

Vergleich der Vorbeifahrgeräuschmessung zwischen der realen und simulierten Vorbeifahrt auf dem IBP Prüfstand nach ISO/CD 362-3, Validierungsmethode A

Michael Krämer¹, Alexander Ickinger², Peter Brandstät³

¹ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, E-Mail: Michael.Kraemer@ibp.fraunhofer.de

² Hochschule für Technik, 70174 Stuttgart, E-Mail: Alickinger@gmx.de

³ Fraunhofer-Institut für Bauphysik, 70569 Stuttgart, E-Mail: Peter.Brandstaett@ibp.fraunhofer.de

Einleitung

Die Typprüfung von Kraftfahrzeugen nach dem EG-Typgenehmigungsverfahren zur Einhaltung gesetzlicher Geräuschpegelgrenzwerte bei Fahrzeugen wird unter definierten Bedingungen nach ISO 362-1 [1] durchgeführt. Diese reale Vorbeifahrt wird auf einer genormten Außengeräuschmessstrecke durchgeführt und ist in hohem Maße von den örtlichen Wetterbedingungen abhängig. Es liegt somit nahe, die reale Vorbeifahrt in einen Prüfstand mit der Möglichkeit einer simulierten Vorbeifahrt zu übertragen. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik betreibt seit 2008 einen Allrad-Rollenprüfstand in dem die simulierte Vorbeifahrt in einem akustischen Halbfreifeldraum durchgeführt werden kann [2, 3]. Die Vorteile des Messverfahrens sind die gleichbleibenden Messbedingungen und die Wetterunabhängigkeit. Durch die veränderte Aufstandsflächen der Reifen, die Oberfläche des Rollenbelags und des Hallenbodens, ergeben sich aber die wesentlichen akustischen Unterschiede zu einer realen Vorbeifahrt.

Derzeit wird an der Norm ISO/CD 362-3 [4] zur Messung der Vorbeifahrtpegel in Prüfhallen gearbeitet. Die Methode A beschreibt ein Verfahren als Kombination aus simulierter Vorbeifahrt (Antriebsstranggeräusch) und realer Vorbeifahrt (Reifenfahrbahngeräusch (RFG)). Mit einer Validierungsmethode kann die Genauigkeit der simulierten Vorbeifahrt im Prüfstand (indoor) mit der einer realen Vorbeifahrt (outdoor) auf einer Teststrecke überprüft werden. Eine solche Validierung wurde zwischen einer realen Teststrecke und dem Allrad-Rollenprüfstand am IBP durchgeführt.

Zur experimentellen Untersuchung [5] wurden vier Fahrzeuge verwendet, die sich in ihrem Antriebskonzept und der Leistungsklasse unterscheiden. Darunter sind zwei Fahrzeuge der Kompaktklasse, jeweils einmal mit Front- (VW Golf) und Heckantrieb (BMW 116D), ein Hybridfahrzeug mit Frontantrieb, das in der Vorbeifahrt rein elektrisch betrieben wird (Opel Ampera) und ein allradgetriebenes Sportfahrzeug (Porsche Carrera 911).

Reale Vorbeifahrt nach DIN ISO 362 – 1

Die Messungen des realen Vorbeifahrtpegels werden auf einem Prüfgelände durchgeführt, welches den Anforderungen der DIN ISO 10844 [6] entspricht. In Abbildung 1 ist der Aufbau und die Abmessung der Teststrecke abgebildet. Der Messbereich erstreckt sich von der Linie AA' zur Linie BB'. In der Mitte der Teststrecke, an der Linie P und P', ist jeweils ein Messmikrofon

positioniert, das den Vorbeifahrtpegel aufzeichnet. Der Messablauf besteht aus einer beschleunigten und einer konstanten Vorbeifahrt, wobei jeweils vier Durchläufe in jedem zu prüfendem Gang und für jede Fahrzeugseite gefahren werden. Es sind die ersten vier aufeinanderfolgenden Messergebnisse zu verwenden, die innerhalb von 2 dB übereinstimmen.

