



Rollwiderstand auf lärmarmen Belägen in der Schweiz Einflussgrössen und CO₂-Emissionsbetrachtung

31. März 2021

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: Felix Schlatter, Johannes Schindler, Erik Bühlmann

Begleitung BAFU: Sophie Hoehn, Sarah Stéhly, Urs Walker

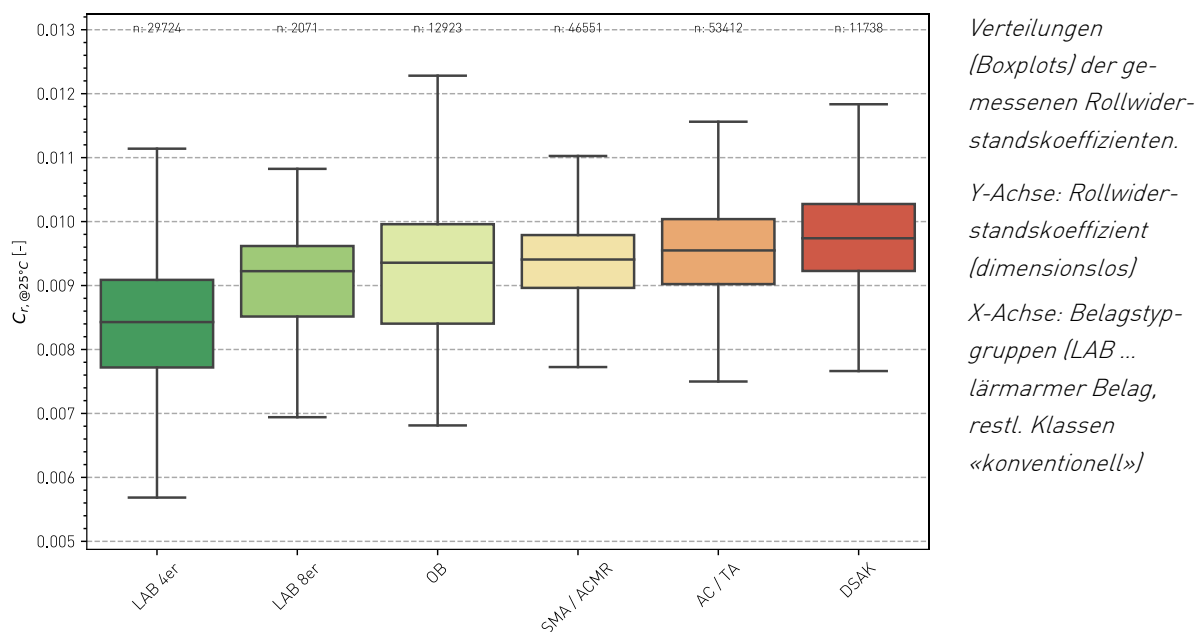
Hinweis: Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

31. März 2021

Zusammenfassung

Mit über 27 % Anteil am Bruttoenergieverbrauch ist der Strassenverkehr der grösste Verbraucher in der Schweiz. Eine Reduktion des Energieverbrauchs im Strassenverkehr kann folglich erheblich zum Klima- und Umweltschutz beitragen.

Der Energieverbrauch im Strassenverkehr wird direkt und wesentlich durch den Rollwiderstand beeinflusst. Durch Strassenverkehr verursachter, übermässiger Lärm beeinträchtigt die Lebensqualität und Gesundheit - mit dem Ziel die Bevölkerung vor schädlichem Strassenlärm zu schützen werden seit 2010 im Strassennetz der Schweiz vermehrt lärmarme Deckschichten (z.B. SDA 4, div. Firmenlösungen) eingebaut. Diese lärmarmen Beläge vermögen als Massnahme an der Quelle die Lärmbelastung deutlich zu reduzieren. Wie schneiden diese Beläge aber bezüglich dem Rollwiderstand ab? Bis zum Zeitpunkt dieser Studie, gab es bezüglich Rollwiderstand keine Grundlagen für die in der Schweiz eingebauten lärmarmen Beläge. Mit einer Messkampagne im Jahr 2018 auf über 140 km des Schweizer Strassennetzes mit insgesamt 16 verschiedenen Belägen im Innerortsbereich wurden Grundlagendaten zum Rollwiderstand erhoben.



Wie in obiger Abbildung ersichtlich, zeigen die Messdaten, dass die in der Schweiz eingebauten lärmarmen Deckschichten (Belagsklassen «LAB») allgemein einen geringeren Rollwiderstand aufweisen als konventionelle Beläge (übrige Belagsklassen). Die lärmarmen Beläge vermögen daher neben dem Schutz vor Strassenlärm zusätzlich den Energieverbrauch des Verkehrs auf der Strasse zu reduzieren. Weiter wurde ein direkter Zusammenhang zwischen den gemessenen Reifen-Fahrbahn Geräuschen und dem Rollwiderstand gefunden: je lauter eine Deckschicht ist, desto höher ist auch deren Rollwiderstand. Ein Zusammenhang zwischen der mittleren Profiltiefe der Beläge und deren Rollwiderstand, welcher in anderen Studien gefunden wurde, konnte in diesem Projekt nur bedingt bestätigt werden.

Dies kann mit der begrenzten verfügbaren Spanne der gemessenen mittleren Profiltiefen erklärt werden, da dies nicht der primäre Untersuchungsfokus ist.

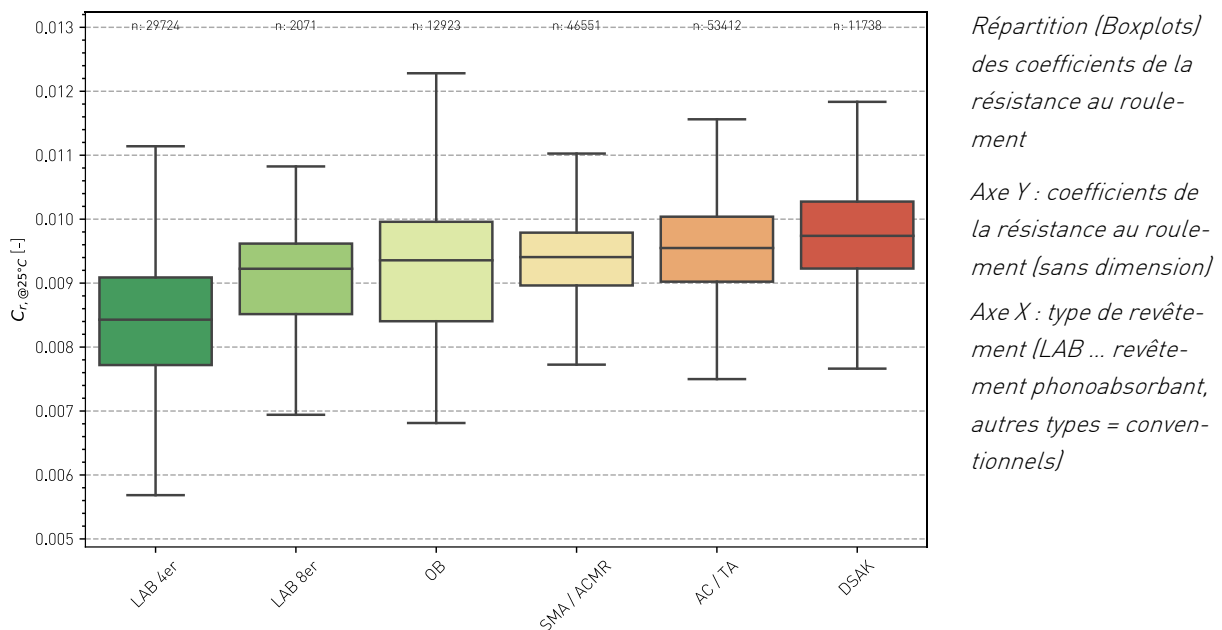
Um eine potenzielle Energieeinsparung durch lärmarme Beläge ganzheitlich zu beurteilen, muss auch der Energieverbrauch für die Herstellung und den Einbau der Beläge einbezogen werden. Lärmarme Deckschichten haben im Vergleich zu einem konventionellen Belag nur eine etwa halb so lange Lebensdauer (akustisch). Sie müssen deshalb häufiger erneuert werden als konventionelle Beläge. Für eine gesamthafte Energiebilanz muss dieser zusätzliche Verbrauch berücksichtigt werden. Die durchgeführte Abschätzung zeigt, dass der höhere Energiebedarf für den häufigeren Ersatz bereits nach einigen Jahren durch Einsparungen dank dem geringerem Rollwiderstand ausgeglichen wird. Die Dauer für diese Kompensation hängt massgeblich von der Verkehrsmenge ab.

31. März 2021

Résumé

Avec 27% de la consommation énergétique brute suisse, le trafic routier représente le plus grand consommateur de Suisse. Une réduction de la consommation énergétique du trafic routier peut, par conséquent, contribuer de manière significative à la protection du climat et de l'environnement.

La consommation énergétique du trafic routier est directement et considérablement influencée par la résistance au roulement. Dans le but de protéger la population du bruit routiers qui impacte la qualité de vie et la santé, on pose en Suisse, depuis 2010, de plus en plus des revêtements phonoabsorbants. Ces revêtements phonoabsorbants réduisent de manière considérable les bruits nocifs à la source. Toutefois, une question subsiste : quelles sont leurs performances en termes de résistance au roulement? En effet, jusqu'à ce jour il n'existe aucune donnée concernant la résistance au roulement des revêtement phonoabsorbants en Suisse. Dès lors une vaste campagne de mesures a été effectuée en 2018 par G+P sur plus de 140 km du réseau routier suisse, situés en localité, comprenant 16 revêtements différents.



Les données mesurées, représentées dans la figure ci-dessus, montrent que les revêtements phonoabsorbants (type « LAB ») présentent une résistance au roulement réduite comparé aux types de revêtements conventionnels. Par conséquent, outre la protection contre le bruit, les revêtements phonoabsorbants permettent également de réduire la consommation énergétique du trafic routier. Par ailleurs, une relation directe a pu être établie entre le bruit de roulement mesuré et la résistance au roulement : plus un revêtement est bruyant, plus la résistance au roulement augmente. La relation entre la profondeur de profile moyenne des revêtements et leur résistance au roulement, comme présentée dans d'autres études, n'a pu que partiellement être établie. Ceci peut être attribué à la portée limitée des points de mesure de la profondeur de profile moyenne, en accord avec le but primaire du projet, qui était de comparer la résistance au roulement avec les propriétés acoustiques de phonoabsorbants.

Afin d'évaluer intégralement le potentiel de réduction de la consommation énergétique du trafic routier grâce aux revêtements phonoabsorbants, il est impératif de prendre en compte la production et de la pose du revêtement. Dans une perspective de bilan énergétique globale, il faut tenir compte de cette consommation additionnelle. En effet, les revêtements phonoabsorbants ont une durée de vie réduite de moitié (en termes de performance acoustique) en comparaison à un revêtement conventionnel. Par conséquent, ils doivent être renouvelés plus souvent. Les analyses de la présente étude montrent que les besoins supplémentaires en énergie dû au remplacement fréquent du revêtement sont déjà compensés après quelques années grâce à la réduction significative de la consommation énergétique de la résistance au roulement. La période nécessaire à l'obtention d'un bilan neutre ou positif dépend du volume de trafic sur le tronçon.

31. März 2021

Inhalt

1.	Einleitung	8
2.	Grundlagen.....	10
2.1	Rollwiderstandsmessungen	10
2.2	Texturmessung.....	10
2.3	CPX-Messungen	12
2.4	Rollwiderstand und Energieverbrauch.....	12
2.5	Life Cycle Assessment von Asphaltbelägen	14
3.	Messkonzept	16
3.1	Messstrecken	16
3.2	Messkampagne	16
3.3	Gemessene und analysierte Belagstypen	17
4.	Datenaufbereitung	18
4.1	Geolokalisation und Korrekturen	18
4.2	Ausschluss und Filterung	18
5.	Resultate	19
5.1	Rollwiderstandskoeffizienten auf unterschiedlichen Strassenbelägen	19
5.2	Einflussfaktoren Rollwiderstand	20
6.	Emissionsbetrachtung: lärmarme Beläge vs. konventionelle Beläge	25
7.	Diskussion	29
7.1	Rollwiderstand.....	29
7.2	Emissionsbetrachtung	29
8.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	31

Anhang

I	Quellenverzeichnis.....	32
II	Abbildungsverzeichnis	33
III	Tabellenverzeichnis	33
IV	Abkürzungsverzeichnis.....	34
V	Kartenausschnitte der Messstrecken.....	35
VI	Multivariates Modell	37
VII	Beilage Datengrundlage	40

Beilagen

A	Datengrundlage: «Datengrundlage Rollwiderstand auf LAB.csv»
---	---

31. März 2021

1. Einleitung

Der Strassenverkehr ist mit über 27 % der grösste Verbraucher an Bruttoenergie in der Schweiz und der Trend ist weiterhin ansteigend [1]. Um den Treibstoffverbrauch und die Treibhausgas Emissionen eines Motorfahrzeuges zu verringern, kann unter anderem der Rollwiderstand des Fahrzeuges reduziert werden. Ein Versuch die fahrzeugseitigen CO₂-Emissionen zu reduzieren, wurde mit der Einführung der Energieeffizienzklassen der Reifen und der Personenwagen unternommen. Der Rollwiderstand ist jedoch auch stark abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit der Strassenbeläge. Die Einsparung von Treibstoff und damit CO₂-Emissionen durch Strassenbeläge mit geringerem Rollwiderstand ist potenziell grösser, weil jeder Verkehrsteilnehmer unabhängig zum verwendeten Reifen oder Fahrzeug einen Beitrag leistet. Zusätzlich zum erheblichen Potential zur Verringerung des Ausstosses von Treibhausgasen, werden gleichzeitig die Schadstoffemissionen reduziert.

Ziel des vorliegenden Projektes ist den Rollwiderstand verschiedener Beläge zu quantifizieren und in Zusammenhang mit der Belagsakustik zu betrachten, damit zukünftig Synergien zwischen Lärm- und Klimaschutz besser genutzt werden können. Durch die verbesserte Nutzung des Einsparungspotentials auf Seite der Strasseninfrastruktur kann zudem ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der Klimaziele 2050 geleistet werden. Des Weiteren profitiert die Bevölkerung, da der Treibstoffverbrauch und damit die CO₂- und Schadstoffbelastung durch Personenwagen weiter reduziert werden kann.


