

Einfluss von Reifen- und Betriebsparametern auf das Reifen-/Fahrbahngeräusch unter Drehmoment

Carsten Hoever¹, Achillefs Tsotras¹, Marie-Agnès Pallas², Julien Cesbron³

¹ Continental Reifen Deutschland GmbH, Jädekamp 30, 30419 Hannover, E-Mail: carsten.hoever@conti.de

² UMRAE, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, CEREMA, Univ. Lyon, F-69675 Lyon, Frankreich

³ UMRAE, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, CEREMA, F-44344 Bouguenais, Frankreich

Einleitung

Übermäßiger Straßenverkehrslärm hat einen negativen Einfluss auf die menschliche Gesundheit in vielen Teilen Europas, vor allem in Städten [1,2]. Die Einführung von Elektromobilität wird in diesem Zusammenhang oftmals als eine der besten Lösungen angesehen, die Lärmbelastung in urbanen Gebieten zu reduzieren. Für das Verkehrsgeschwindigkeitsgeräusch von Elektrofahrzeugen (EV) ergibt sich dabei im Vergleich zu klassischen Verbrennerfahrzeugen aufgrund der deutlichen Reduzierung des maskierenden Antriebsstranggeräusches eine erhöhte Bedeutung des Reifen-/Fahrbahngeräusches. Dieser Effekt wird unter Drehmoment, vor allem unter Beschleunigung verstärkt [3]. Beim normalen Bremsen und der Rekuperation hingegen werden nur geringfügige Änderungen beobachtet [4].

Zum einen ist für die Pegelzunahme unter Beschleunigung bekannt, dass das Reifen-/Fahrbahngeräusch mit Drehmoment oftmals höher als im Zustand des freien Rollens ist. Dies kann mit *stick-slip* und *snap-out* Mechanismen erklärt werden, die unter Drehmoment zusätzlich zum radialen Blockaufprall als reifenseitige Rollgeräuschregung vorliegen [5].

Zum anderen fehlt bei EVs insbesondere in genau denjenigen Fahrzuständen, in denen es zu einem erhöhten Reifendrehmoment kommt, die Maskierung durch den Antriebsstrang, der bei klassischen Verbrennerfahrzeugen fast immer mit diesen Situationen einhergeht [4].

Im Rahmen des LIFE E-VIA-Projektes [6] soll der Straßenverkehrslärm in urbanen Umgebungen durch für EVs optimierte Straßenbeläge und Reifen reduziert werden. Aufgrund der angesprochenen Effekte muss dabei für eine wirksame Lärmreduzierung neben der Konstantfahrt auch beschleunigtes Fahren berücksichtigt werden. Daher wurde im E-VIA Projekt mittels Messungen am Rollenprüfstand und auf einer Teststrecke untersucht, welchen Einfluss unterschiedliche Reifen- und Betriebsparameter auf die Veränderung des Reifen-/Fahrbahngeräusches unter Drehmoment im Vergleich zur Konstantfahrt haben.

Vorbeifahrtpegel unter Beschleunigung

Vorbeifahrtpegelmessungen wurden in Anlehnung an UNECE Regelung 51 [7] durchgeführt. Unabhängig von der Art der Vorbeifahrt (ohne/mit Beschleunigung) werden nur Messungen ausgewertet, bei denen das Testfahrzeug auf Mikrofonhöhe eine Geschwindigkeit von $50 \text{ km/h} \pm 1 \text{ km/h}$ aufweist. Für Konstantfahrt (im Folgenden auch *CRS* - *constant rolling speed*) ist der während der Vorbeifahrt

gemessene Maximalpegel $L_{max,CRS}$ ausschlaggebend. Beschleunigte Vorbeifahrten werden für eine Reihe von Beschleunigungen a von etwa 1 m/s^2 bis 3 m/s^2 durchgeführt. Auf Basis einer polynomischen Interpolation wird aus den Maximalpegeln der einzelnen beschleunigten Vorbeifahrten der Beschleunigungspegel für eine Referenzbeschleunigung von 2 m/s^2 , $L_{max}(a = 2 \text{ m/s}^2)$, berechnet. Daraus ergibt sich wie in Abbildung 1 dargestellt die Pegelzunahme unter Beschleunigung als

$$\Delta L_{acc} = L_{max} \left(2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) - L_{max,CRS} \quad (1)$$

Solange nicht anders angegeben, wurden

1. alle Messungen mit elektrisch angetriebenen Testfahrzeugen durchgeführt, und
2. alle Vorbeifahrten die in einer gemeinsamen Auswertung zusammengefasst sind, jeweils mit demselben Testfahrzeug auf derselben Teststrecke unter vergleichbaren Bedingungen gemessen.