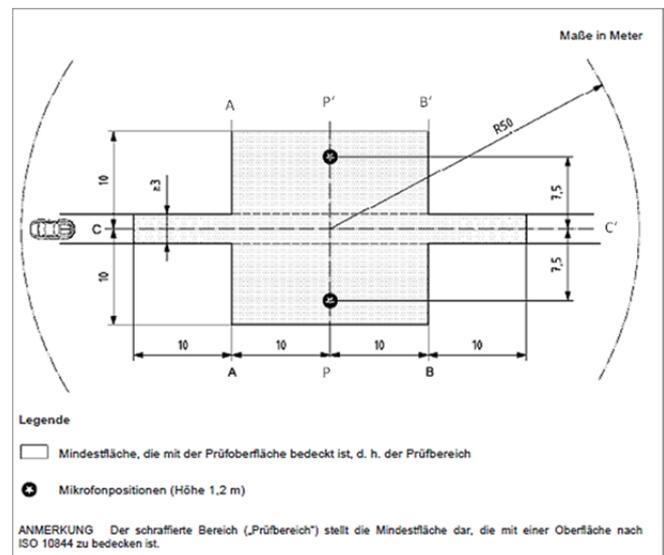


Abbildung 1: Abmessungen der Teststrecke zur Vorbeifahrtmessung nach ISO 362-1 [1].

Aus einem spezifischen Leistungsindex (PMR) wird eine für das jeweilige Fahrzeug angemessene mittlere Beschleunigung (a_{Urban}) abgeleitet und unter Berücksichtigung einer bestimmten Auswahl an Gängen, der Typprüfpegel L_{Urban} interpoliert. Nachdem die richtige Auswahl der Getriebeabstufungen erfolgt ist, muss die richtige Einfahrtsgeschwindigkeit an der Linie AA' für die beschleunigte Vorbeifahrt ermittelt werden. Es muss an dieser Linie so eingefahren werden, dass an der Linie PP' eine Geschwindigkeit von $50 \text{ km/h} \pm 1 \text{ km/h}$ erreicht wird.

Bei der Durchführung der Typprüfung ist das Gaspedal voll durchzutreten, wenn die Fahrzeugfront des Fahrzeuges die Linie AA' erreicht. Es wird solange Vollgas gegeben bis das Fahrzeugheck die Linie BB' erreicht hat.

Simulierte Vorbeifahrt nach ISO/CD 362 – 3

Der Vorbeifahrtpegel kann in einem Rollenprüfstand mit Vorbeifahrt-Messhalle und geeigneter Messtechnik simuliert werden. Das Fahrzeug wird hierfür in der Messhalle auf den

Prüfstandsrollen räumlich fixiert. Durch die Steuerungstechnik des Prüfstandes werden in einer sogenannten Fahrsimulation für das Fahrzeug ähnliche Fahrwiderstände eingestellt, wie auf einer realen Straße. Der simulierte Vorbeifahrtpegel wird mittels zweier linearer Mikrofonarrays aus einer mehrkanaligen Aufnahme am Computer berechnet, wobei ein Zeitsignal synthetisiert wird, welches mit dem einer klassischen Vorbeifahrtmessung nach ISO 362 übereinstimmt.

Grundlage für die Synthese ist eine realitätsgetreue Schallpegelmessung für die simulierte Vorbeifahrt, bei der das Schallfeld des Fahrzeugs durch eine Reihe von Mikrofonen abstandsgetreu und nahezu lückenlos erfasst wird. Diese Messmethode erfordert einen geringen Abstand der Mikrofone zueinander und eine entsprechend vielkanalige wie leistungsfähige Messtechnik zur zeitsynchronen Erfassung aller Signale. Die Vorbeifahrt wird simuliert, indem die Schalldruckpegel nacheinander von zwei benachbarten Mikrofonen verwendet werden. Positionen zwischen zwei benachbarten Mikrofonen werden gegebenenfalls interpoliert. Zusätzlich ist das dazu synchron aufgezeichnete Geschwindigkeitssignal aus der Rollen- oder Reifenumdrehung bereitzustellen, um eine eindeutige Korrelation zu den Mikrofonensignalen herstellen zu können.