Belagsseitig		Fahrzeugseitig		
	Rollwiderstand Strassenbelag 	Rezeptur (Recyclinganteil, ...) 	Reifenlabel 	Zielvorgabe CO2-Emissionen 
+	Langanhaltende, flächendeckende Wirkung	Sofortige Wirkung	Transparenz	Klare Ziele CO2/km Einfacher Vollzug
-	Nicht immer umsetzbar	Einmalige Wirkung Einbau schwierig	Markt entscheidet kleiner Verbreitungsgrad	Markt entscheidet

Abbildung 1: Chancen und Limitierungen verschiedener Ansatzpunkte zur Emissionsreduktion im Strassenverkehr.

Messkampagne auf Schweizer Strassenbelägen

Fokus des Projektes ist es das Potential lärmarmen Beläge (LAB) bezüglich CO₂-Einsparung zu ermitteln. Hierzu wurden die Rollwiderstandseigenschaften sowohl von LAB als auch konventionellen Strassenbelägen untersucht. Dabei wurden über 140 km Strassenbeläge, bestehend aus 16 verschiedenen Belagstypen mit dem Rollwiderstandsmesssystem der Technischen Universität Gdansk (TUG) gemessen [2]. Bei der Rollwiderstandsmessung wurde zudem automatisch die Makrotextur des Belags erhoben. Um auf Zusammenhänge zwischen dem Rollwiderstand und der Belagsakustik zu schliessen, wurden auf denselben Strecken ebenfalls Messungen der Rollgeräusche mit dem CPX Verfahren durchgeführt.

31. März 2021

Datenauswertung und Emissionsreduktionspotential

In einer kombinierten, statistischen Datenanalyse der ermittelten Messdaten wurden Zusammenhänge zwischen Parametern der Akustik und der Oberflächentextur mit den Rollwiderstandseigenschaften des Strassenbelages untersucht, um die aussagekräftigsten Parameter zu identifizieren.

Die gemessenen Rollwiderstandswerte der verschiedenen Belagstypen wurden für eine Abschätzung der möglichen Reduktion von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen für lärmarme Beläge genutzt. Hierbei müssen Live Cycle Aspekte berücksichtigt werden, da sowohl die Lebensdauer mit den daraus entstehenden anlagenseitigen Emissionen als auch der Rollwiderstand zur Gesamtemission beitragen.

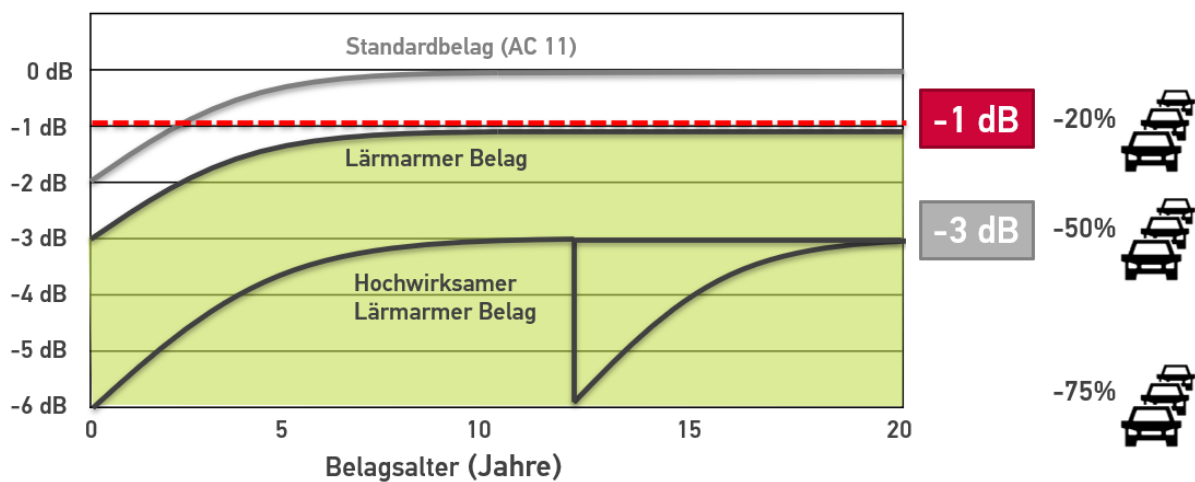


Abbildung 2: Schema akustischer Alterung von Standardbelägen, lärmarmen Belägen und hochwirksamen lärmarmen Belägen (hier mit Erneuerung nach der akustischen Lebenszeit) und die entsprechende Wirkung im Masse des Verkehrsaufkommens.

2. Grundlagen

2.1 Rollwiderstandsmessungen

Die Rollwiderstandsmessungen wurden mit dem Messsystem $R^2 Mk.2$, einem von der TUG eigens entwickelten Anhänger durchgeführt. Wie in Abbildung 3 gezeigt, funktioniert das Messsystem nach dem *vertical arm* Prinzip, also der indirekten Messung des Rollwiderstands durch den Versatzwinkel α des an einem beweglich gelagerten Arm montierten Teststreifens [3].

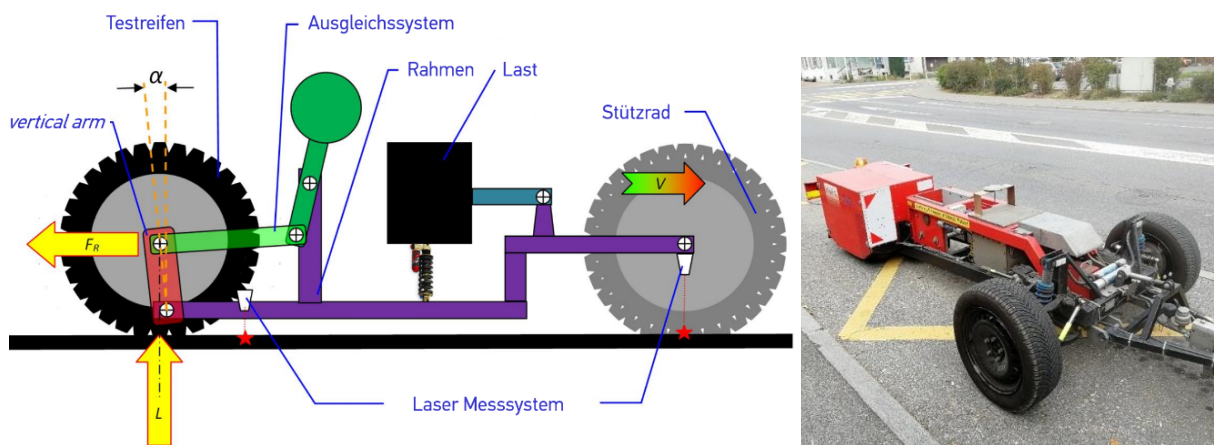


Abbildung 3: Schema und Foto des $R^2 Mk.2$ Messanhängers der TUG, übersetzt von [3].

Mittels GPS werden zudem die Position, Geschwindigkeit und Orientierung erhoben. Zusätzlich werden laufend die Reifen-, Belags- und Lufttemperatur für Korrekturzwecke gemessen. Die Rollwiderstandsmessung ist in der ISO 28580 normiert, wo z.B. Teststreifen und Temperaturkorrektur definiert sind.

Die Rollwiderstandskraft ist klein im Verhältnis zu anderen Kräften (Beschleunigungskräfte, Normalkraft, ...) und steht im Einfluss diverser weiterer Größen wie der Temperatur, Steigung oder Beschleunigung des Anhängers. Diese Einflüsse werden teilweise durch das Messsystem kompensiert bzw. müssen in der Datenaufbereitung berücksichtigt werden:

- Temperaturkorrektur
- Filter auf engem Geschwindigkeitsbereich: ± 1.5 km/h
- Filter auf ebene Abschnitte (Steigung $< 3\%$), da der Einfluss der Steigung nicht korrigierbar ist
- Auswahl von verlässlichen Messabschnitten durch erfahrene Messtechniker.

2.2 Texturmessung

Die Makrotextur des Belags lässt sich mit der sogenannten *mittleren Profiltiefe* (MPD) charakterisieren. Bei der Rollwiderstandsmessung mit dem $R^2 Mk.2$ Messsystem wird auch das Belagsprofil mittels Lasermessung ermittelt. Daraus lässt sich die MPD per 10 cm Belagslänge als Mittelwert der maximalen Mittelwertabweichung zweier Sub-Segmente berechnen, entsprechend Abbildung 4. Die MPD beschreibt somit die mittlere Rauigkeit des Belags. Dabei entspricht eine tiefe MPD einer feinen Oberfläche, während eine hohe MPD einer rauen und groben Oberfläche entspricht.

31. März 2021

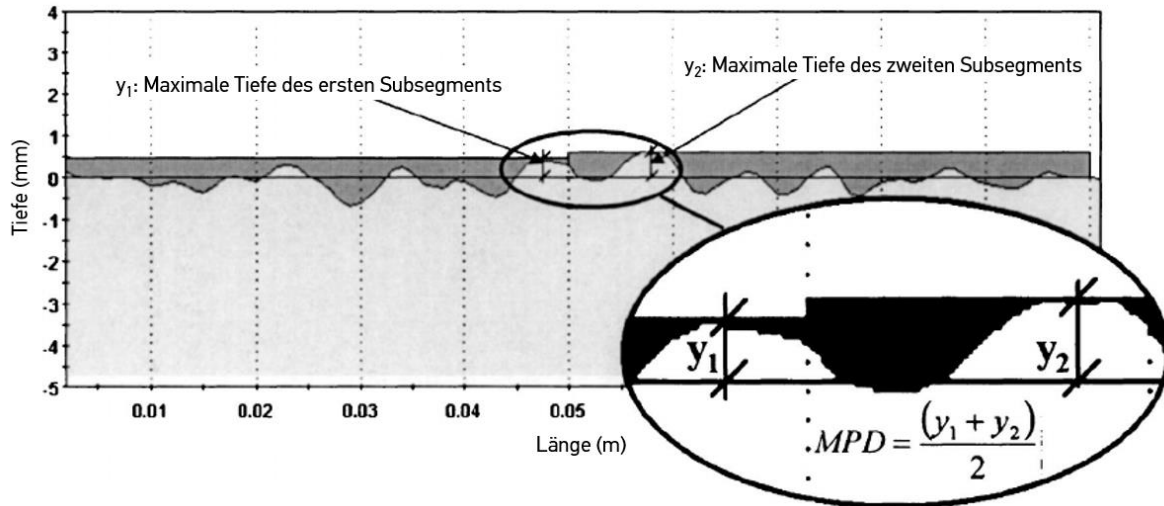


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Berechnung der MPD, übersetzt von [4].

Während die MPD die Makrotextur beschreibt, sind verschiedene Texturwellenlängen-Bereiche charakteristisch für verschiedene Fahrzeug-Fahrbahn Interaktionen [5]. Wie in Abbildung 5 gezeigt, hat die Unebenheit des Belags Einfluss auf den Rollwiderstand, die Mega- und Makrotextur haben Einfluss auf Rollwiderstand und Reifen-Fahrbahn Geräusche.

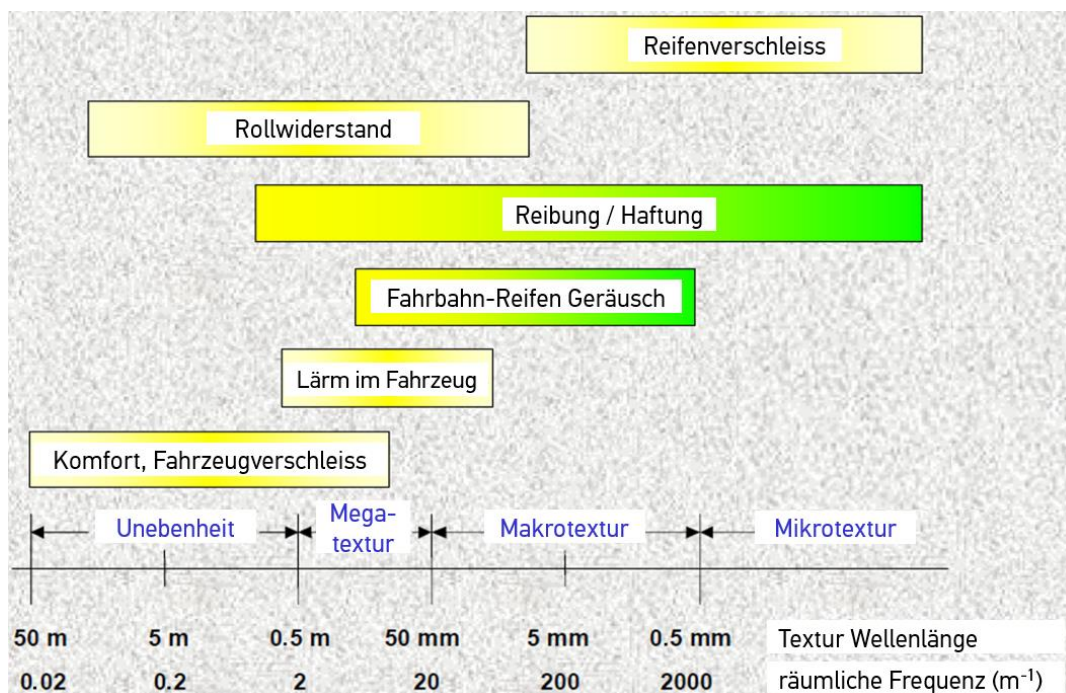


Abbildung 5: Texturwellenlängen-Bereiche eines Strassenbelags und deren Auswirkungen auf Fahrkomfort, Rollwiderstand, Reibung, Akustik und Reifenverschleiss. Übersetzt von [5]. Grüne Bereiche signalisieren positive Auswirkungen auf den jeweiligen Parameter, gelbe Bereiche signalisieren nachteilige Effekte.

31. März 2021

2.3 CPX-Messungen

Bei der CPX Messmethode werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit einem Messanhänger ermittelt.

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 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 6 dargestellt.