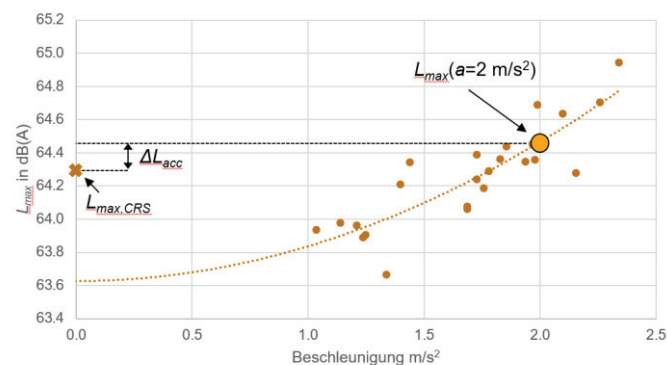


Abbildung 1: Beispiel für die Auswertung von beschleunigten Vorbeifahrten.

Änderung relativer Pegeldifferenzen unter Beschleunigung

In Abbildung 2 sind Ergebnisse von Vorbeifahrtmessungen für sechs verschiedene Sommerreifen zu sehen.

Es ist ersichtlich, dass es keine systematische Beziehung zwischen den Konstantfahrtpegeln und den Pegeln mit Beschleunigung gibt. So ist z.B. R1 der leiseste Reifen ohne Beschleunigung, gleichzeitig steigt der Pegel bei einer Beschleunigung von 2 m/s^2 jedoch um ca. 3 dB(A) an. Dies führt dazu, dass R1 unter diesen Bedingungen der zweitlauteste Reifen ist. Demgegenüber ist R6 zwar bei

Konstantfahrt der lauteste Reifen (ca. 2,5 dB(A) lauter als R1), jedoch nimmt der Pegel unter Beschleunigung sogar leicht ab, so dass R6 bei 2 m/s² nicht nur einer der zwei leisesten Reifen ist, sondern auch 1 dB(A) leiser als R1. Eine ähnlich geringe Pegelzunahme bei Beschleunigung lässt sich auch für R4 beobachten.

Für alle anderen Reifen liegt ΔL_{acc} im Bereich von etwa 1 dB(A) bis 2 dB(A). Insgesamt ergibt sich eine deutliche Änderung der relativen Differenzen zwischen den Reifen je nach Betriebsbedingung ohne/mit Beschleunigung.

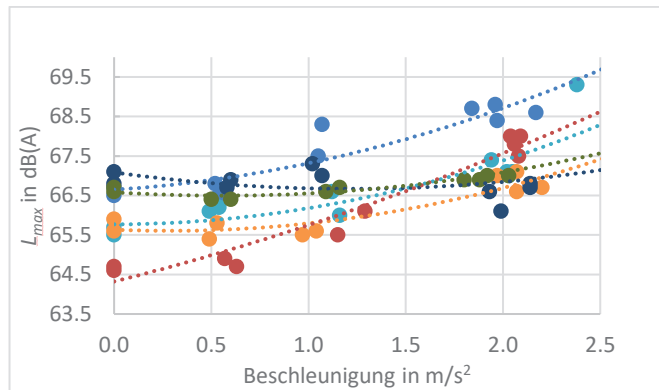


Abbildung 2: Vorbeifahrtmessungen ohne/mit Beschleunigung für sechs verschiedene Sommerreifen: R1, R2, R3, R4, R5, R6.