ISO/CD 362 – 3, Variante A

Die Messung des Vorbeifahrtpegels nach Variante A beschreibt ein Verfahren bei dem der Geräuschanteil des Abgas- und Antriebsstrangs getrennt vom RFG der Vorbeifahrt ermittelt wird. Im Prüfstand wird bei der simulierten Vorbeifahrt nur der Geräuschanteil des Abgas- und Antriebsstrangs (Power Train Noise (PTN)) gemessen. Der Anteil des RFG (Tyre Road Noise (TRN)) wird getrennt ermittelt. Beide Geräuschanteile werden energetisch summiert und ergeben so den Gesamtgeräuschpegel (Total Vehicle Noise (TVN)) des Fahrzeugs.

Die Berechnung wird separat für jede Fahrzeugseite und an jeder Position x auf der Messstrecke durchgeführt. Um nur den Geräuschpegel des Antriebsstrangs des Fahrzeuges zu erfassen, muss das Reifenfahrbahngeräusch soweit wie möglich unterdrückt werden. Hierfür eignen sich vor allem profillose Slick Reifen. Um das RFG weiter zu minimieren, kann bei Fahrzeugen mit nur einer Antriebsachse nur diese bei den Messungen verwendet werden.

Das für die simulierte Vorbeifahrt verwendete RFG wird aus einem zuvor ermittelten Reifenkennfeld, der Fahrgeschwindigkeit und der Beschleunigung errechnet. Das Reifenkennfeld bestehend aus einem Datensatz mit Regressionskoeffizienten $\alpha(x)$ und $\beta(x)$, die auf einer genormten Außengeräuschmessstrecke ermittelt werden. Die Fahrgeschwindigkeit und die Beschleunigung werden während der simulierten Vorbeifahrt vom Prüfstand aufgezeichnet. Die Berechnung des RFG setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, dem Reifenrollgeräusch (Free Rolling Noise (FRN)) und dem Drehmomenteinfluss (Torque Influence (TI)) der Reifen unter Last.

Das Reifenkennfeld des FRN wird mit Hilfe eines logarithmischen Regressionsmodells beschrieben. Als

Eingangsdaten wird das abgestrahlte Reifenrollgeräusch des vorbeifahrenen Fahrzeuges auf der realen Außengeräuschmessstrecke verwendet. Hierzu wird das Reifenrollgeräusch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten über den Weg, analog zur ISO 362, aufgezeichnet (Abbildung 2). Um bei der Messung die Abgas- und Antriebsstranggeräusche zu unterdrücken, ist ein spezielles gekapseltes Fahrzeug vorteilhaft. Alternativ kann ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor verwendet werden. Hierbei muss das Fahrzeug beim Vorbeifahren ausgekuppelt und der Motor ausgeschaltet sein.

Mit Hilfe der Regressionskoeffizienten ist es möglich, dass Reifenrollgeräusch $L_{FRN(v,x)}$ für jede Geschwindigkeit und an jedem Ort zwischen der Linie AA' und BB' zu berechnen. Aus den ermittelten Regressionskoeffizienten kann ein Reifenkennfeld für einen Reifentyp (passend zum Fahrzeugtyp) auf einer Außengeräuschmessstrecke erstellt werden.