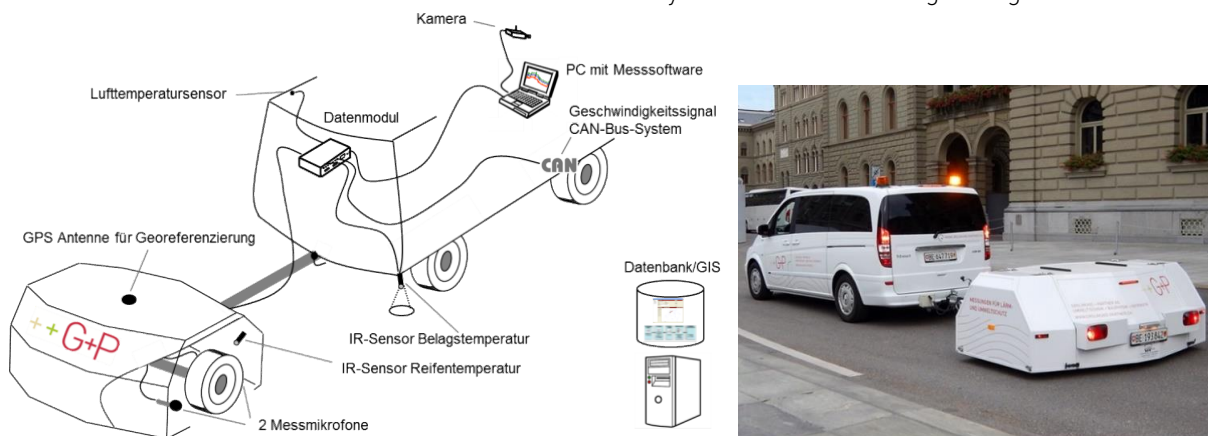


Abbildung 6: Schematische Übersicht und Foto des CPX-Messsystems.

Die Signale der 4 Messmikrofone (2 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 [6] werden im zentralen Datenmodul verarbeitet und von der Messsoftware aufgezeichnet. Die unmittelbare grafische Anzeige der Messsignale ermöglicht die ständige Überwachung des gesamten Messvorgangs während der Fahrt. Eine Kamera auf der Vorderseite des Fahrzeugs fotografiert zu Interpretations- und Kontrollzwecken fortlaufend die Strassenoberfläche. Die A-bewerteten Schallpegel werden kontinuierlich auf der gesamten Messstrecke erfasst. Dabei werden die Mikrofonsignale mit einer Frequenz von 8 Hz aufgezeichnet und pro Messsegment (Länge 20 m) energetisch gemittelt.

2.4 Rollwiderstand und Energieverbrauch

Am bewegten Fahrzeug wirken neben der Rollwiderstandskraft weitere, bremsende Kräfte: Luftwiderstandskraft, Hangabtriebskraft und Beschleunigungskräfte (des Fahrzeugs selbst und bewegter Teile (Trägheitskräfte)), siehe Abbildung 7 [7]. Zudem verbraucht ein Fahrzeug auch in Grundlast Energie und hat einen begrenzten Wirkungsgrad. Diese Kräfte summieren sich zu einer Gesamtkraft auf, deren Überwindung dem Energieverbrauch des Fahrzeugs entspricht:

$$F_{GES} = F_L + F_R + F_B + F_H + F_V, \text{ mit}$$

31. März 2021

- der Luftwiderstandskraft $F_L = C_D * A_F * v^2 * \rho / 2$
wobei: C_D ... Strömungswiderstandskoeffizient, A_F ... projizierte Fahrzeug-Frontalfläche, v ... Geschwindigkeit, ρ ... Luftdichte.
- der Rollwiderstandskraft $F_R = C_R * m * g * \cos(\alpha)$
wobei C_R ... Rollwiderstandskoeffizient, m ... Fahrzeugmasse, g ... Fallbeschleunigung, α ... Steigungswinkel der Fahrbahn.
Der Rollwiderstandskoeffizient C_R ist das Verhältnis aus Rollwiderstandskraft und Normalkraft (F_R/F_N) und ist eine dimensionslose Grösse zwischen 0 und 1.
- den Beschleunigungskräften $F_B = m * a + F_I$
wobei F_I Trägheitskräfte bewegter Teile (v.a. der Reifen) beinhaltet.
- der Hangabtriebskraft $F_H = m * g * \sin(\alpha)$
- und weiteren Verlustkräften F_V die den begrenzten Wirkungsgrad und andere, nicht direkt an der Bewegung des Fahrzeugs beteiligte Kräfte repräsentieren.

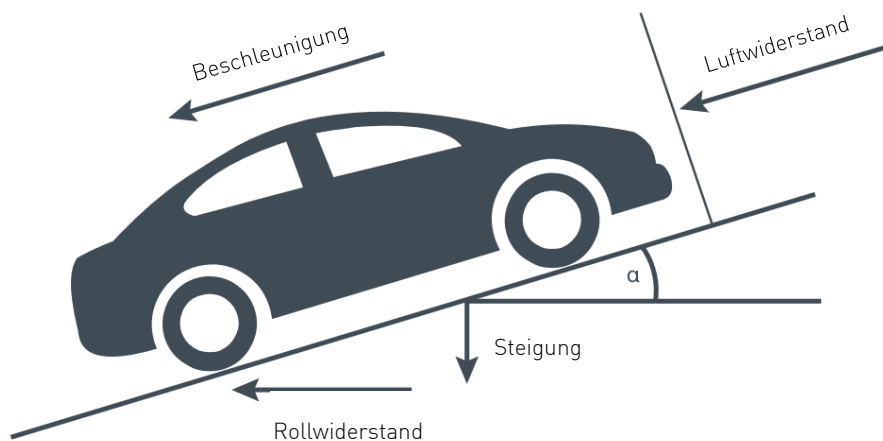


Abbildung 7: Am bewegten Fahrzeug wirkende Widerstandskräfte, übersetzt von [7].

Entsprechend hat eine Reduktion des Rollwiderstandes nur einen anteilmässigen Effekt an der Reduktion des Gesamtenergie und -treibstoff Verbrauchs. Der Rollwiderstand selbst ist bis zu mittleren Geschwindigkeiten (ca. 60 km/h, [8]) weniger abhängig von der Geschwindigkeit als bei hohen Geschwindigkeiten. Sein Anteil am Gesamtenergieverbrauch ist bei geringen Geschwindigkeiten höher, bei Beschleunigungsvorgängen oder hohen Geschwindigkeiten (grösserer Luftwiderstand) niedriger.

Bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h wurde mittels Modell-Simulation ein Anteil des Rollwiderstandes von 45% des gesamten Energieverbrauch ermittelt [9]. Ganzheitlicher bezüglich dem typischen Fahrprofil sind Simulationen, die auf Grundlage von Geschwindigkeitsprofilen von Fahrzeug-Testverfahren arbeiten. Hier wurde der Anteil der Rollwiderstandes am Gesamtenergieverbrauch zu 15% (WLTP Test, [7]) bzw. 22% (FTP-75 Test, [9]) abgeschätzt. Der Anteil des Rollwiderstandes ist in diesen Szenarien reduziert, da Beschleunigungskräfte dominieren.

31. März 2021

Für die Abschätzung des Anteils des Rollwiderstandes am Gesamtverbrauch wurde in dieser Studie der Wert von 15% aus dem WLTP Test [7] verwendet. Dieser Wert stellt eine konservative, aber relevante Variante dar, da dieser mit dem Fahrprofil ermittelt wurde, welches auch für die allgemeingültigen Verbrauchsangaben verwendet wird.

2.5 Life Cycle Assessment von Asphaltbelägen

Wie in Abbildung 8 dargestellt, fließen in ein Life Cycle Assessment (LCA) nach Möglichkeit sämtliche zugehörigen Phasen und Prozesse über die ganze Lebensdauer (Herstellung, Nutzung und Entsorgung) mit ein. So können die Gesamtemissionen bzw. -Verbräuche abgeschätzt werden und zum Beispiel bezüglich des Herstellungsverfahrens (Recyclingasphalt, Hoch- oder Niedertemperaturasphalt, Bitumengehalt) verglichen werden. Die Lebensdauer eines Strassenbelags ist jedoch prinzipiell der relevanteste Faktor bezüglich der Gesamtemission pro Nutzungsjahr [10]. Somit ist auch im Vergleich von konventionellen Belägen mit LAB die verkürzte Lebensdauer¹ (25 vs. 12 Jahre [11]) deutlich entscheidender für die Gesamtemissionen pro Nutzungsjahr als eventuelle Unterschiede in einzelnen Lebensphasen (wie z.B. unterschiedliche Rezepturen). Für eine Abschätzung ist daher die Lebensdauer der zentrale Parameter, und es können in erster Ordnung für beide Belagsarten dieselben, allgemeinen Emissionswerte verwendet werden.

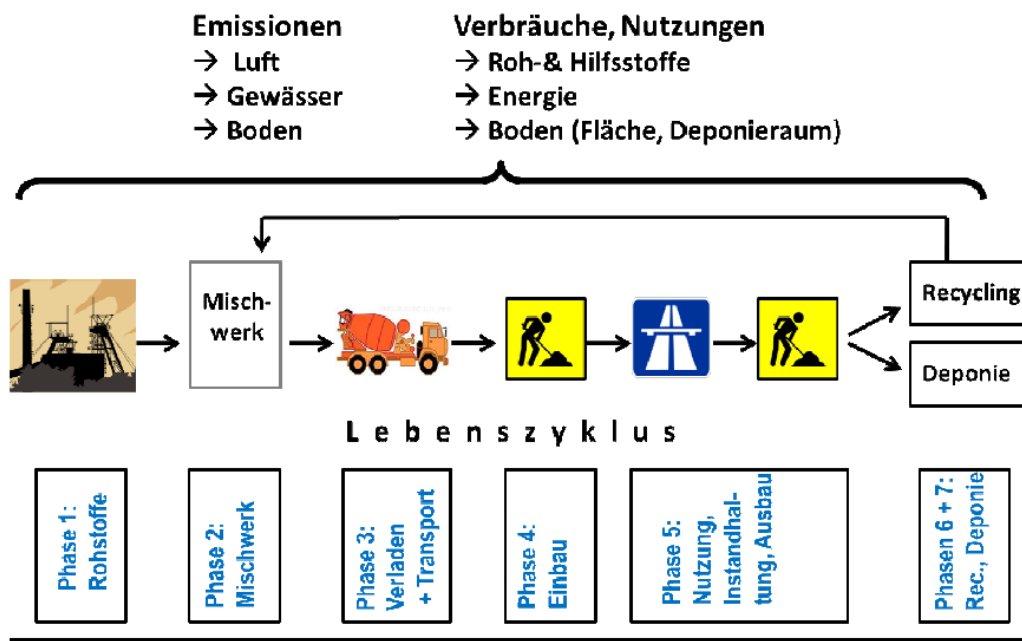


Abbildung 8: Phasen, Prozesse, Verbräuche und Emissionen in der LCA von Strassenbelägen [10].

Um einen Vergleich zu möglichen Emissionseinsparungen durch Rollwiderstandsreduktionen zu ziehen, bietet sich die Wirkungskategorie *Treibhauspotential* der LCAs an. Die hierzu in verschiedenen

¹ Bei lärmarmen Belägen bestimmt oft die akustische Wirksamkeit die Lebensdauer (wo diese als Lärmschutzmassnahme eingesetzt werden), da diese im Allgemeinen kürzer ist als die bautechnische Beständigkeit des Belages. Bei konventionellen Belägen hingegen bestimmt hauptsächlich die bautechnische Beständigkeit die Lebensdauer des Belages.

Studien abgeschätzten Grössen sind vergleichbar [12], für einen konventionellen Referenzbelag (herkömmlicher, heiss verarbeiteter Asphalt) kann ein Wert von 48 kg CO₂ Äquivalent pro Tonne Asphalt angenommen werden [10]. Dieser Wert mag im Vergleich zu beispielsweise Konsumgütern eher tief erscheinen. So ist es nicht erstaunlich, dass der Hauptteil der Emissionen auf die Nutzung (Befahrungen) zurückzuführen ist, wie in den einzelnen Studien hervorgehoben.

31. März 2021

3. Messkonzept

Ausgangslage für die Auswahl der Messstrecken und Planung der Messkampagne war es, bei konstanten Umweltbedingungen mit effizient gelegten, für die Messungen geeigneten Messstrecken ein breites Spektrum verschiedener Belagstypen in der Deutsch- und Westschweiz zu erfassen:

- Die Messstrecken zeichnen eine möglichst gute Repräsentation relevanter Belagstypen (der Fokus lag hierbei auf den Typen, nicht den Belagszuständen) verschiedener LAB und konventioneller Beläge aus.
- Die Messstrecken haben ein möglichst flaches und kurvenarmes Profil und ermöglichen einen effizienten Messablauf.
- Die Messungen fanden bei bedecktem Wetter bzw. teilweise nachts statt um möglichst konstante Temperaturen während der Messung zu gewährleisten.

3.1 Messstrecken

Die beiden Messstrecken am Murtensee (Kanton Fribourg) und am Hallwilersee (Kanton Aargau) sind in Abbildung 9 bzw. in Anhang V auf Kartenausschnitten eingezeichnet. Dabei beträgt die Gesamtstreckenlänge der Freiburger-Runde 31.1 km und die der Aargauer-Runde 110.8 km. Farblich gekennzeichnet sind die zugewiesenen verschiedenen Belagstypen entlang den Messstrecken.