Einfluss der Lufttemperatur

In den durchgeführten Messungen wurde ein Einfluss der Lufttemperatur auf den Beschleunigungseffekt beobachtet. In Tabelle 1 und Abbildung 3 ist dazu ein Beispiel dargestellt, bei dem die Vorbeifahrtpegel von identischen Exemplaren eines Sommerreifens bei deutlich unterschiedlichen Lufttemperaturen von 34,9 °C (Messung 1) und 15,6 °C (Messung 2) gemessen wurden. Der Konstantfahrtpegel unterscheidet sich um lediglich 0,2 dB(A) zwischen beiden Messungen und liegt somit im Rahmen der Messungenauigkeit. Unter Beschleunigung ergibt sich jedoch für die Messung bei wärmerer Umgebungstemperatur eine Pegelzunahme von 1,2 dB(A), während sich bei der kälteren Messung keine nennenswerte Zunahme ergibt.

Tabelle 1: Beispiel für den Temperatureinfluss auf den Beschleunigungspegel

Messung	Temp. in °C	$L_{max,CRS}$ in dB(A)	$L_{max}(2m/s^2)$ in dB(A)	ΔL_{acc} in dB(A)
1	34,9	64,1	65,3	1,2
2	15,6	64,3	64,4	0,1

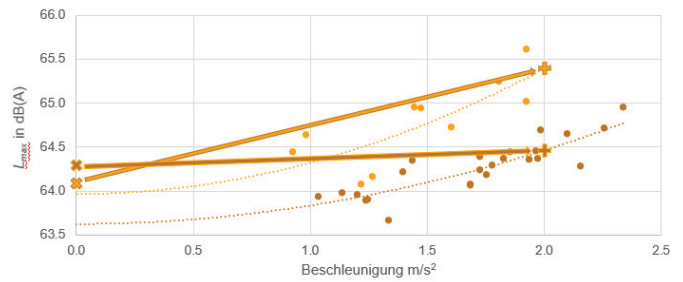


Abbildung 3: Temperatureinfluss auf den Beschleunigungspegel für 34,9 °C und 15,6 °C. x Konstantpegel, + $L_{max}(2m/s^2)$, ... Polynominterpolation.

Eine moderate Zunahme der Lufttemperatur um knapp 20 °C, die problemlos z.B. innerhalb eines sonnigen Testtages im Frühjahr oder Herbst erreicht werden kann, hat somit entscheidenden Einfluss darauf, ob und in welchem Ausmaß eine Beschleunigung zu einer Pegelzunahme führt. Für eine Vergleichbarkeit von beschleunigten Vorbeifahrtmessungen muss somit auf eine Vergleichbarkeit der Umgebungstemperaturen geachtet werden.

Weiterhin ist anmerkungswert, dass für Messung 2 bei einem Großteil der beschleunigten Vorbeifahrten mit Beschleunigungen $a < 2 m/s^2$ Pegel gemessen werden, die leiser als der Konstantfahrtpegel sind.

Einfluss des Testfahrzeuges

Abbildungen 4 und 5 geben einen Einblick in den möglichen Einfluss des Testfahrzeuges auf die Vorbeifahrtmessungen. Dafür wurden wiederum sechs verschiedene Sommerreifen auf derselben Teststrecke bei vergleichbaren Umgebungsbedingungen mit zwei verschiedenen Testfahrzeugen vermessen. Bei diesen handelt es sich um gleichartige Elektrofahrzeuge aus demselben Marktsegment von zwei unterschiedlichen Herstellern.

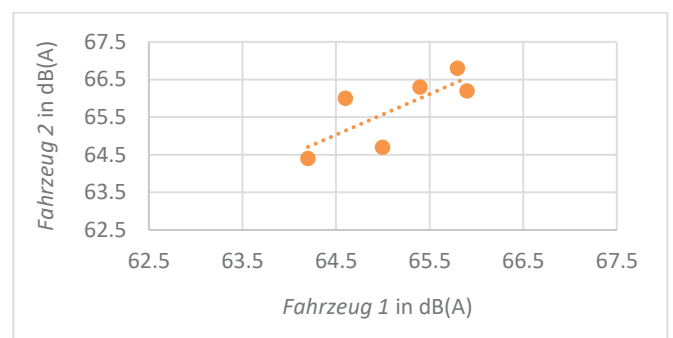


Abbildung 4: Konstantfahrt - $L_{max,CRS}$ in Abhängigkeit vom Testfahrzeug. ... Ausgleichsgerade.

