5	-2.3	-2.1	-1.9	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1
	42	-2.6	-2.4	-2.2	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2
	43	-2.7	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4
	44	-2.8	-2.6	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5
	45	-2.9	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6
	46	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7
	47	-3.1	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8
	48	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9
	49	-3.3	-3.1	-3.0	-2.8	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0
	50	-3.4	-3.2	-3.1	-2.9	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1
	51	-3.5	-3.3	-3.2	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2
	52	-3.6	-3.4	-3.2	-3.1	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3
	53	-3.7	-3.5	-3.3	-3.2	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4
	54	-3.8	-3.6	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5
	55	-3.9	-3.7	-3.5	-3.3	-3.2	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	42	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	43	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	45	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	46	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	47	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	48	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	49	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	50	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	51	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	52	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	53	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	54	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	55	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2

Tabelle 6: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 3 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
3	%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.0
	41	-2.3	-2.2	-2.0	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1
	42	-2.5	-2.3	-2.1	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2
	43	-2.6	-2.4	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3
	44	-2.7	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
	45	-2.8	-2.6	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6
	46	-2.9	-2.7	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7
	47	-3.0	-2.8	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8
	48	-3.1	-2.9	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9
	49	-3.2	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
	50	-3.3	-3.1	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
	51	-3.4	-3.2	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1
	52	-3.5	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2
	53	-3.5	-3.4	-3.2	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3
	54	-3.6	-3.5	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4
55	-3.7	-3.5	-3.4	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	42	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	43	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	45	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	46	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	47	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	48	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	49	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	50	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	51	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	52	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	53	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	54	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
55	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	

Tabelle 7: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 6 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
6 %		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0.0
	41	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1
	42	-2.3	-2.2	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2
	43	-2.4	-2.3	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3
	44	-2.5	-2.4	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4
	45	-2.6	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5
	46	-2.7	-2.6	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6
	47	-2.8	-2.7	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7
	48	-2.9	-2.8	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8
	49	-3.0	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9
	50	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0
	51	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
	52	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2
	53	-3.4	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3
	54	-3.5	-3.3	-3.1	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3
	55	-3.5	-3.4	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	42	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	43	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	45	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	46	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	47	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	48	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	49	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	50	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	51	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	52	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	53	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2
	54	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	55	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3

Tabelle 8: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 9 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
9 %		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0
	41	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
	42	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
	43	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3
	44	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4
	45	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
	46	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6
	47	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7
	48	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8
	49	-2.9	-2.7	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9
	50	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
	51	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0
	52	-3.1	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1
	53	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2
	54	-3.3	-3.1	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3
55	-3.4	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	42	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	43	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	45	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	46	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	47	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	48	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	49	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	50	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	51	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2
	52	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	53	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	54	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3
55	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	

Tabelle 9: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 12 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
12 %		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0
	41	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
	42	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
	43	-2.2	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3
	44	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4
	45	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
	46	-2.5	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6
	47	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7
	48	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7
	49	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8
	50	-2.8	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9
	51	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
	52	-3.0	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
	53	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
	54	-3.1	-2.9	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2
	55	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	42	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	43	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	45	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	46	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	47	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	48	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	49	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2
	50	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	51	± 0.8	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	52	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3
	53	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3
	54	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.4
	55	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4

Tabelle 10: Prognose der Lärmwirkung (dB) einer Temporeduktion auf SDA 4 Belägen in Abhängigkeit von Ist- und Zielgeschwindigkeit für N2-Anteil 15 %. Im unteren Teil der Tabelle ist der entsprechende Unsicherheitsbereich ($\pm 1\sigma$, dB) angegeben.

Prognose Lärmwirkung durch Temporeduktion auf SDA 4 (dB)																	
N2-Anteil		Zielgeschwindigkeit (km/h)															
15 %		25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0.0
	41	-1.9	-1.7	-1.6	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1
	42	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2
	43	-2.1	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3
	44	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4
	45	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4
	46	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
	47	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6
	48	-2.5	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7
	49	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8
	50	-2.6	-2.5	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8
	51	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.1	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0	-0.9
	52	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1	-1.0
	53	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.0	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
	54	-2.9	-2.8	-2.6	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-2.0	-1.9	-1.8	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	-1.1
55	-3.0	-2.8	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.2	-2.1	-1.9	-1.8	-1.7	-1.6	-1.5	-1.4	-1.3	-1.2	
Unsicherheitsbereich der Prognose (dB)																	
Ist-Geschwindigkeit (km/h)	40	± 0.7	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0	± 0.0
	41	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1	± 0.0
	42	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1	± 0.1
	43	± 0.8	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1	± 0.1
	44	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.1
	45	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2	± 0.2
	46	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2	± 0.2
	47	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3	± 0.2
	48	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3	± 0.3
	49	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3
	50	± 1.0	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.3	± 0.3
	51	± 1.0	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4	± 0.3
	52	± 1.0	± 1.0	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4	± 0.4
	53	± 1.0	± 1.0	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4	± 0.4
	54	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	± 0.5	± 0.4
55	± 1.1	± 1.0	± 1.0	± 0.9	± 0.9	± 0.8	± 0.8	± 0.8	± 0.8	± 0.7	± 0.7	± 0.6	± 0.6	± 0.6	± 0.5	± 0.5	