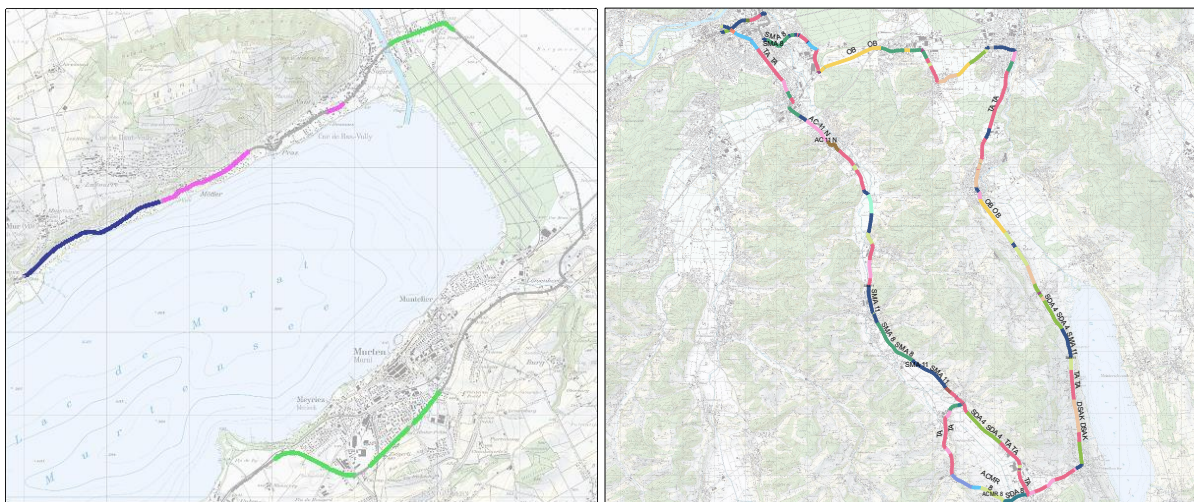


Abbildung 9: Kartenausschnitte der Messstrecken am Murtensee (Kt. FR, links) und am Hallwilersee (Kt. AG, rechts). Eine vergrößerte Ansicht findet sich in Anhang V. Farblich gekennzeichnet sind die verschiedenen Belagstypen entlang der Messstrecke.

3.2 Messkampagne

Die CPX Messung wurde am 8.10.2018, die Rollwiderstandsmessung am 9.10.2018 auf denselben zwei Messstrecken in den Kantonen Fribourg und Aargau durchgeführt.

Die CPX Messung erfolgte durch Grolimund und Partner mit dem hauseigenen CPX Messsystem, hierbei wurden auf jeder Strecke jede Fahrspur mit dem SRTT-Reifen bei möglichst konstanter Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h doppelt gemessen. Bei trockener Witterung lagen die Lufttemperaturen bei der Messung zwischen 7 und 16 °C.

31. März 2021

Die Rollwiderstandsmessung wurde durch das Team der TUG mit dem Messsystem *R² Mk.2* und SRTT-Reifen durchgeführt, hierbei wurde jede Fahrspur einfach gemessen. Bei trockener Witterung lagen die Lufttemperaturen zwischen 16 und 26 °C.

3.3 Gemessene und analysierte Belagstypen

In Tabelle 1 ist die jeweilige Länge der vermessenen Belagstypen gezeigt. Dies entspricht der Netto-Belagsgrundlage, also jenen Abschnitten, die weder bei der Messung ausgeschlossen wurden (z.B. wegen Störeinflüssen auf der Fahrbahn), noch in der Datenaufbereitung gefiltert wurden (Geschwindigkeitsbereich, Steigung, ... siehe Kapitel 4.2) und für welche Messdaten von sowohl Rollwiderstand als auch CPX bestehen. Total wurde ein Streckenlänge von 91 km, bestehend aus 16 verschiedenen Strassenbelagstypen vermessen.

Die Belagszuweisung geschah indirekt durch Informationen von den Kantonen Fribourg und Aarau. Dies basiert somit auf den im Kataster gespeicherten Daten, wurde aber nicht vor Ort validiert.

Tabelle 1: Länge der vermessenen Belagstypen nach Belagstypgruppe

Belagstypgruppe	Belagstyp	Länge (km)	Gesamtlänge (km)
AC / TA			32.2
	AC 11	6.4	
	AC 16 S	0.5	
	AC 8 N	0.4	
	TA	24.9	
DSAK	DSAK		6.7
LAB 4er ²			17.6
	Famsiphonogrip4 («LAB4 Firmenlösung 1»)	4.6	
	Nanosoft4 («LAB4 Firmenlösung 2»)	3.4	
	Sapaphone4 («LAB4 Firmenlösung 3»)	1.9	
	SDA 4 [-12, -16]	7.7	
LAB 8er	SDA 8-12		1.3
OB	OB		7.2
SMA / ACMR			26.3
	ACMR 11	1.2	
	ACMR 8	5.3	
	SMA 11	11.3	
	SMA 6	1.3	
	SMA 8	7.2	
Total			91.4

² Die *LAB4 Firmenlösungen 1 – 3* sind von der Bauweise vergleichbar mit den SDA 4 Belägen, werden jedoch nach haus-eigenen Rezepturen der Hersteller gefertigt.

4. Datenaufbereitung

4.1 Geolokalisation und Korrekturen

Sowohl die CPX Messungen als auch die Rollwiderstandsmessungen liefern geolokalisierte Messwerte. Dabei weisen die Rollwiderstandsmessungen eine sehr hohe Auflösung von 1 m auf. Mit der Verbindung der Rollwiderstandsmessdaten zur hauseigenen CPX-Messdatenbank konnten Informationen zu den Belagstypen und Einbaudaten an die Messdaten geknüpft werden.

Die Rollwiderstandsdaten weisen eine lineare Temperaturabhängigkeit auf, die korrigiert werden muss. Im zugehörigen ISO-Standard 28580 wird ein Korrekturfaktor von 0.008 verwendet. Die hier verwendeten Rollwiderstandsdaten, gemessen mit dem SRTT-Reifen, wurden jedoch, wie von Ejsmont et al. empfohlen, mit dem Korrekturfaktor von 0.014 auf die Referenztemperatur von 25°C normalisiert [13]:

$$C_{R, @25^{\circ}\text{C}} = C_R * [1 + K * (T_{\text{Ambient}} - 25)]$$

wobei: C_R ... gemessener Rollwiderstandskoeffizient, T_{Ambient} ... Lufttemperatur in °C, K ... Korrekturkoeffizient (0.014 für SRTT-Reifen). Alle im folgenden angegebenen Rollwiderstandskoeffizienten sind dementsprechend temperaturkorrigiert.

Eine Temperaturkorrektur der CPX-Messdaten wurde standardmässig nach Bühlmann und Ziegler durchgeführt [6].

4.2 Ausschluss und Filterung

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, stellt die Rollwiderstandsmessung eine komplexe Messgrösse dar, welche im Verhältnis zu den anderen wirkenden Kräften klein ist und sensitiv auf Beschleunigungen auf den Anhänger durch Kurvenfahrten, Unebenheiten auf der Strasse und Steigungen reagiert. So können beispielsweise Schachtdeckel den Messanhänger über mehrere Fahrtmeter destabilisieren und die Messwerte nachfolgend beeinflussen. Diese Einflüsse auf die Messdaten wurden von der Messsequipe der TUG ausgewertet, und für den finalen Datensatz identifiziert und ausgeschlossen, um eine hohe Datenqualität zu gewährleisten.

Es hat sich aber gezeigt, dass die Messdaten trotz der Ausschlussmassnahmen erheblich streuen. Deshalb wurde der Datensatz einem nachträglichen Filter unterzogen, damit der finale Datensatz möglichst rein von äusserlichen Bedingungen ist. Die Filterung besteht aus einem sehr engen Geschwindigkeitsfilter, sowie einer Identifikation von lokalen Steigungen auf der Strasse. Alle Messdaten mit einer Abweichung von mehr als 1.5 km/h wurden ausgeschlossen (18% der Ausgangsdaten). Um den Einfluss von lokalen Steigungen zu eliminieren, wurden ebenso Steigungen von über 3% vom Datensatz entfernt (6% der Ausgangsdaten). Mit einer Filterung von knapp 25% der Ausgangsdaten konnte so die Datenqualität der Rollwiderstandsmessungen weiter verbessert werden, zugleich verbleibt ein umfang- und facettenreicher Datenpool (siehe Tabelle 1 bzw. Beilage) zur weiteren Analyse.

5. Resultate

5.1 Rollwiderstandskoeffizienten auf unterschiedlichen Strassenbelägen

Abbildung 10 zeigt die Rollwiderstandskoeffizienten, welche auf die zugewiesenen Belagsabschnitte aggregiert wurden. Die einzelnen Boxen stellen dabei die Resultate für einzelne Belagstypen dar, welche zur besseren Unterscheidung farblich eingefärbt und nach aufsteigenden Medianwerten sortiert wurden.

Die Grafik zeigt in konsistenter Weise, dass die lärmarmen Beläge (grün umrahmt) im Vergleich zu konventionellen Belägen durchwegs tiefere Rollwiderstandskoeffizienten aufweisen. Dies gilt sowohl für die untersuchten Firmenlösungen von lärmarmen 4er-Belägen als auch für die herkömmlichen SDA 4 Deckschichten ebenso wie die SDA 8-Beläge.

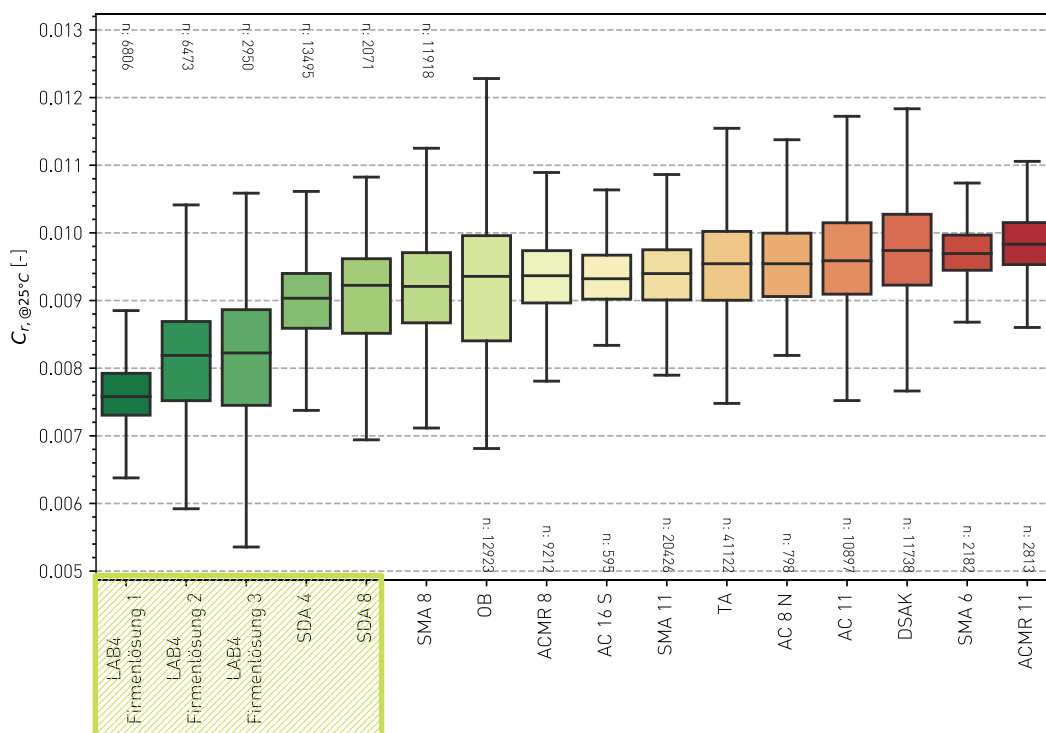


Abbildung 10: Verteilungen der Rollwiderstandskoeffizienten verschiedener Belagstypen in der Schweiz. Die Daten sind als Boxplots dargestellt. Dabei ist der Medianwert in der Mitte als horizontaler Strich innerhalb der Box, welche 50% der Daten umfasst, dargestellt. Ober-/unterhalb der Boxplots ist die Anzahl an eingeflossenen Messwerten (Auflösung: 1 m) ersichtlic. Alle lärmarmen Beläge sind an der x-Achse grün umrahmt.

Für die Unterscheidung zwischen lärmarmen und konventionellen Belägen wurden die einzelnen Belagstypen gemäss der Einteilung in Tabelle 1 zu Belagsgruppen kategorisiert und nach deren Rollwiderstandskoeffizienten ausgewertet. Abbildung 11 zeigt die Verteilungen der Rollwiderstandskoeffizienten für verschiedene Belagstypgruppen.

31. März 2021

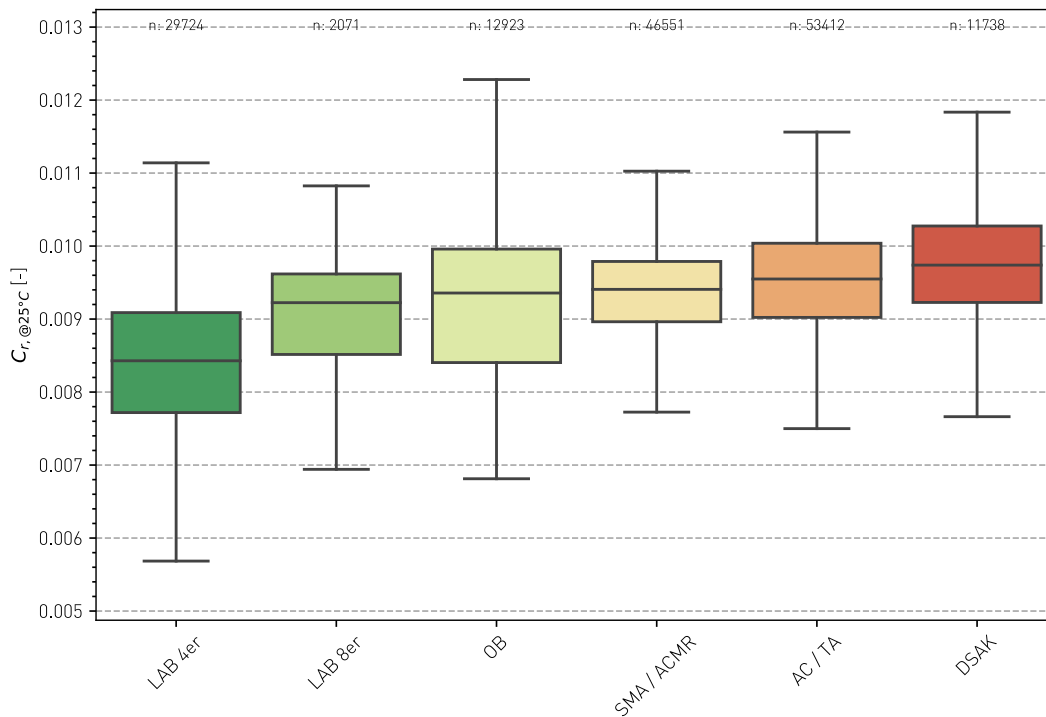


Abbildung 11: Verteilungen der Rollwiderstandskoeffizienten über verschiedene Belagstypgruppen in der Schweiz. Die Daten sind als Boxplots dargestellt. Dabei ist der Medianwert in der Mitte als horizontaler Strich innerhalb der Box, welche 50% der Daten umfasst, dargestellt. Oberhalb der Boxplots ist die Anzahl an eingeflossenen Messwerten (Auflösung: 1 m) ersichtlich.