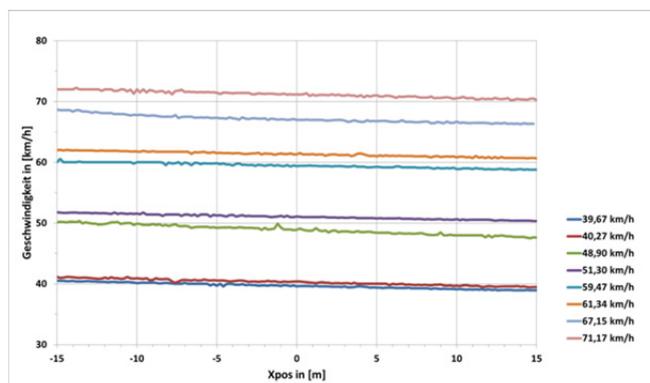


Abbildung 2: Beispiel von Geschwindigkeitsprofilen zur Erstellung eines Reifenkennfeldes.

Für die Bestimmung des Drehmomentanteils am RFG schlägt die Norm eine vereinfachte Berechnung vor. Die Berechnung ist wiederum abhängig von der Beschleunigung und der Position des Fahrzeuges auf der Messstrecke. Diese Berechnungsformel beinhaltet einen Koeffizienten ζ der für jede Außengeräuschmessstrecke unterschiedliche Werte annehmen kann.

Alternativ schlägt die Norm eine genauere Methode zur Ermittlung des Drehmomenteinflusses vor, von der aber in der aktuellen Untersuchung kein Gebrauch gemacht wurde, da hierbei ein gekapseltes Fahrzeug unabdingbar ist. Um eine korrekte Übertragung des RFG von der Außengeräuschmessstrecke auf den Prüfstand zu gewährleisten, muss eine Temperaturkorrektur auf den Pegel des RFG angewandt werden.

Validierung nach ISO 362-3 (Variante A)

Die Prüfmethode nach „Variante A“ gliedert sich in zwei Messungen, in eine sogenannte Haupt- und eine Validierungsmessung. Die Hauptmessung wurde analog zu DIN ISO 362-1 auf der Außengeräuschmessstrecke durchgeführt. Die Validierungsmessung ist die Messung auf dem Allrad-Rollenprüfstand mit Vorbeifahrt-Messhalle nach Variante A. Haupt- und Validierungsmessung werden

miteinander verglichen, wobei die Hauptmessung die Referenz darstellt. Die Validierungsmessung darf nicht mehr als ± 1 dB von der Referenz abweichen. Weitere einzuhaltende Toleranzen bestehen bezüglich der Temperaturen an der Luftansaugung ($\pm 5^\circ\text{C}$), dem KAT/Dieselpartikelfilter (DPF) und dem Auspuffendtopf ($\pm 15^\circ\text{C}$), der Motordrehzahl ($\pm 2\%$) und der Geschwindigkeit (± 1 km/h).

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Validierungsergebnis der beschleunigten Vorbeifahrt des BMW 116d. Die Pegeldifferenz zwischen dem RFG L_{TRN} und dem Antriebstrang L_{PTN} ist im Bereich zwischen $-5,0$ m und $+5,0$ m gering. Vergleicht man die Hauptmessung mit der Validierungsmessung so ergeben sich nur geringe Abweichungen. Die Pegel auf beiden Fahrzeugseiten liegen über der kompletten Wegstrecke innerhalb der geforderten Toleranz der Validierung.

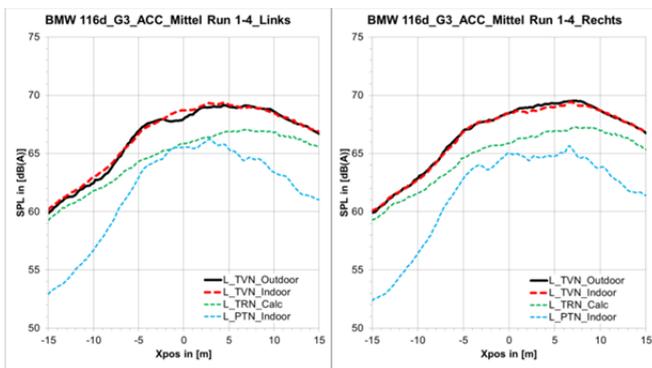


Abbildung 3: Endergebnisse für das Typprüfverfahren nach Variante A der ISO/CD 362-3 – Darstellung der beschleunigten Vorbeifahrt (Mittelwert Run 1-4) der jeweils linken und rechten Seite des BMW 116d.

