

Untersuchung des Einflusses systematischer Fehler bei der Anwendung des SPB-Verfahrens

Sebastian Kluth¹, Mirko Ruhnau¹, Manuel Männel², Wolfram Bartolomaeus³, Alexander Attenberger⁴

¹ Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Blumenstraße 80, 01307 Dresden

² Müller-BBM GmbH, Robert-Koch Straße 11, 82152 Planegg

³ Bundesanstalt für Straßenwesen, Brüderstraße 53, 51427 Bergisch Gladbach

⁴ Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg

Einleitung

Das Verfahren der Statistischen Vorbeifahrt (Statistical Pass-By, SPB) ist eines von zwei Standard-Messmethoden zur Ermittlung des Einflusses von Straßenoberflächen auf das Verkehrsgeräusch. Trotz ausführlicher Anleitung zur Durchführung des Verfahrens nach Norm (DIN EN ISO 11819-1) ergeben sich in dessen Anwendung einige mögliche systematische Fehlerquellen. Zum einen kann die Norm hinsichtlich der Positionierung des Mikrofons unterschiedlich ausgelegt werden. Zum anderen ist die Klassifizierung einer gültigen Vorbeifahrt bezüglich des Hintergrundgeräusches sowie die Auswahl zu messender Fahrzeuge im vorbeifahrenden Fahrzeugkollektiv unter Umständen problematisch. Insbesondere die Zuordnung der gemessenen Fahrzeuge zu einer bestimmten Fahrzeugkategorie ist nicht immer eindeutig. Um den Einfluss der genannten Fehlerquellen zu identifizieren, wurden zeitgleich Messungen von vier verschiedenen, voneinander unabhängigen Prüfinstituten am selben Messort durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sollen in diesem Beitrag präsentiert werden.

Verfahren der Statistischen Vorbeifahrt (SPB)

Die Messgröße, die nach dem Verfahren der Statistischen Vorbeifahrt zur Beurteilung der Geräuschemission von Fahrbahnoberflächen herangezogen wird, ist der Schalldruckpegel-Zeitverlauf $L_{p,i}(t)$, der während der Vorbeifahrt eines Fahrzeugs i an einem Mikrophon im horizontalen Abstand von $(7,5 \pm 0,1)$ m zur Mitte des zu untersuchenden Fahrstreifens in einer Höhe von $(1,2 \pm 0,1)$ m über der Fahrbahnoberfläche auftritt. Der Schalldruckpegel-Zeitverlauf ist mit der Frequenzbewertung „A“ und der Zeitbewertung „FAST“ zu ermitteln. Die Geschwindigkeit v_i des Fahrzeugs muss im betrachteten Fahrbahnabschnitt konstant sein. Die das Mikrophon passierenden Fahrzeuge werden in verschiedene Kategorien (Pkw, zweiachsiger Lkw, mehrachsiger Lkw) unterteilt, wobei zur Gewährleistung der statistischen Sicherheit für jede Kategorie eine Mindestanzahl gültiger Vorbeifahrten zu erfassen ist.

Aus den Aufzeichnungen des Vorbeifahrtpegel-Zeitverlaufs $L_{p,i}(t)$ wird für jede Vorbeifahrt das Maximum $L_{p,i,max}$ ermittelt und für jede Fahrzeugkategorie als Funktion der logarithmierten Geschwindigkeit $\lg[v_i/(km/h)]$ aufgetragen. Der Funktionswert der berechneten Regressionsgerade an

der Stelle $\lg[v_{ref}/(km/h)]$ ist der sogenannte Fahrzeuggeräuschpegel $L_{p,veh}$, vgl. Abbildung 1.