Die Abbildung illustriert, dass die lärmarmen 4er-Beläge im Vergleich zu konventionellen Deckschichten, wie beispielsweise *SMA/ACMR* signifikant³ tiefere Rollwiderstandskoeffizienten aufweisen.

Die Boxplots in Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen allgemein eine deutliche Streuung. Dies spiegelt einerseits die starke Streuung der Rollwiderstandsdaten wider, andererseits auch, dass die Messwerte nur nach Belagstyp bzw. Belagstypgruppe gruppiert sind. Andere Einflussvariablen sind hierbei nicht abgedeckt.

5.2 Einflussfaktoren Rollwiderstand

5.2.1 Zusammenhang Textur und Rollwiderstand

Abbildung 12 zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen gemessenen mittleren Profiltiefen (MPD) und den Rollwiderstandskoeffizienten. Die einzelnen Datenpunkte stellen aggregierte Mittelwerte pro Belagstyp dar. Wie in der Abbildung ersichtlich, gibt es bezüglich MPD nur eine geringe Variation; ein Grossteil der Daten liegt innerhalb des engen Bereichs zwischen 0.7 und 1.0 mm. Das enge Zusammenliegen der Daten hinsichtlich der MPD, erschwert die Bildung eines robusten linearen Regressionsmodells. Dies äussert sich im niedrigen Korrelationskoeffizient von knapp 0.4.

³ Zweistichproben-T-Test: T-Statistik=-113, Signifikanzlevel p = 0.0

31. März 2021

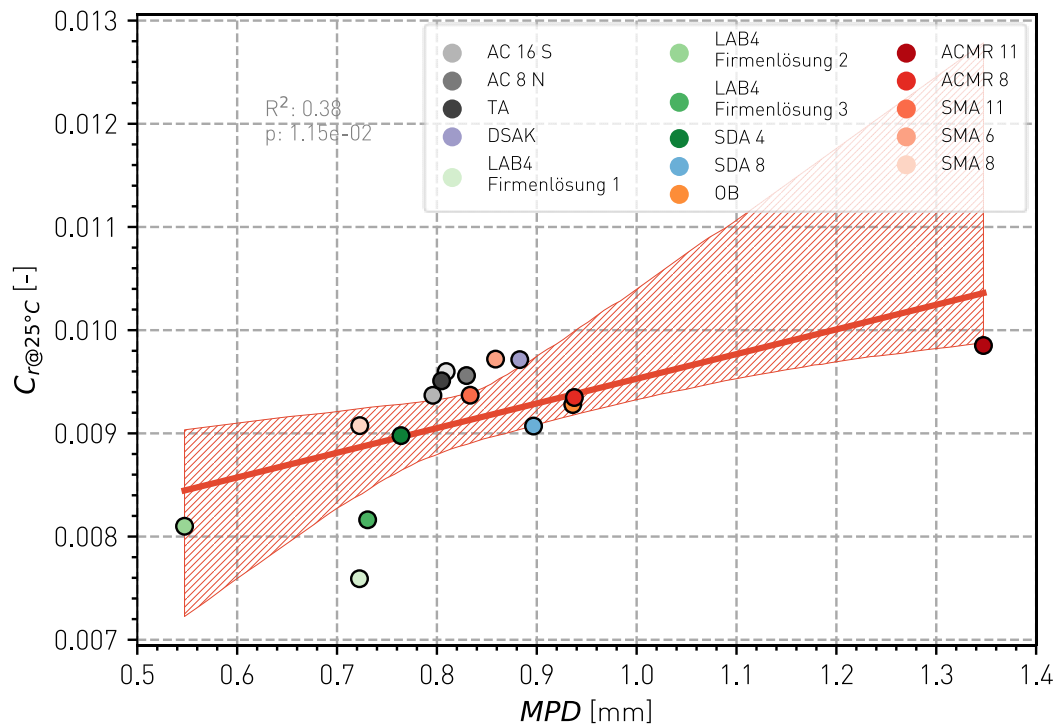


Abbildung 12: Korrelation der MPD und dem Rollwiderstandskoeffizienten. Die einzelnen Punkte stellen gruppierte Mittelwerte der einzelnen Belagstypen dar. Die rote Schattierung zeigt das Unsicherheitsband des linearen Regressionsmodells (95 %-Konfidenzintervall).

Da die Messung dieser Studie typ- und nicht zustandsorientiert ist und der Fokus auf LAB liegt, sind die Extremwerte bezüglich MPD (> 1 mm) zu wenig abgedeckt, um klare Korrelationen zu ermitteln. Zudem bildet die MPD nur einen gewissen Bereich der Texturwellenlängen ab, in anderen Größenordnungen (Mega- oder Mikrotextur) könnten deutlichere Signale erschliessbar sein und so klarere Zusammenhänge zu Tage bringen.

Dennoch zeigt sich allgemein, dass Beläge mit tieferer MPD (feinere Textur) auch tiefere Rollwiderstände aufweisen. Dies trifft besonders auf die lärmarmen 4er-Beläge zu und auffälliger Weise auch für SMA 8: zwar ist der Rollwiderstandskoeffizient vergleichbar mit dem von SDA 8, die MPD hingegen ist hier deutlich tiefer, im Bereich der 4er-Beläge.

5.2.2 Zusammenhang Akustik und Rollwiderstand

Abbildung 13 zeigt den Zusammenhang zwischen CPX-Werten und Rollwiderstandskoeffizienten. Die Regressionsanalyse lieferte einen Korrelationskoeffizienten von 0.7 und vermag daher die Varianz im Datensatz im Vergleich zur MPD besser zu erklären. Das heisst, dass tiefe Reifen-Fahrbahn Geräusche auch im Allgemeinen mit einem tiefen Rollwiderstand des Belags einhergehen. Dies deckt sich mit Abbildung 10, in der die Belagstypen mit der Belagsakustik zusammenhängen.

Ein möglicher Grund für die tieferen Rollwiderstandswerte sind die Textureigenschaften der LAB. So weisen die lärmarmen Beläge mit den 4er- respektive 8er-Körnungen kleinere Maximalkörner auf und stellen somit feinere Oberflächen dar als beispielsweise die konventionellen Deckschichten mit 11er-Körnung.

31. März 2021

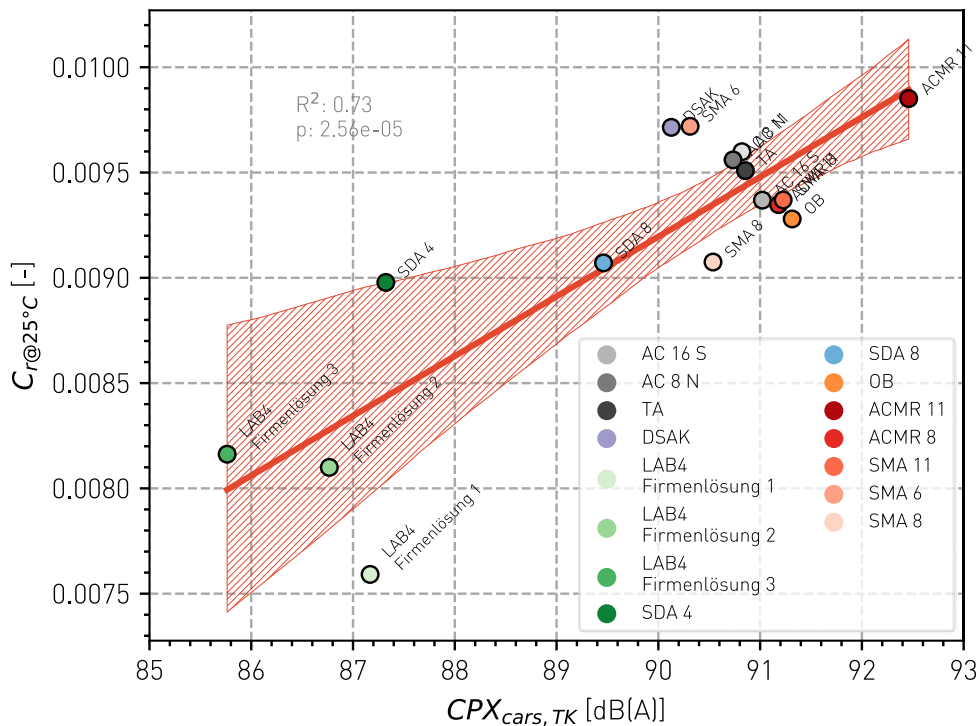


Abbildung 13: Korrelation zwischen CPX Wert und dem Rollwiderstandskoeffizienten. Die einzelnen Punkte stellen gruppierte Mittelwerte der einzelnen Belagstypen dar. Die rote Schattierung zeigt das Unsicherheitsband des linearen Regressionsmodells (95 %-Konfidenzintervall).

5.2.3 Spektraler Verlauf Akustik und Rollwiderstand

In Kapitel 5.2.2 konnte der Zusammenhang zwischen akustischem CPX-Gesamtpegel und dem Rollwiderstandskoeffizienten hergestellt werden. Um den Einfluss einzelner CPX-Frequenzen zu untersuchen, wurde ein lineares Regressionsmodell zwischen dem Rollwiderstandskoeffizienten sowie den einzelnen CPX-Frequenzen ausgewertet, und ist in Abbildung 14 dargestellt.

Dabei zeigt sich, dass die CPX-Pegel im mittleren Frequenzbereich am besten mit den Rollwiderstandsdaten korrelieren. Dieser Frequenzbereich wird hauptsächlich durch Luftströmungs-Effekte und Vibrationen beeinflusst. Ebenso fällt auf, dass auch die Korrelation im tiefen Frequenzbereich (bei 315 und 400 Hz) hoch ausfällt. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen der Schallentstehung an der Reifen-Fahrbahn-Oberfläche, wonach die tieffrequenten Schallanteile hauptsächlich aus der Vibration am angeregten Reifen entstehen. Es kann daher vermutet werden, dass dieselben Einflussgrößen die Schallentstehung, sowie den Rollwiderstand in diesen Frequenzbändern beeinflussen. Die tiefe Korrelation bei 500 Hz ist gut damit erklärbar, dass bei dieser Frequenz reifeneigene Schwingungen (Profil) die Schallentstehung dominieren und belagsseitige Einflüsse geringer sind.

31. März 2021

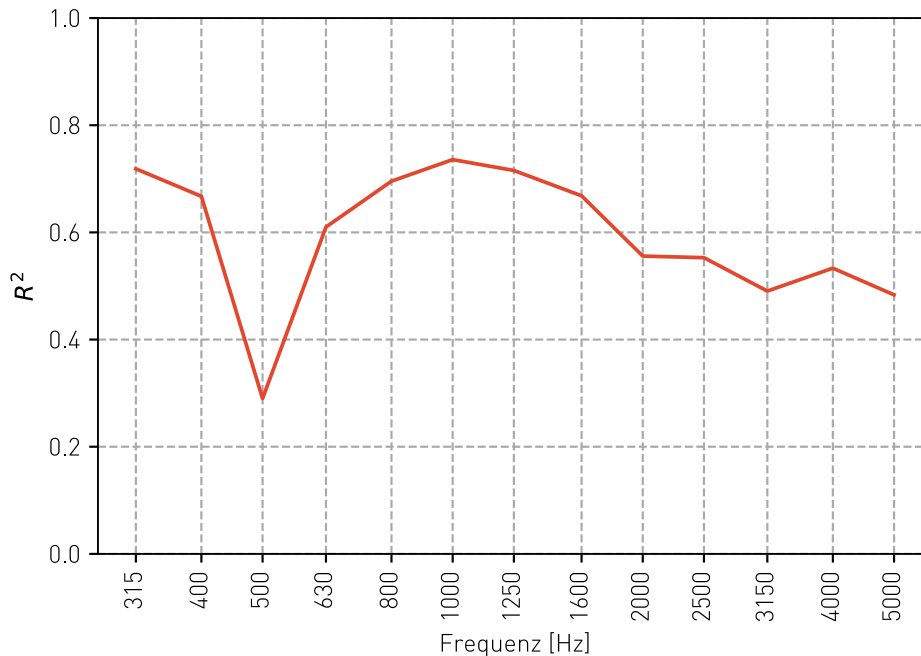


Abbildung 14: Korrelationskoeffizient des linearen Regressionsmodells zwischen dem Rollwiderstandskoeffizient und den spektralen CPX-Pegeln.

5.2.4 Belagsalter und Belagszustand

Abbildung 15 zeigt die Altersabhängigkeit der Rollwiderstandskoeffizienten, angewendet auf den gesamten Datensatz. Der resultierende Korrelationskoeffizient liegt sehr tief, bei 0.16, was für kaum Zusammenhänge zwischen den beiden Größen spricht. Auch eine Betrachtung aufgeschlüsselt nach Belagstypgruppe zeigt keine klaren Abhängigkeiten. Ursprung hierfür ist auch teilweise die Datengrundlage, welche typ- aber nicht zustandsorientiert ist, da die Messstrecken so gewählt wurden, dass möglichst viele verschiedene Belagstypen abgedeckt werden können, hingegen nicht der primäre Fokus darauf lag, von bestimmten Belagstypen möglichst viele Zustände/Alter zu erfassen.

Eine gesamthafte, belagsspezifische Betrachtung des Einflusses zwischen Alterung und Belagstyp ist hier jedoch nicht möglich, da von einem Grossteil der untersuchten Belagstypen nur einzelne Zustände respektive Belagsalter gemessen wurden. Zudem würde hierfür idealerweise die Alterung am jeweils gleichen Abschnitt über die Zeit gemessen und nicht nur verschiedene Abschnitte mit verschiedenem Alter verglichen.