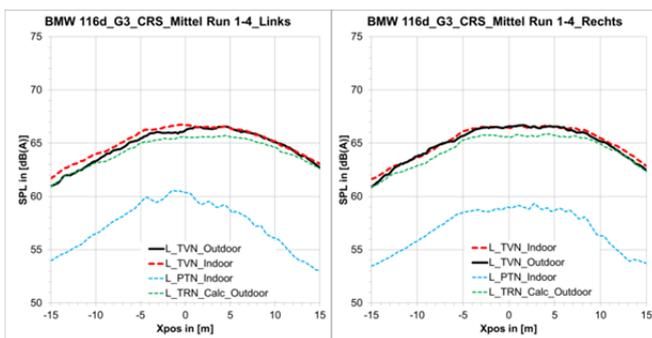


Abbildung 4: Endergebnisse für das Typprüfverfahren nach Variante A der ISO/CD 362-3 – Darstellung der konstanten Vorbeifahrt (Mittelwert Run 1-4) der jeweils linken und rechten Seite des BMW 116d.

Abbildung 4 zeigt die Validierungsergebnisse der konstanten Vorbeifahrt des BMW 116d. Im Gegensatz zur beschleunigten Vorbeifahrt liegt der Geräuschpegel des Antriebstranges deutlich unter dem des RFG. An der linken Fahrzeugseite erhöht das Geräusch des Antriebstranges das Gesamtgeräusch um $+1,3$ dB. An der rechten Fahrzeugseite hebt der Geräuschanteil des Antriebstranges den Gesamtfahrzeugpegel um $1,0$ dB an. Der Pegelbeitrag des Antriebstranges zum L_{TVN} ist also eher gering, wodurch bei der konstanten Vorbeifahrt das RFG die dominierende

Geräuschquelle darstellt. Der Vergleich der realen zur simulierten Vorbeifahrt zeigt an der rechten Fahrzeugseite kaum Unterschiede. Die maximale Abweichung beträgt $0,4$ dB. Bei der linken Fahrzeugseite kommt es zu einer maximalen Differenz von $+0,6$ dB.

Die Messungen der Geschwindigkeit in Abbildung 5 zeigen zueinander kaum Abweichungen und liegen innerhalb des Toleranzbereiches. Bezüglich der gemessenen Drehzahl am BMW 116d ist eine zunehmende Spreizung der Drehzahlkurven zu sehen. Die Drehzahl im Prüfstand zeigt eine zunehmende Abweichung über dem Weg zur Drehzahl der realen Vorbeifahrt, mit einer maximalen Abweichung von 84 rpm bei $+13,0$ m. Dies entspricht einer Abweichung von $4,1\%$, also $2,1\%$ über der maximalen positiven Toleranzgrenze. Ursache der Abweichung können die verwendeten unterschiedlichen Messsysteme sein.

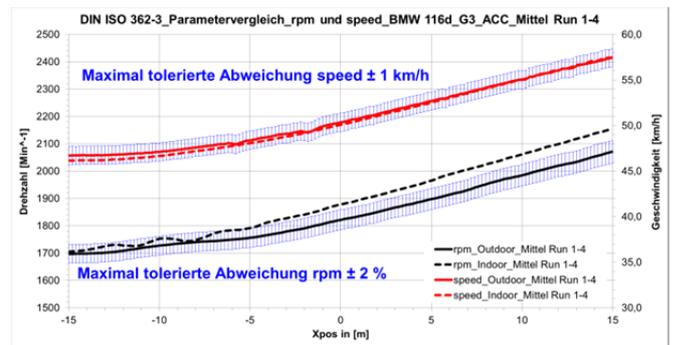


Abbildung 5: Prüfung von Geschwindigkeit und Drehzahl auf Einhaltung der geforderten Toleranzen, für die Validierung nach Variante A der ISO/CD 362-3 des BMW 116d.