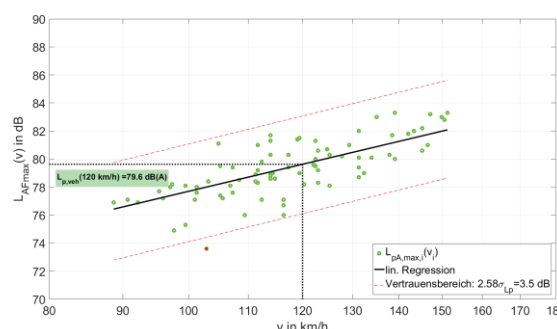


Abbildung 1: Bestimmung des Fahrzeuggeräuschpegels durch Ermittlung des Funktionswertes der Regressionsgeraden durch die geschwindigkeitsabhängigen Maxima der Vorbeifahrtzeitverläufe aller gültigen Einzelvorbeifahrten

Die Fahrzeuge werden gemäß [1] in folgende Kategorien unterteilt:

- Pkw: „Personenkraftwagen oder andere leichte Fahrzeuge“,
- zweiachsige Lkw: „Lastkraftwagen, Linien- und Reisebusse mit zwei Achsen und mehr als vier Rädern“,
- mehrachsige Lkw: „Lastkraftwagen, Linien- und Reisebusse mit mehr als zwei Achsen“.

Zur Bewertung der Gültigkeit von Vorbeifahrten gibt die Norm folgenden Leitfadens an.

1. „Kurz vor und nach dem Passieren eines Fahrzeugs [...] muss der A-bewertete Schalldruckpegel um mindestens 6 dB unter dem gemessenen maximalen A-bewerteten Schalldruckpegel der Vorbeifahrt liegen.“
2. „Bei der Auswahl von Fahrzeugen für die Messung sollte sichergestellt werden, dass Geräusche von anderen Fahrzeugen [...] das Messergebnis nicht beeinflussen [...].“
3. „Außerdem sind die Messergebnisse von Fahrzeugen zu verwerfen, die eindeutig atypische Geräusche emittieren, wie bei schadhafte Abgasanlagen, durch Geklapper von Aufbauten

oder akustische Warnsignale. Auch Fahrzeuge mit Hilfsaggregaten, die zu hören sind, sollten unberücksichtigt bleiben.“

4. „Geräuschpegel sollten nur von solchen Fahrzeugen gemessen werden, die mit offensichtlich konstanter Geschwindigkeit fahren.“

Mögliche systematische Fehler

Die Norm gibt als systematische Abweichung der Messgeräte bedingt durch die geforderten Genauigkeitsklassen der verwendeten Messtechnik ± 1 dB an. Diese Unsicherheit ist im Wesentlichen durch die Bestimmung des maximalen Vorbeifahrtpegels und der Geschwindigkeit bestimmt. Zusätzlich wird eine Unsicherheit durch die örtliche und zeitliche Streuung der Verkehrszusammensetzung von 0,3 dB bis 0,8 dB angegeben. Innerhalb der hier durchgeführten Untersuchungen wurde dieser zweite Unsicherheitsfaktor durch die zeitgleiche Messung der teilnehmenden Prüfinstitute am selben Messort ausgeschlossen. Neben den erwähnten Faktoren gibt es weitere mögliche Fehlerquellen:

1. Die Zuordnung der Fahrzeuge zu einer bestimmten Fahrzeugkategorie ist nicht immer eindeutig.
2. Ob eine Fahrzeugvorbeifahrt ungestört, die Geschwindigkeit konstant und demzufolge die Fahrzeugvorbeifahrt gültig ist, entscheidet letztendlich das Messpersonal. Die alleinige Betrachtung des Vorbeifahrtpegel-Zeitverlaufs zur Überprüfung des 6-dB-Kriteriums ist im Allgemeinen nicht ausreichend, da störende Fahrzeuge (z.B. Fahrzeuge auf benachbarten oder gegenüberliegenden Fahrstreifen) im Vorbeifahrtpegel-Zeitverlauf nicht offensichtlich erkennbar sein müssen.
3. Bezüglich der Mikrofonposition ist in [1] zu lesen: „Die Mikrofonhöhe beträgt $(1,2 \pm 0,1)$ m über der Oberfläche des Fahrstreifens.“ Hier stellt sich bei Fahrbahnen mit Querneigung die Frage, ob die Neigung bei der Höhenausrichtung des Mikrofons mit berücksichtigt werden muss.