31. März 2021

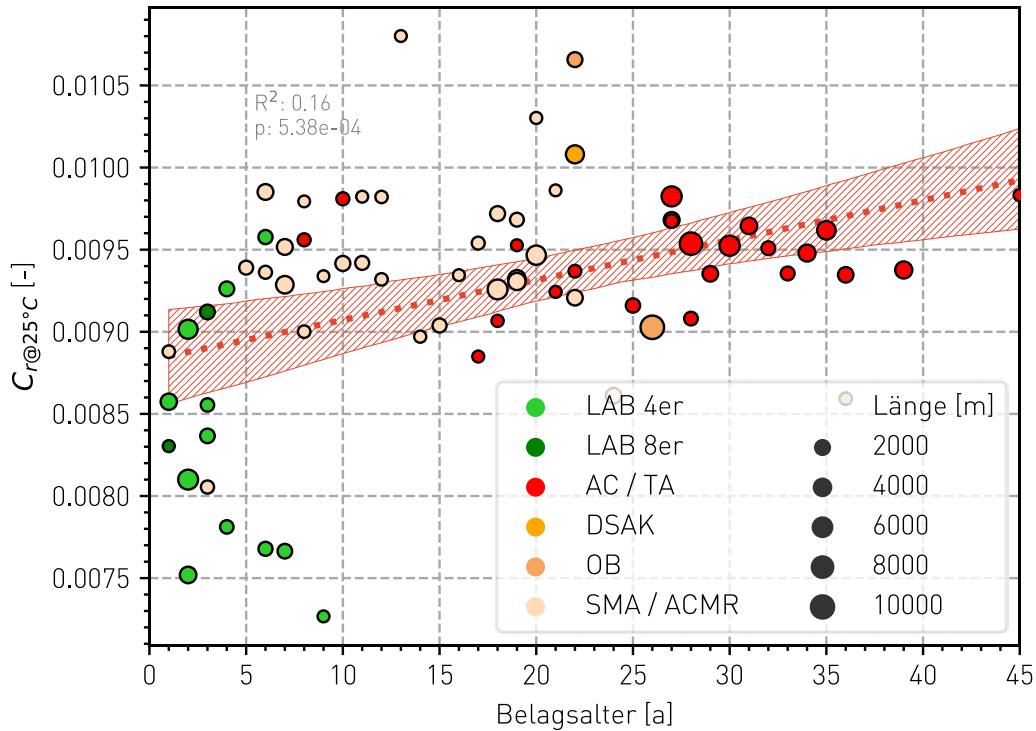


Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Rollwiderstandskoeffizienten und Deckschichtalter nach Belagstypgruppen. Die Grösse der jeweiligen Datenpunkte gibt die Anzahl der enthaltenen Messwerte wieder. Die Korrelation zwischen beiden Grössen ist gesamthaft betrachtet sehr gering ($R^2=0.16$).

5.2.5 Multivariates Modell

Zur weiteren Untersuchung des Zusammenspiels möglicher Einflussparameter auf den Rollwiderstandskoeffizienten wurde ein lineares, multivariates Modell mit verschiedenen Eingangsparametern gebildet. Dabei wurde untersucht, ob eine kombinierte Regressionsanalyse aus Belagsalter, MPD und (spektralen) CPX-Wert die Varianz bezüglich Rollwiderstandsmessungen besser zu erklären vermag als die einfachen linearen Zusammenhänge der vorherigen Analysen. Die Modellresultate und die verschiedenen Modelloutputs sind im Anhang VI gezeigt. Es konnten keine stärkeren Korrelationen oder weitere Erkenntnisse als mit den bestehenden, univariaten Betrachtungen gefunden werden, was die obigen Resultate bestätigt.

6. Emissionsbetrachtung: lärmarme Beläge vs. konventionelle Beläge

Die Rollwiderstandsmessungen verschiedener Beläge (Kapitel 5.1) zeigen, dass die gemessenen LAB generell einen geringeren Rollwiderstand aufweisen als konventionelle Beläge. Diese Synergie aus Lärmschutz und Klimaschutz durch eine Reduktion von Nutzungsemissionen ist sehr positiv. Für eine ganzheitliche Bewertung müssen den Einsparungen auf Nutzungsseite erhöhte Emissionen auf Anlagenseite aufgrund der kürzeren Lebensdauer von LAB gegenübergestellt werden (siehe Kapitel 2.4 und 2.5).

Einfluss Rollwiderstandsreduktion auf Nutzungsemissionen

Ausgehend von den Messdaten des Rollwiderstands verschiedener Belagstypen betrachten wir zwei Szenarien:

- Durchschnittliches Szenario: ein konventioneller Belag der Klasse *AC/TA* wird durch einen LAB der Klasse *LAB 4er* ersetzt. Hierdurch wird der Rollwiderstandskoeffizient und entsprechend der Rollwiderstand um 12% reduziert.
- Potenzielles Szenario: ein Belag vom Typ *ACMR 11* wird durch einen Belag vom Typ *LAB4 Firmenlösung 1* ersetzt. Hierdurch wird der Rollwiderstandskoeffizient und entsprechend der Rollwiderstand um 23% reduziert.

Wie in Kapitel 2.4 erläutert, trägt der Rollwiderstand nur einen Teil zum Gesamtenergieverbrauch eines Fahrzeugs bei, somit hat auch eine Rollwiderstandsreduktion nur eine anteilmässige Reduktion der Gesamtemissionen zur Folge. Simulationsergebnisse für das WLTP Fahrzeug-Testverfahren liefern hierfür einen konservativen Wert von 15% [7]. Dies bedeutet, dass die jeweilige Rollwiderstandsreduktion eine Emissionsreduktion von 1.8% bzw. 3.5% im durchschnittlichen bzw. potenziellen Szenario zur Folge hat.

Bezogen auf eine CO₂ Emission von 137 g/km (Durchschnittswert der 2018 in der Schweiz neu zugelassenen PW nach NEFZ 2.0 (rückgerechnet von WLTC), [14]) können so pro Befahrung und Streckenkilometer 2.5 g CO₂ bzw. 4.7 g CO₂ eingespart werden⁴.

Anlagenemissionen

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, ist der zentrale Parameter, welcher die anlagenseitigen Emissionen bestimmt, die Lebensdauer. Unterschiede in der Belagsrezeptur oder Herstellung zwischen konventionellen Belägen und LAB sind zweitrangig und nicht Teil dieser Betrachtung. Unter der Annahme einer Lebenszeit von 25 Jahren für einen konventionellen Belag bzw. 12 Jahren für einen LAB [11] folgt, dass die Anlagenemissionen (gesamte LCA Betrachtung, jedoch ohne Nutzungsemissionen) für die LAB um einen Faktor 2.1⁵ höher sind als von konventionellen Belägen.

Für einen konventionellen Referenzbelag wird auf den gesamten Lebenszyklus bezogen ein Treibhausgaspotential-Wert von 48 kg CO₂ Äquivalent pro Tonne Asphalt angegeben [10]. Unter der Annahme einer mit einer Dichte von 2.4 t/m³ eingebauten, 3.5 m breiten Schicht von welcher durchschnittlich

⁴ Einsparung durchschnittliches Szenario: 12% * 15% * 137 g/km = 2.5 g/km
Einsparung potenzielles Szenario: 23% * 15% * 137 g/km = 4.7 g/km

⁵ 25 Jahre geteilt durch 12 Jahre = 2.1

31. März 2021

6.5 cm erneuert werden müssen⁶, ergibt sich ein Emissionswert von 26.2 t CO₂ Äquivalent pro Streckenkilometer⁷.

Gesamtbild Emissionen und Amortisierungszeitraum

Um die Nutzungsemissionen mit den Anlagenemissionen vergleichen zu können, betrachten wir den Amortisierungszeitraum für beide Szenarien. Die Anlagenemission kann als einmalig je Lebenszyklus des Belages angesehen werden, und ist aufgrund der kürzeren Lebensdauer von LAB deutlich höher als die eines konventionellen, längerlebigen Belags. Die Nutzungsemissionen hingegen hängen direkt von der Anzahl der täglichen Befahrungen (DTV) ab und sind im Allgemeinen für die LAB aufgrund des durchschnittlich reduzierten Rollwiderstands tiefer als für einen konventionellen Belag mit erhöhtem Rollwiderstand. Der Amortisierungszeitraum ist somit abhängig vom DTV und den zu vergleichenden Belagstypen und gibt an, bei welchem DTV und nach wie vielen Jahren die höheren Anlagenemissionen durch reduzierte Nutzungsemissionen ausgeglichen werden.

Dieser Amortisierungszeitraum ist in Abbildung 16 dargestellt. Die durchgängige Linie zeigt die Werte für das durchschnittliche Szenario (konventioneller Belag der Klasse AC/TA wird durch einen LAB der Klasse LAB 4er ersetzt), hier kann z.B. bei 7000 Befahrungen pro Tag mit einem Amortisierungszeitraum von 5 Jahren gerechnet werden. Die gepunktete Linie zeigt die Werte für das potenzielle Szenario (Belag vom Typ ACMR 11 wird durch einen Belag vom Typ LAB4 Firmenlösung 1 ersetzt), hier reichen bereits 3500 Befahrungen für eine Amortisierung der Anlagenemissionen durch Rollwiderstandseinsparungen nach 5 Jahren. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die angenommene Lebenszeit der LAB von 12 Jahren. Ab dem jeweiligen DTV Wert des Schnittpunkts mit den Amortisierungskurven kann eine Netto-Energieeinsparung angenommen werden, da hier der Amortisierungszeitraum kürzer als die Lebensdauer ist und somit auch über das «Abschreiben» der Anlagenemissionen hinaus weiterhin Emissionen eingespart werden können.

Es zeigt sich deutlich, dass bereits ab geringen Nutzungszahlen die erhöhten Anlagenemissionen LAB durch den reduzierten Rollwiderstand ausgleichen und somit eine echte Synergie aus Lärm- und Klimaschutz besteht. Kann die anlagenseitige Emission weiter gesenkt werden – z.B. durch die Lebensdauerverlängerung dank systematischem Monitoring mit bedarfsweisem Verschleisschichtersatz – ergeben sich zudem deutlich kürzere Amortisierungszeiten.

Abschliessend muss zu dieser Abschätzung betont werden, dass die Resultate zur Energieeinsparung und besonders dem Amortisierungszeitraum mit grossen Unsicherheiten behaftet sind und nur als grobe Schätzwerte gelten können. Sämtliche Eingangswerte basieren auf gemittelten Messwerten, Schätzungen und verallgemeinerten Annahmen und decken somit keine Einzelfälle ab.

⁶ Annahme: die Deckschicht mit Dicke 3 cm wird in jedem Lebenszyklus erneuert, die Binderschicht mit Dicke 7 cm wird in jedem zweiten Lebenszyklus erneuert.

⁷ Volumen Asphalt pro Streckenkilometer $V = 1000 \text{ m} \cdot 3.5 \text{ m} \cdot 6.5 \text{ cm} = 227.5 \text{ m}^3$
Masse Asphalt pro Streckenkilometer $M = V \cdot 2.4 \text{ t/m}^3 = 546 \text{ t}$
Emission CO₂ Äquivalent pro Streckenkilometer $= M \cdot 48 \text{ kg CO}_2\text{eq./t} = 26.2 \text{ t CO}_2\text{eq.}$

31. März 2021

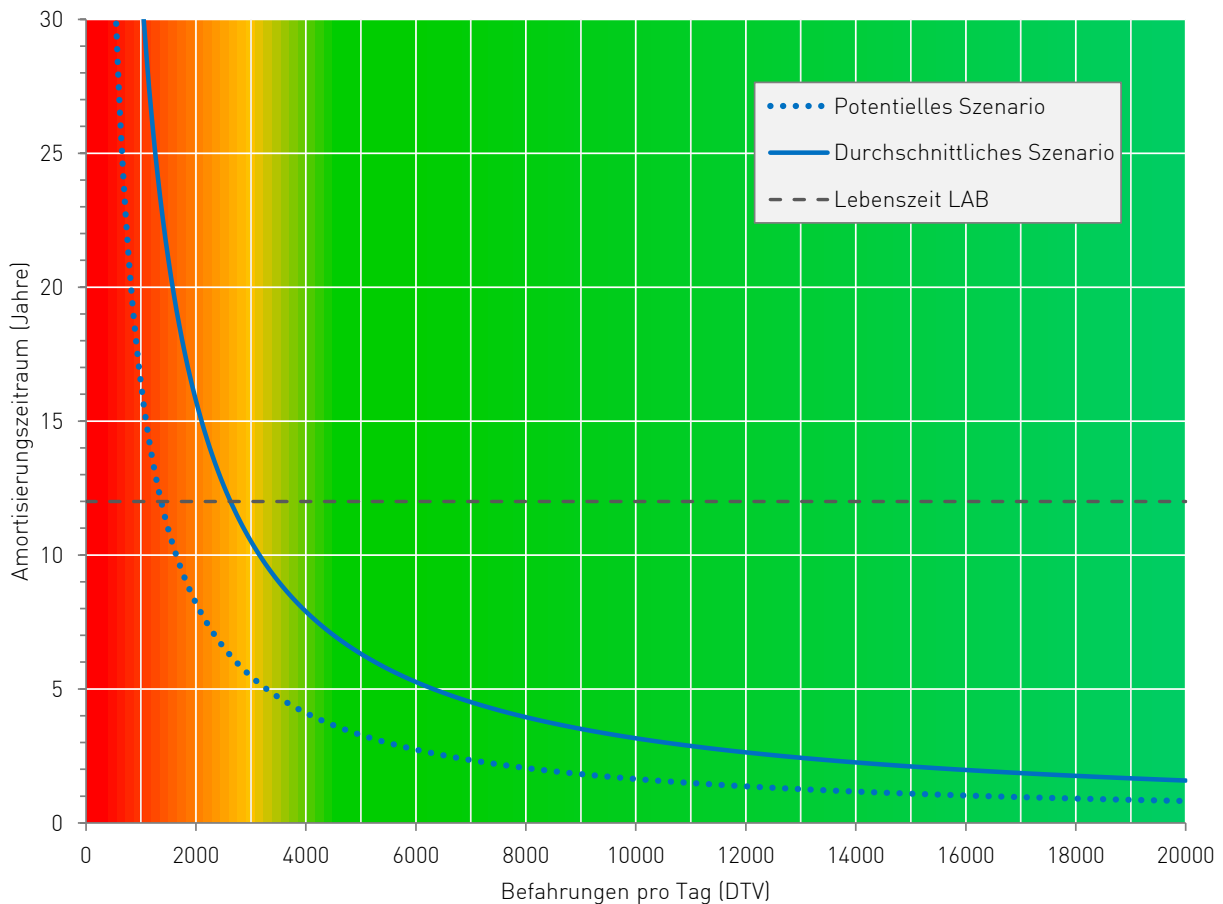


Abbildung 16: Amortisierungszeitraum in Abhängigkeit der Befahrungen pro Tag für das durchschnittliche Szenario (durchgängige Linie) und das potenzielle Szenario (gepunktete Linie). Die gestrichelte Linie kennzeichnet die angenommene Lebenszeit der LAB von 12 Jahren, der Hintergrund ist symbolisch für die Netto-Energieeinsparung eingefärbt.