In Tabelle 1 sind die Messergebnisse des BMW 116d aufgetragen.

Tabelle 1: Ergebnisse der Berechnung des Typprüfpegels L_{Urban} für den BMW 116d zwischen realer und simulierter Vorbeifahrt

Einzel-Ergebnisse	ISO 362-1	ISO/CD 362-3
gemessener Gang	3	3
a_{wot} [m/s^2]	1,66	1,75
L_{wot} [dB(A)]	69,6	69,4
L_{crs} [dB(A)]	67,0	66,5
L_{urban} [dB(A)]	68,6	68,2

Die mittleren Testbeschleunigungen unterscheiden sich um etwa ein Zehntel. Dies kann der leicht unterschiedlichen Einfahrts- bzw. Ausfahrtsgeschwindigkeit zwischen realer und simulierter Vorbeifahrt liegen. Beim Teilleistungsfaktor k_p , der für die Berechnung des Typprüfpegels L_{Urban} notwendig ist, gibt es geringe Unterschiede, die in Abweichungen der mittleren Testbeschleunigung a_{wot} begründet sind. Die Differenz zwischen dem Typprüfpegel L_{Urban} liegt bei $0,4$ dB.

Beim BMW 116d sind die gemessenen Temperaturen der Luftansaugung und des Auspuffendtopfes innerhalb des Toleranzbereiches. Der Vergleich der DPF-Temperaturen zwischen Outdoor- und Indoor-Messung zeigt, dass die

Toleranz von $\pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$ nicht eingehalten wird. Ein Anstieg der Temperatur während der simulierten Vorbeifahrt zeigt, dass das Fahrzeug nicht ausreichend warmgefahren wurde.

Die für den Anteil des Drehmomenteinflusses verwendete Berechnungsformel ist abhängig von der Beschleunigung indoor und dem Koeffizient ζ . Dieser Koeffizient beschreibt im Wesentlichen den Pegelbeitrag des Drehmomenteinflusses zum Vorbeifahrtspegel auf der gemessenen Außengeräuschstrecke. Der Koeffizient kann Werte zwischen 0,075 und 0,15 annehmen und repräsentiert die „Lautheit“ der Außengeräuschstrecke.

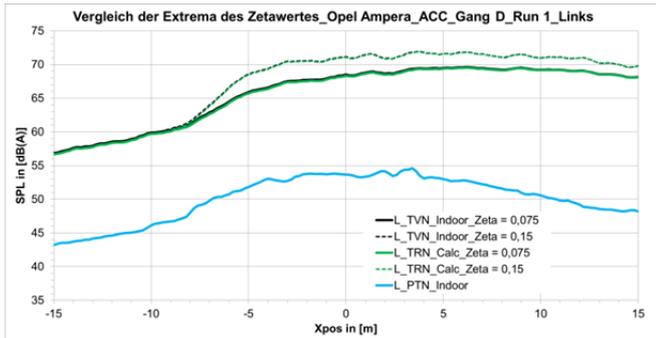


Abbildung 6: Gegenüberstellung der Extrema des Koeffizienten ζ , zur Berechnung des RFG - Opel Ampera, Run 1, ACC, Links

In Abbildung 6 ist beispielhaft ein berechneter Vorbeifahrtspegel der linken Fahrzeugseite des Opel Ampera für den minimalen und maximalen Koeffizienten ζ dargestellt. Aufgrund der hohen (nicht normgerechten) Beschleunigungswerte von über 4 m/s^2 beträgt der Anteil des Drehmomenteinflusses z.T. 3 dB. Bei normgerechten Beschleunigungen von max. 2 m/s^2 variiert dieser Anteil jedoch nur zwischen 0,8 und 1,5 dB. Bei der für die Versuche verwendeten Außengeräuschmessstrecke wurde ein Koeffizient von 0,075 als beste Anpassung an die Außengeräuschmessstrecke verwendet.