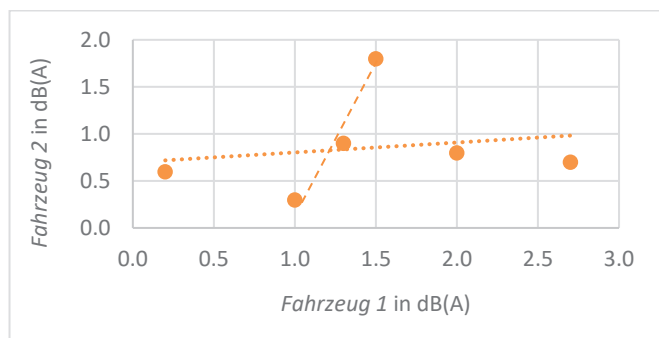


Abbildung 5: Beschleunigung: ΔL_{acc} in Abhängigkeit vom Testfahrzeug. ... Ausgleichsgeraden.

Abbildung 4 zeigt, dass es bei Konstantfahrt im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung zwischen den Messergebnissen der beiden Fahrzeuge gibt. Für die Zunahme des Vorbeifahrtpegels unter Beschleunigung ergibt sich, wie in Abbildung 5 dargestellt, eine deutlich schlechtere Übereinstimmung. Die Messpunkte sind annähernd kreuzförmig verteilt. Jeder „Kreuzarm“ kennzeichnet dabei einen Satz an Reifen, bei denen sich für das eine Testfahrzeug ein kleiner Wertebereich von etwa 0,5 dB(A), und für das andere Testfahrzeug ein großer Wertebereich von 1,5 dB(A) (vertikaler Arm) bzw. 2,5 dB(A) (horizontaler Arm) ergibt. Welches Testfahrzeug dabei zum großen und welches zum kleinen Wertebereich führt, variiert mit dem jeweiligen „Kreuzarm“.

Als Folge muss davon ausgegangen werden, dass eine Bewertung des beschleunigten Vorbeifahrtpegels nicht auf Basis des Reifens alleine geschehen kann, vielmehr muss das System Reifen/Fahrzeug betrachtet werden.

Einfluss der Straßenoberfläche

Im Rahmen des E-Via Projektes wurden zwei Prototypen eines geräuschoptimierten Straßenbelages auf der Teststrecke der Université Gustave Eiffel in Nantes, Frankreich, gebaut [4]. Es handelt sich dabei um Beläge vom Typ *very thin asphalt concrete* VTAC 0/6 in Varianten ohne (Belag P) bzw. mit Gummigranulat (Belag PCR). Die mittlere Profiltiefe MPD beträgt 0,39 mm (P) bzw. 0,30 mm (PCR). Die Absorption liegt unterhalb von 2 kHz bei etwa 0,1 oder weniger, wobei in den 1-kHz- und 1,25-kHz-Terzen die P-Oberfläche deutlich weniger Absorption aufweist als die PCR-Oberfläche. Zwischen 2 kHz und 4 kHz gilt umgekehrt, dass die P-Oberfläche mit Absorptionsgraden von 0,20 bis 0,25 eine höhere Absorption als die PCR-Oberfläche mit ca. 0,12 bis 0,18 erzielt.

Vermessen wurden sechs Prototypenreifen die als Technologiedemonstratoren konzipiert sind. Neben einem elektrischen Nissan Leaf wurde auch ein Renault Kadjar mit Verbrennungsmotor als Testfahrzeug eingesetzt.

Für die Konstantfahrt sind die Messergebnisse in Abbildung 6 dargestellt. Für den Renault Kadjar als Verbrennungsfahrzeug werden aufgrund des Antriebsstranggeräusches wie erwartet in allen Fällen höhere Pegel als für den elektrisch angetriebenen Nissan Leaf gemessen. Der Unterschied beträgt im Durchschnitt etwa 1,5 dB(A). Unabhängig von diesem Einfluss des Testfahrzeuges ist

auffällig, dass bis auf eine Ausnahme (Kadjar mit Reifen V5) die Vorbeifahrtpegel auf der Oberfläche PCR mit Gummigranulat um ca. 0,5 dB(A) bis 1,3 dB(A) leiser als sind, als die auf der Oberfläche P ohne Granulat.