Rechenbeispiel schweizweiter Belagsersatz zum Lärmschutz Innerorts

Als Rechenbeispiel wurde anhand des Belagsdatensatzes sonBASE, in dem schweizweite Angaben zu Strassentyp, DTV und Abschnittlänge enthalten sind, folgende Abschätzung gemacht:

Bezogen auf alle innerorts Strassen mit einem DTV Wert von mehr als 3'000 Fahrzeugen pro Tag - wie gross wäre die Emissionseinsparung bei einem totalen Belagsersatz im durchschnittlichen Szenario (Annahme: alle Strassen haben einen Belag vom Typ AC/TA und werden durch einen LAB der Klasse LAB 4er ersetzt)?

- Das betroffene Streckennetz erstreckt sich auf knapp 3'700 km, somit würden erhöhte Anlageemissionen von 4'200 t CO₂ Äquivalent pro Jahr resultieren.
- Bei einem durchschnittlichen DTV Wert von über 8'200 Fahrzeugen pro Tag (was gesamt über 30 Millionen Fahrzeugkilometern pro Tag entspricht) auf diesen Strecken könnten durch reduzierten Rollwiderstand im durchschnittlichen Szenario rund 26'800 t CO₂ Äquivalent pro Jahr eingespart werden.

Die somit erzielte Netto-Emissionseinsparung von 22'600 t CO₂ Äquivalent pro Jahr entspricht einem Anteil von 1.5 % der gesamten Nutzungsemissionen allein auf diesen lärmbeeinträchtigten innerorts Strecken.

Diese Betrachtung bezieht sich hierbei rein auf lärmarme Beläge innerorts. Generell liegt zudem ein grosses Potential in der Rollwiderstandsoptimierung zur Emissionseinsparung, besonders auch bei konventionellen Belägen. Das hiervon betroffene Strassennetz (z.B. Nationalstrassen) verspricht grosse Einsparmöglichkeiten, da es intensiv genutzt wird (DTV), viele Streckenkilometer umfasst und konventionelle Beläge eine lange Nutzungsdauer aufweisen. Bezüglich den Rollwiderstandswerten konventioneller Beläge besteht daher im Weiteren Forschungsbedarf.

7. Diskussion

7.1 Rollwiderstand

Die hier dargestellten Auswertungen und Modellierungen erfolgten jeweils für Belagsmittelwerte. Der Grund für die Betrachtung der Mittelwerte liegt in der relativ hohen Streuung der Rollwiderstandsmessdaten. Der Ansatz dieser Mittelwertbetrachtung scheint valide, da einerseits der Betreiber der Rollwiderstandsmessung dazu rät, die Messwerte über eine grössere Strecke zu mitteln, und sich andererseits in der Literatur ebenfalls ausschliesslich Betrachtungen zu Streckenmittelwerten finden [15]. Daher muss jedoch beachtet werden, dass alle gezogenen Schlussfolgerungen nur allgemein gültig sind und keine Prognosen über einzelne Belagsabschnitte erlauben, diese müssten individuell beurteilt werden.

Ein Mittel zur Reduktion der Streuung der Ausgangsdaten war die Anwendung von strikten Filtern, wie im Kapitel 4.2 beschrieben. Dies konnte die Streuung reduzieren und Ausreisser entfernen. Dennoch verbleibt im Datensatz eine hohe Streuung und Fehlzusweisungen von Belagstypen zu Belagsabschnitten können nicht ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 3.3), was vereinzelt zu fehlerhaft zugewiesenen Messwerten führen könnte.

In der Literatur finden sich einige länderspezifische Untersuchungen zu Rollwiderstandsmessungen unterschiedlicher Belagstypen. Diese Studien beschreiben dabei häufig den positiv korrelierten Zusammenhang zwischen der MPD und den Rollwiderstandskoeffizienten. Bei den unterschiedlichen betrachteten Studien konnten allerdings grosse Unterschiede im Zusammenhang zwischen MPD und Rollwiderstandskoeffizienten beobachtet werden. So reichen die Bestimmtheitsmasse des linearen Regressionsmodells von 0.65 [15] bis zu 0.9 [16]. Ebenso resultieren unterschiedlichste Steigungen der Regressionsmodelle zwischen den verschiedenen Studien. Der Grund, dass der Korrelationskoeffizient in der hier präsentierten Studie bei tiefen 0.4 liegt, dürfte mit der Auswahl der Strecken in Verbindung gebracht werden. Die MPD der ausgewählten Strecken in der hier präsentierten Studie liegen allesamt sehr nahe beieinander, was die Modellierung mittels linearem Regressionsmodell deutlich erschwert.

Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass die Modellierung des Rollwiderstands mit dem CPX-Wert (CPX-car) positiv korreliert ist und somit LAB grundsätzlich auch in Bezug auf den Rollwiderstand positive Eigenschaften aufweisen.

7.2 Emissionsbetrachtung

Die Abschätzung der Emissionen basiert auf einer Vielzahl von Annahmen und Mittelwertbetrachtungen und kann nicht stark verallgemeinert werden. So wurde beispielsweise die Rollwiderstandsreduktion nur für den SRTT-Pneu (PW-Pneu) gemessen. Der Einfluss des Rollwiderstandes von LAB auf die Lastwagenbereifung wurde in diesem Projekt nicht untersucht und stellt somit weiteren Forschungsbedarf dar. Ebenso beziehen sich die Messungen rein für die innerorts geltende Geschwindigkeit von 50 km/h und eine konstante Fahrweise. Untersuchungen bei anderen Geschwindigkeiten und deren Einfluss auf die Rollwiderstandskoeffizienten wurden ebenfalls nicht in die Betrachtung einbezogen. Weiter beziehen sich, methodisch bedingt, die Werte des Rollwiderstands auf die Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h, während die Verbrauchs- und Reduktionsabschätzungen anhand von Ergebnissen

gemacht wurden, welche auf Fahrzeug-Testverfahren mit abweichenden Geschwindigkeitsprofilen basieren.

Bei der Amortisationsberechnung wurde grundsätzlich mit konservativen Werten gerechnet. So wurde beispielsweise der Anteil des Rollwiderstands am Gesamtenergieverbrauch auf nur 15% gesetzt, wodurch sich die Effektivität der Einsparung auf lärmarmen Belägen reduziert. Weiter stellt die Emissionsgrundlage von 137 g CO₂/km (Durchschnittswert der 2018 in der Schweiz neu zugelassenen PW) ebenfalls eine konservative Annahme dar, da der effektive Flottendurchschnitt höher liegt und somit höhere absolute Einsparungen erzielt werden könnten. Es ist weiter davon auszugehen, dass sich der Amortisierungszeitraum noch weiter verkürzen dürfte, sofern LKWs mit in die Emissionsbetrachtung einbezogen würden, da die absolute Verbrauchsreduktion von LKW im Vergleich zu PKW höher sein dürfte.

31. März 2021

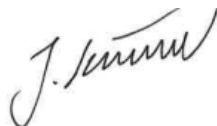
8. Schlussfolgerung und Ausblick

- Es wurden 140 km Strassen mit 16 verschiedenen Belagstypen verschiedenen Alters untersucht.
- Die Rollwiderstandsmessungen zeigten auf, dass LAB im Vergleich zu konventionellen Belägen tiefere Rollwiderstände haben.
- Eine Korrelation von mittlerer Profiltiefe (Textur) und Rollwiderstand war kaum nachweisbar.
- Der Zusammenhang der CPX-Messungen (Akustik) mit den Rollwiderstandsmessungen zeigte eine deutliche, positive Korrelation: Beläge mit guter akustischer Minderungswirkung haben einen geringen Rollwiderstand. Dies besonders im tiefen und mittleren Frequenzbereich der Reifen-Fahrbahn Geräusche.
- Alter und Zustand des Belags hatten in den untersuchten Belagsabschnitten keinen systematischen Einfluss auf den Rollwiderstand.
- Es besteht weiterer Forschungsbedarf um passende Indikatoren (z.B. andere Texturwellenlänge) zu identifizieren, damit künftig erleichterte, indirekte Rollwiderstandsschätzungen möglich sind.
- LAB verringern durch den reduzierten Rollwiderstand den Verbrauch von Energie und damit von CO₂-Emissionen durch die Fahrzeuge (Nutzungsemissionen).
- LAB benötigen im Vergleich zu konventionellen Belägen einen höheren Energieeinsatz beim Unterhalt der Strassenanlage (Anlageemissionen), weil sie häufiger ersetzt werden müssen als konventionelle Beläge. Eine Abschätzung zeigt, dass in Abhängigkeit von der Verkehrsmenge, die anlagenseitigen Emissionen bereits nach wenigen Jahren durch die Einsparungen bei den Nutzungsemissionen kompensiert werden und mit LAB über deren Lebensdauer CO₂-Emissionen eingespart werden.
- In den Bestrebungen zur Reduktion der Treibhausgase, sollten auch Einsparungen von CO₂ Emissionen durch rollwiderstandsarme Strasseninfrastrukturen gefördert werden. Dies hätte direkte positive Synergien mit dem Schutz der Bevölkerung vor Lärm. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um das grosse Potential der Rollwiderstandsoptimierung konventioneller Beläge nutzen zu können.
- In Bezug auf die Bewältigung der klimabedingten Erwärmung der Städte könnten bei der Strasseninfrastruktur weitere Parameter, wie z.B. der Wärmeinsel-Effekt bzw. das Potential kühlender Beläge betrachtet werden.

Grolimund + Partner AG



Felix Schlatter



Johannes Schindler



Erik Bühlmann

Anhang

I Quellenverzeichnis

- [1] A. Kemmler and T. Spillmann, "Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2018 nach Verwendungszwecken" 2019.
- [2] J. Ejsmont *et al.*, "Comparison between trailer measurements and alternative on- road test methods" 2015.
- [3] B. Świczko-Żurek *et al.*, "Rolling Resistance And Tire/Road Noise On Rubberized Asphalt Pavement In Poland" *Road Materials and Pavements Design*, 2015.
- [4] G. M. Rowe *et al.*, "NJTxtr - A computer program based on LASER to monitor asphalt segregation" *Journal of Construction Engineering and Management*, 2004.
- [5] U. Sandberg and J. A. Ejsmont, *Tyre/road noise reference book*, 2002.
- [6] E. Bühlmann and T. Ziegler, "Temperature effects on tyre/road noise measurements" *Inter-noise*, 2011.
- [7] J. Kühlwein, "Driving resistances of light-duty vehicles in europe: present situation, trends, and scenarios for 2025" 2016.
- [8] J. C. Páscoa *et al.*, "An innovative experimental on-road testing method and its demonstration on a prototype vehicle" *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012.
- [9] J. A. Ejsmont *et al.*, "Rolling Resistance Measurements at the MnROAD Facility, Round 2" 2014.
- [10] J. Liechti *et al.*, "Forschungspaket PLANET EP-2: Ökobilanz von Niedertemperaturasphalten" 2016.
- [11] E. Bühlmann, "Leise Strassenbeläge als effektive Lärmschutzmassnahme" *Strassenverkehr / Circulation Routière*, vol. 3, 2018.
- [12] T. Pohl and S. Kytzia, "Ökobilanz der Herstellung von Asphaltbelägen" *Strasse und Autobahn*, 2018.
- [13] J. A. Ejsmont *et al.*, "Influence of temperature on the tyre rolling resistance" *International Journal of Automotive Technology*, 2018.
- [14] Bundesamt für Energie BFE, "Energieverbrauch und Energieeffizienz der neuen Personenwagen und leichten Nutzfahrzeuge 2018" 2019.
- [15] J. Hoogwerff *et al.*, "Influence of road surface type on rolling resistance" 2013.
- [16] B. Ulf Sandberg *et al.*, "Models for rolling resistance in road infrastructure asset management systems" *MIRIAM*, 2011.