Durchführung der messtechnischen Untersuchungen

Die messtechnischen Untersuchungen wurden am 27.05.2015 auf der A 92 bei Betriebskilometer 2 in Fahrtrichtung Starnberg durchgeführt. Die untersuchte Fahrbahnedeckschicht ist ein DSH-V aus dem Jahr 2009. Abbildung 2 zeigt ein Foto vom Messaufbau. Untersucht wurde ausschließlich die Geräuschemission der Fahrzeugkategorie Pkw. Die teilnehmenden Prüfinstitute haben ihre Messtechnik unabhängig voneinander aufgebaut. Es wurden zwei verschiedene Messungen durchgeführt.

1. In einer autonomen Messung haben die vier Prüfinstitute die SPB-Messung unabhängig voneinander durchgeführt. Das heißt insbesondere, dass jedes Institut selbstständig die Fahrzeuge zur Ermittlung des Fahrzeuggeräuschpegels ausgewählt hat.
2. Anschließend fand eine geführte Messung statt. Dabei wurden die zu untersuchenden Fahrzeuge aus dem vorbeierollenden Fahrzeugkollektiv vorgegeben.



Abbildung 2: Messort und Messaufbau

Messergebnisse

Bemerkung: Die nachfolgenden Ergebnisse sind randomisiert, das heißt, die Reihenfolge der dargestellten Messergebnisse ist unabhängig von der Reihenfolge der Autoren.

Abbildung 3 zeigt die Bestimmung des Fahrzeuggeräuschpegels aus den Geschwindigkeiten und den maximalen Vorbeifahrtpegeln für die autonome Messung.

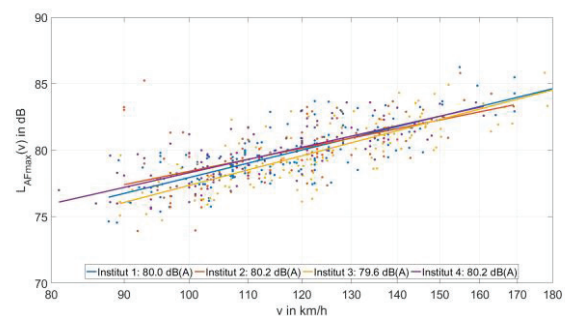


Abbildung 3: Ermittlung des Fahrzeuggeräuschpegels aus den Daten der autonomen Messung der teilnehmenden Prüfinstitute.

Tabelle 1 gibt eine Übersicht der Messergebnisse der autonomen Messung.

Tabelle 1: Messergebnisse der autonomen Messung (N : Anzahl gültiger Vorbeifahrten, v_m : mittlere Geschwindigkeit, $L_{p,veh}$: Fahrzeuggeräuschpegel)

	N	v_m in km/h	$L_{p,veh}$ in dB(A)
Institut 1	163	118	80,0
Institut 2	106	117	80,0
Institut 3	124	125	79,5
Institut 4	114	116	80,3

Bei der geführten Messung wurden 140 Fahrzeuge aus dem Fahrzeugkollektiv ausgewählt. Einige Prüfinstitute überprüfen das 6-dB-Kriterium nicht nur an der Normposition in 1,2 m Höhe sondern auch in optionalen, höheren Mikrofonpositionen. Daher wurden nach der Messung zunächst aus den Fahrzeugen genau die Fahrzeuge ausgewählt, die von allen Prüfinstituten eindeutig als gültige Vorbeifahrt klassifiziert wurden. Für die weitere Auswertung der Daten der geführten Messung sind 87 gültige Vorbeifahrten verwendet worden.

Abbildung 4 zeigt die Bestimmung des Fahrzeuggeräuschpegels aus den Geschwindigkeiten und den maximalen Vorbeifahrtpegeln für die geführte Messung.