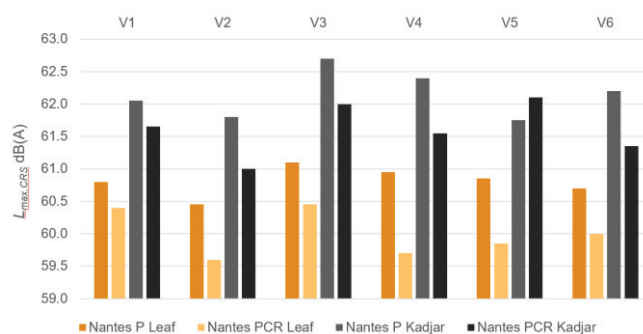


Abbildung 6: E-Via Messungen für Konstantfahrt mit Prototypenreifen (V1-V6) auf Prototypenbelägen (P/PCR - ohne/mit Gummigranulat)

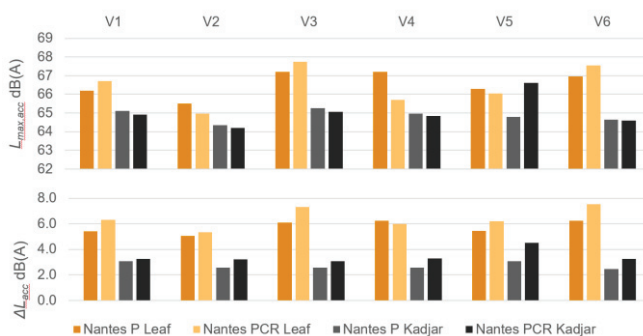


Abbildung 7: E-Via Messungen für volle Beschleunigung mit Prototypenreifen (V1-V6) auf Prototypenbelägen (P/PCR - ohne/mit Gummigranulat). Oben maximaler Vorbeifahrtpegel unter Beschleunigung, unten Pegelzunahme unter Beschleunigung.

Ein deutlich anderes Bild ergibt sich in Abbildung 7 für den Vorbeifahrtpegel unter voller Beschleunigung. In einem Drittel der Fälle stellt der PCR-Belag nun die lautere Oberfläche dar. Betrachtet man nur die Messungen mit dem Leaf, bei dem die Zunahme des Antriebsstranggeräusches im Gegensatz zum Kadjar unter Beschleunigung nicht nennenswert steigt, dann ist der PCR-Belag sogar in 50 % der Fälle der um etwa 0,5 dB(A) lautere Belag. Betrachtet man, ebenfalls in Abbildung 7 dargestellt, die Zunahme des Pegels unter Beschleunigung, d.h. ΔL_{acc} , so ergibt sich noch ein viel deutlicheres Ergebnis: Bis auf die Ausnahme Leaf mit Reifen V4 ist die Pegelzunahme für die PCR-Oberfläche mit Gummigranulat immer höher als für den P-Belag ohne Granulat.

Ähnlich wie für die in Abbildung 2 dargestellten Ergebnisse für unterschiedliche Sommerreifen gilt somit auch für die Straßenbeläge, dass die leiseste Oberfläche ohne Beschleunigung nicht notwendigerweise auch die leiseste Oberfläche mit Beschleunigung ist.

Einfluss des Reifenprofils



Abbildung 8: Referenz: Serienreifen

Auf Basis der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Messungen in Nantes im Rahmen des E-Via-Projektes kann auch der Einfluss des Reifenprofils auf den Beschleunigungseffekt untersucht werden. Dazu wurde als Referenz der in Abbildung 8 dargestellte Serienreifen ausgewählt. Auf dieser Basis wurden zwei Profilvarianten mit den in Tabelle 2 dargestellten Eigenschaften ausgewertet.