31. März 2021

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Chancen und Limitierungen verschiedener Ansatzpunkte zur Emissionsreduktion im Strassenverkehr.....	8
Abbildung 2: Schema akustischer Alterung von Standardbelägen, lärmarmen Belägen und hochwirksamen lärmarmen Belägen und die entsprechende Wirkung im Masse des Verkehrsaufkommens.	9
Abbildung 3: Schema und Foto des R^2 Mk.2 Messanhängers der TUG, übersetzt von [3].....	10
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Berechnung der MPD, übersetzt von [4].....	11
Abbildung 5: Texturwellenlängen-Bereiche eines Strassenbelags und deren Auswirkungen auf Fahrkomfort, Rollwiderstand, Reibung, Akustik und Reifenverschleiss. Übersetzt von [5].....	11
Abbildung 6: Schematische Übersicht und Foto des CPX-Messsystems.	12
Abbildung 7: Am bewegten Fahrzeug wirkende Widerstandskräfte, übersetzt von [7].	13
Abbildung 8: Phasen, Prozesse, Verbräuche und Emissionen in der LCA von Strassenbelägen [10]. .	14
Abbildung 9: Kartenausschnitte der Messstrecken am Murtensee (Kt. FR, links) und am Hallwilersee (Kt. AG, rechts).	16
Abbildung 10: Verteilungen der Rollwiderstandskoeffizienten verschiedener Belagstypen in der Schweiz.	19
Abbildung 11: Verteilungen der Rollwiderstandskoeffizienten über verschiedene Belagstypgruppen in der Schweiz.	20
Abbildung 12: Korrelation der MPD und dem Rollwiderstandskoeffizienten.	21
Abbildung 13: Korrelation zwischen CPX Wert und dem Rollwiderstandskoeffizienten.	22
Abbildung 14: Korrelationskoeffizient des linearen Regressionsmodells zwischen dem Rollwiderstandskoeffizient und den spektralen CPX-Pegeln.	23
Abbildung 15: Zusammenhang zwischen Rollwiderstandskoeffizienten und Deckschichtalter nach Belagstypgruppen.	24
Abbildung 16: Amortisierungszeitraum in Abhängigkeit der Befahrungen pro Tag für das durchschnittliche Szenario (durchgängige Linie) und das potenzielle Szenario (gepunktete Linie) ..	27
Abbildung 17: Messstrecke am Murtensee, Kanton Fribourg.....	35
Abbildung 18: Messstrecke am Hallwilersee, Kanton Aargau	36

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Länge der vermessenen Belagstypen nach Belagstypgruppe	17
---	----

IV Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>Betonasphalt</i>
ACMR	<i>Rauhasphalt</i>
CPX	<i>close proximity</i>
DSAK	<i>Dünne Asphaltsschicht in Kaltbauweise</i>
DTV	<i>Durchschnittlicher Tagesverkehr</i>
LAB	<i>Lärmarmes Belag</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
MPD	<i>Mittlere Profiltiefe (von engl. mean profile depth)</i>
OB	<i>Oberflächenbehandlung</i>
SDA	<i>Semidichter Asphalt</i>
SMA	<i>Splitmastixasphalt</i>
SRTT	<i>Standard-Reference-Test-Tyre</i>
TA	<i>Teerasphalt</i>
TUG	<i>Technische Universität Gdansk</i>
WLTP	<i>Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure</i>

31. März 2021

V Kartenausschnitte der Messstrecken

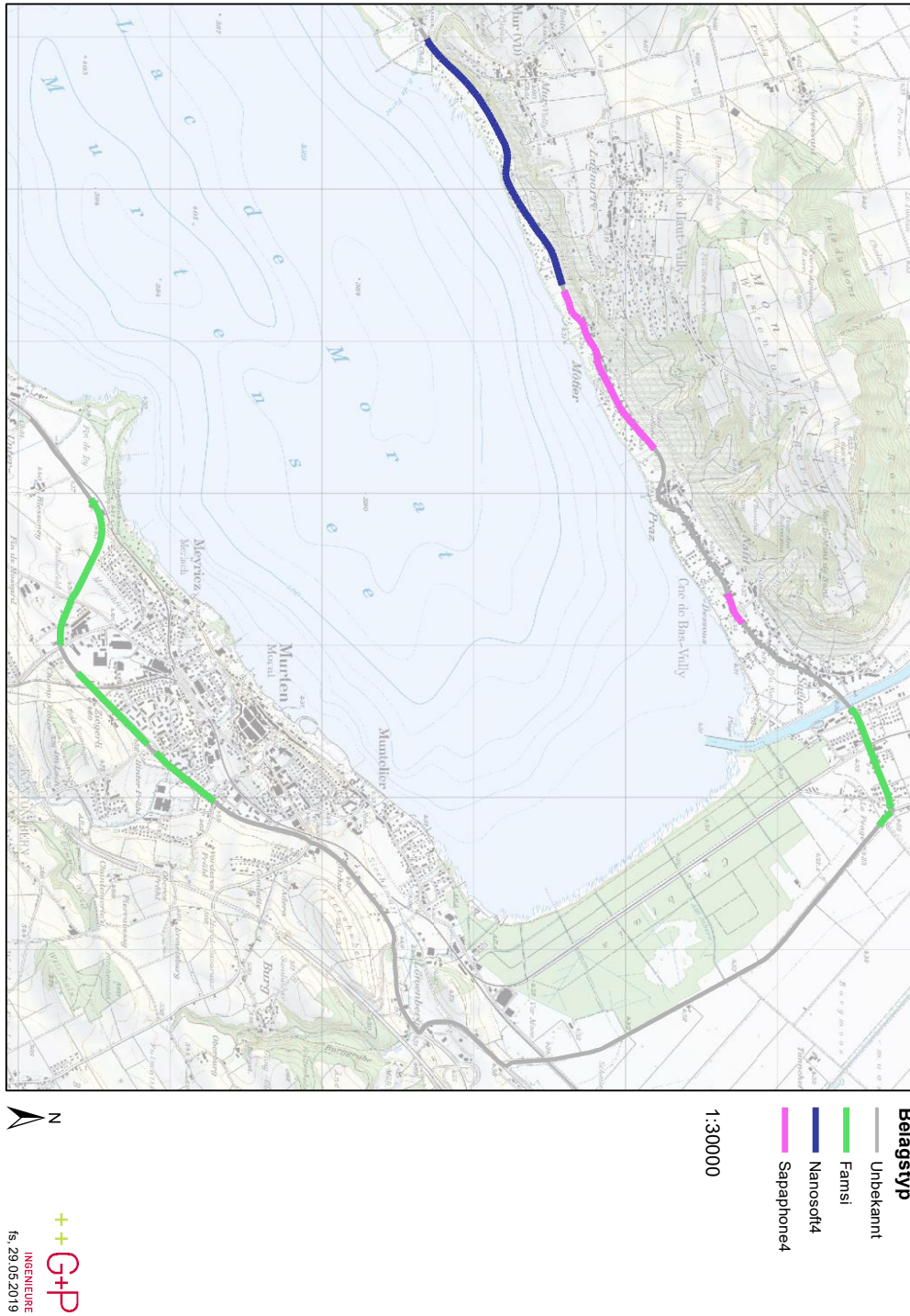
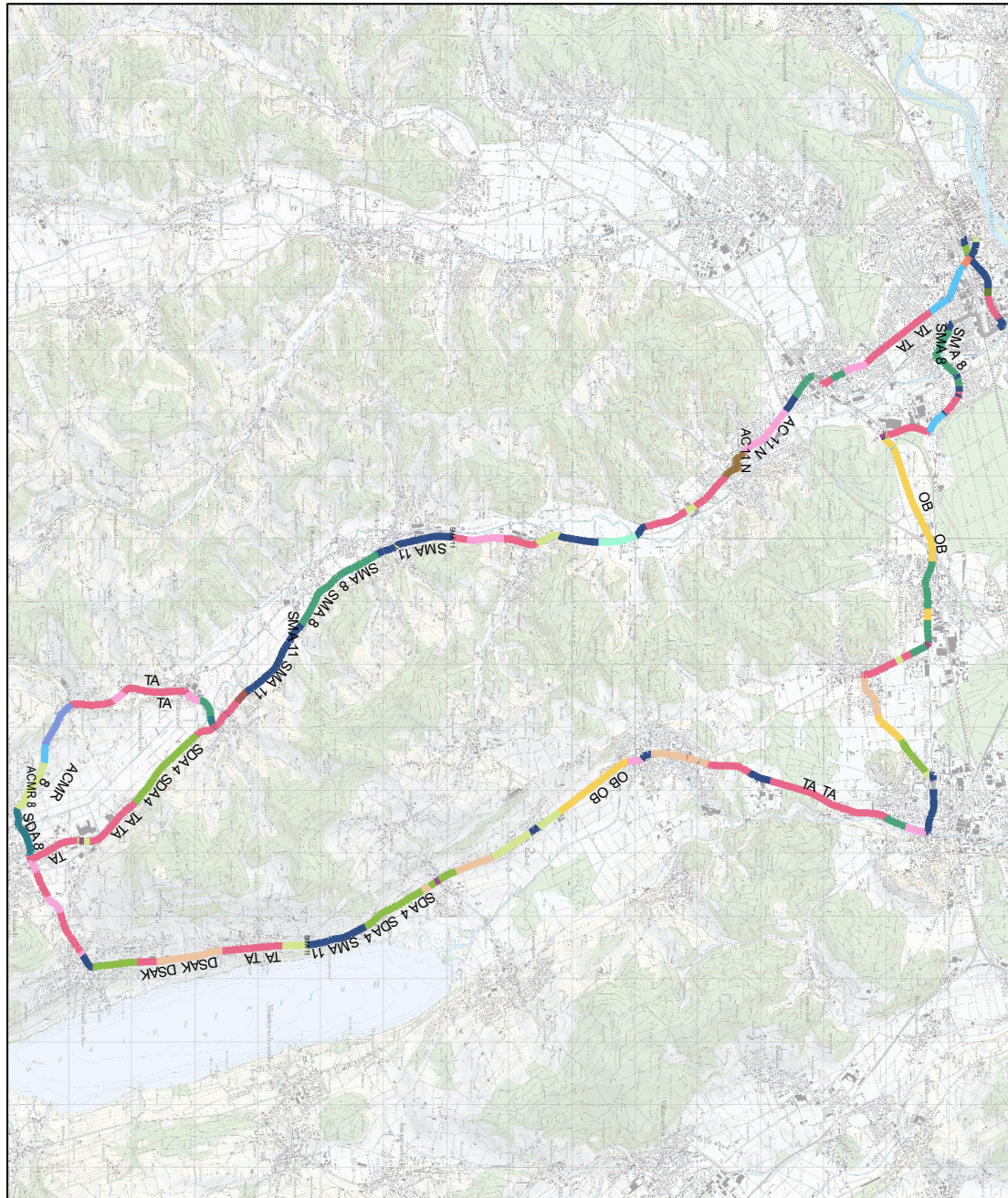


Abbildung 17: Messstrecke am Murtensee, Kanton Fribourg

31. März 2021



1:80000

- Belagstyp**
- AC 11 N
 - AC 11 S
 - AC 16 S
 - AC 8 N
 - AC T 32 S
 - ACMR 11
 - ACMR 8
 - Betonfahrbahn
 - DSAK
 - MA
 - OB
 - SDA 4
 - SDA 8
 - SDA 11
 - SMA 11
 - SMA 6
 - SMA 8
 - TA
 - Unbekannt

Abbildung 18: Messstrecke am Hallwilersee, Kanton Aargau

31. März 2021

VI Multivariates Modell

Modellierung Rollwiderstand als Funktion des CPX-Pegels, Belagsalter und MPD

Multivariates Modell der Form $RR_coefT25 \sim CPXcarsTK + BLGALTER + MPD$.

OLS Regression Results						
Dep. Variable:	RRcoef_T25	R-squared:	0.448			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.421			
Method:	Least Squares	F-statistic:	16.76			
Date:	Mon, 17 Feb 2020	Prob (F-statistic):	4.38e-08			
Time:	08:49:11	Log-Likelihood:	409.79			
No. Observations:	66	AIC:	-811.6			
Df Residuals:	62	BIC:	-802.8			
Df Model:	3					
Covariance Type:	nonrobust					
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	-0.0040	0.004	-1.046	0.300	-0.012	0.004
CPXCARSTK	0.0001	4.44e-05	3.018	0.004	4.53e-05	0.000
MPD	0.0010	0.000	2.618	0.011	0.000	0.002
BLGALTER	1.867e-05	6.33e-06	2.948	0.005	6.01e-06	3.13e-05
Omnibus:	2.230	Durbin-Watson:	1.566			
Prob(Omnibus):	0.328	Jarque-Bera (JB):	1.496			
Skew:	-0.198	Prob(JB):	0.473			
Kurtosis:	3.622	Cond. No.	5.69e+03			

31. März 2021

Modellierung Rollwiderstand als Funktion des CPX-Pegels bei 1kHz, Belagsalter und MPD

Multivariates Modell der Form RR_coefT25 ~ CPXcar1000TK + BLGALTER + MPD.

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	RRcoef_T25	R-squared:	0.477			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.452			
Method:	Least Squares	F-statistic:	18.85			
Date:	Mon, 17 Feb 2020	Prob (F-statistic):	8.39e-09			
Time:	08:39:00	Log-Likelihood:	411.58			
No. Observations:	66	AIC:	-815.2			
Df Residuals:	62	BIC:	-806.4			
Df Model:	3					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

Intercept	-0.0013	0.002	-0.545	0.588	-0.006	0.004
CPXcar1000	0.0001	3.17e-05	3.615	0.001	5.12e-05	0.000
MPD	0.0009	0.000	2.605	0.011	0.000	0.002
BLGALTER	1.5e-05	6.47e-06	2.319	0.024	2.07e-06	2.79e-05
=====						
Omnibus:		3.746	Durbin-Watson:	1.586		
Prob(Omnibus):		0.154	Jarque-Bera (JB):	3.304		
Skew:		-0.261	Prob(JB):	0.192		
Kurtosis:		3.964	Cond. No.	3.49e+03		
=====						

31. März 2021

Modellierung Rollwiderstand als Funktion des CPX-Pegels bei 315 Hz und 1 kHz

Multivariates Modell der Form RR_coefT25 ~ CPXcar315TK + CPXcar1000TK.

OLS Regression Results						
=====						
Dep. Variable:	RRcoef_T25	R-squared:	0.395			
Model:	OLS	Adj. R-squared:	0.377			
Method:	Least Squares	F-statistic:	22.17			
Date:	Mon, 17 Feb 2020	Prob (F-statistic):	3.87e-08			
Time:	08:56:48	Log-Likelihood:	436.16			
No. Observations:	71	AIC:	-866.3			
Df Residuals:	68	BIC:	-859.5			
Df Model:	2					
Covariance Type:	nonrobust					
=====						
	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]

Intercept	-0.0051	0.002	-2.286	0.025	-0.009	-0.001
CPXcar1000	9.944e-05	3.61e-05	2.753	0.008	2.74e-05	0.000
CPXcar315T	9.023e-05	3.57e-05	2.528	0.014	1.9e-05	0.000
=====						
Omnibus:	3.337	Durbin-Watson:	1.652			
Prob(Omnibus):	0.188	Jarque-Bera (JB):	2.830			
Skew:	-0.235	Prob(JB):	0.243			
Kurtosis:	3.858	Cond. No.	3.74e+03			
=====						

VII Beilage Datengrundlage

In der beigelegten csv Datei «Datengrundlage Rollwiderstand auf LAB.csv» sind die gemäss Kapitel 3 gemessenen und Kapitel 4 aufbereiteten Daten zusammengefasst. Die Datei enthält die auf 20 m lange Belagsabschnitte aggregierten Werte für:

- Belagstyp (Spalte «BELAGTYP»)
- Rollwiderstandskoeffizienten (Spalte «CR_TK», dimensionslos)
- Mittlere Profiltiefe (Spalte «MPD», Einheit: mm)
- Belagsalter (Spalte «BLGALTER», Einheit: Jahre)
- Schalldruckpegel von CPX Messung mit SRRT-Reifen (Standard Reifen entsprechend PW Pneu) (Spalte «CPXCARS_TK», Einheit: dB(A))