Die weiteren Validierungsergebnisse des Typprüfpegels der realen und simulierten Vorbeifahrt sind in Tabelle 2 dargestellt. Die Pegel unterscheiden sich bei allen Fahrzeugen nur gering und liegen innerhalb der Toleranzen der Validierung.

Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnung des Typprüfpegels L_{Urban} für die weiteren Fahrzeuge zwischen realer und simulierter Vorbeifahrt in dB(A). * $a_{\text{Urban}} > 2 \text{ m/s}^2$

Fahrzeug	VW Golf V		Porsche 911		Opel Ampera	
	li.	re.	li.	re.	li.	re.
Outdoor	68,8	68,8	74,7	74,5	66,3*	66,1*
Indoor	68,3	68,7	74,7	74,9	66,4*	66,2*
Delta	0,1		0,2		0,1	

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der Vergleich zwischen realer und simulierter Vorbeifahrt zu einer guten Übereinstimmung geführt hat. Die geforderten Toleranzen

innerhalb der Validierung werden von allen Fahrzeugen erfüllt. Bei der Bestimmung von Hilfsgrößen, wie der Temperatur oder Drehzahl, wurden teilweise geringe Abweichungen vom einzuhaltenden Toleranzbereich festgestellt. Der Vergleich des Typprüfpegel L_{Urban} ergab bei allen Fahrzeugen nur sehr geringe Abweichungen. Die Unterschiede liegen beim Opel Ampera und VW Golf V bei 0,1 dB, beim Porsche 911 bei 0,2 dB und beim BMW 116d bei 0,4 dB.

Nach dem jetzigen Stand der ISO/CD 362-3 sind die Toleranzen der Validierung sehr eng gesetzt. Trotz der hohen Genauigkeit bei der Durchführung des Vergleichs von realer und simulierter Vorbeifahrt haben sich Abweichungen bei den Ergebnissen in einzelnen Kriterien, wie der Temperatur oder Drehzahl, ergeben. Dennoch lag der Typprüfpegel immer im zulässigen Bereich. Dies führt letztlich zum Fazit, dass bei der beschriebenen Durchführung eine Anwendung der simulierten Vorbeifahrt im Rollenprüfstand möglich ist.

Ein Ansatz für Verbesserungen läge in der exakten Bestimmung des Drehmomenteinflusses auf das Reifengeräusch mit Hilfe eines quadratischen Regressionsverfahrens, womit auch der Koeffizient ζ exakt bestimmt werden könnte. Die ISO/CD 362-3 beschreibt hierfür in Anhang B, Kapitel 2.2 und 3.2, wie ein solches Verfahren durchgeführt wird. Für die dazu notwendigen Messungen eines Geschwindigkeitsprofils ist zwingend ein Reifen-Test-Fahrzeug mit lautlosem Antrieb notwendig.

Literatur

- [1] DIN ISO 362-1: Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch - Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N, 2009.
- [2] P. Teller; P. Brandstät: Labor für Fahrzeugakustik und simulierte Vorbeifahrt. DAGA 2010, Berlin, DEGA, S. 971-972.
- [3] P. Brandstät; M. Krämer; W. Herget; V. Lazic: Optimierte Fahrzeugakustik mit einem innovativen Allrad-Rollenprüfstand. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 114 (2012) H. 11, S. 892-897.
- [4] ISO/CD 362-3: Measurement of noise emitted by accelerating road vehicles - Engineering method - Part 3: Indoor testing M and N categories, 2012.
- [5] A. Ickinger: Vergleich der Vorbeifahrtsgeräuschmessung zwischen realer und der simulierten Vorbeifahrt auf dem IBP Prüfstand. B.Sc. Arbeit HFT Stuttgart, 2014.
- [6] DIN ISO 10844: Anforderungen an Prüfstrecken zur Messungen der Geräuschemission von Straßenfahrzeugen und deren Reifen, 2012.