Tabelle 2: Profilvarianten

	Quotient Schubsteife/ radiale Steifigkeit
Profil 1	> Referenz
Profil 2	< Referenz

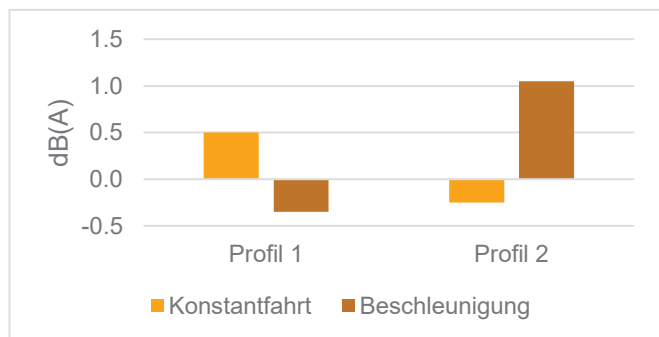


Abbildung 9: Schalldruckpegeldifferenzen Profil 1/2 zu Referenz. Mittelwert über Straßenoberflächen P/PCR und Testfahrzeuge Leaf/Kadjar.

Die gemittelten Schalldruckpegeldifferenzen zur Referenz für Konstantfahrt und unter Beschleunigung sind in Abbildung 9 dargestellt. Auch hier ergibt sich wieder die in den anderen behandelten Beispielen sichtbare Diskrepanz zwischen den Vorbeifahrtpegeln für Konstantfahrt und Beschleunigung: Profil 1 mit der höheren Schubsteife ist bei Konstantfahrt lauter als die Referenz, dies kehrt sich jedoch unter Beschleunigung um. Für Profil 2 gilt umgekehrt, dass dieses bei Konstantfahrt leiser als die Referenz, unter Beschleunigung jedoch lauter als diese ist.

Dies verdeutlicht, dass auch bei Maßnahmen am Reifen getrennt berücksichtigt werden muss, welchen Einfluss diese auf die jeweiligen Vorbeifahrtpegel ohne bzw. mit Beschleunigung haben.

Zusammenfassung

Aus den vorgestellten Ergebnissen lässt sich allgemein für den Fall der beschleunigten Vorbeifahrt Folgendes festhalten:

- Es ist nicht möglich, Reifen und Fahrzeug unabhängig voneinander zu betrachten. Vielmehr sind diese als ein zu vermessendes System anzusehen.
- Die Pegeländerung im Vergleich zur Konstantfahrt hängt im besonderen Maße von den Umweltbedingungen, vor allem der Umgebungstemperatur, und der Straßenoberfläche ab.

Im Hinblick auf die Entwicklung eines geräuschoptimierten Reifens für Elektrofahrzeuge im Rahmen des E-Via-Projektes bedeutet dies, dass das Zusammenspiel von Fahrzeug, Straßenoberfläche und Reifendesign ohne und mit Beschleunigung bei der Optimierung beachtet werden müssen. Nur dadurch kann gewährleistet werden, dass unter den vorausgesetzten urbanen Verkehrsbedingungen eine Reduzierung des Reifen-/Fahrbahngeräusches für Elektrofahrzeuge erzielt werden kann.

Danksagung

Die hier dargestellten Untersuchungen wurden finanziell unterstützt durch das LIFE Programm der Europäischen Union im Rahmen der Förderung LIFE18 ENV/IT/000201.

Literatur

- [1] Burden of disease from environmental noise – Quantification of healthy life years lost in Europe, World Health Organization, 2011
- [2] Kihlman *et al.*: Quieter Cities of the Future, International Institute of Noise Control Engineering, CAETS, 2014
- [3] Pallas *et al.*: Electric Vehicles and their Noise Emission, LIFE E-VIA Deliverable A1, 2020
- [4] Cesbron *et al.*: Tyre-pavement coupling study and prototype implementation, LIFE E-VIA Deliverable B2, 2022
- [5] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A.: Tyre/road noise reference book. Informex, Kisa, 2002
- [6] LIFE E-VIA Project Homepage, URL: <https://life-evia.eu/>
- [7] UNECE Regelung Nr. 51, Amtsblatt der Europäischen Union L 131/1 (2018)