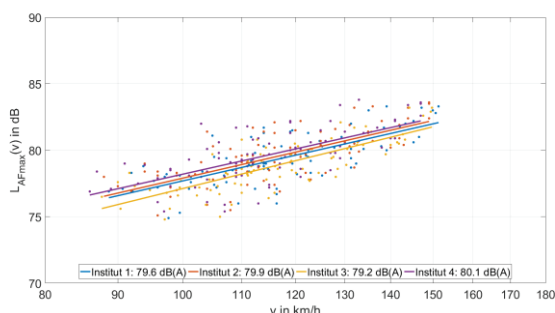


Abbildung 4: Ermittlung des Fahrzeuggeräuschpegels aus den Daten der geführten Messung der teilnehmenden Prüfinstitute.

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Messergebnisse der geführten Messung.

Tabelle 2: Messergebnisse der geführten Messung (N : Anzahl gültiger Vorbeifahrten, v_m : mittlere Geschwindigkeit, $L_{p,veh}$: Fahrzeuggeräuschpegel)

	N	v_m in km/h	$L_{p,veh}$ in dB(A)
Institut 1	87	118	79,6
Institut 2	87	118	79,9
Institut 3	87	117	79,2
Institut 4	87	115	80,1

Bewertung der Messergebnisse - Fehleranalyse

Bei Betrachtung der Messergebnisse der autonomen Messung zeigt sich, dass die maximale Abweichung der Messergebnisse 0,8 dB beträgt und damit innerhalb des in [1] angegebenen Bereichs der Genauigkeit des Messverfahrens liegt.

Der Vergleich der Messergebnisse von autonomer Messung und geführter Messung zeigt nur geringe Unterschiede. Alle Prüfinstitute haben in der geführten Messung geringfügig kleinere Pegel ermittelt als in der autonomen Messung.

Auf Grundlage der Messergebnisse der geführten Messung lassen sich weitere Analysen durchführen. Wählt man die Ergebnisse eines beliebigen Prüfinstituts als Referenz, kann die mittlere Geschwindigkeits- und Pegelabweichung bestimmt werden, vgl. Gleichungen (1) und (2). Für die nachfolgenden Betrachtungen wurde Prüfinstitut 3 als Referenz gewählt.

$$\Delta v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v_i - v_{i,ref}] \quad [\text{km/h}] \quad (1)$$

$$\Delta L_{p,veh} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [L_{p,veh,i} - L_{p,veh,i,ref}] \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

Tabelle 3 beinhaltet die mittleren Geschwindigkeits- und Pegelabweichungen.

Tabelle 3: Mittlere Geschwindigkeits- und Pegelabweichungen der geführten Messung (Referenz: Prüfinstitut 3).

	Δv in km/h	$\Delta L_{p,veh}$ in dB
Institut 1	1,2	0,5
Institut 2	1,1	0,7
Institut 3	0,0	0,0
Institut 4	-1,4	0,7

Es zeigt sich, dass die Prüfinstitute 1 und 2 die Geschwindigkeit gegenüber Prüfinstitut 3 im Mittel um 1,2 km/h bzw. um 1,1 km/h höher bestimmt haben. Prüfinstitut 4 hat im Mittel 1,4 km/h geringere Geschwindigkeiten ermittelt. Bei Betrachtung der mittleren Pegelabweichung fällt auf, dass die Prüfinstitute 1, 2 und 4 die Pegel um 0,5 bis 0,7 dB höher bestimmt haben als Prüfinstitut 3.

Der mittlere Anstieg b der Regressionsgeraden (vgl. Abbildung 4) beträgt 25. Damit lassen sich Pegelkorrekturwerte

$$\Delta L_{korr} = b \cdot \lg((120 + \Delta v)/120) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

berechnen. Mit Hilfe dieser Pegelkorrekturwerte können systematische Abweichungen in der Geschwindigkeitsbestimmung aus den Fahrzeuggeräuschpegeln in Tabelle 2 herausgerechnet werden. Tabelle 4 beinhaltet die berechneten Pegelkorrekturwerte und die korrigierten Fahrzeuggeräuschpegel.

Tabelle 4: Berechnete Pegelkorrekturen und korrigierte Fahrzeuggeräuschpegel.

	ΔL_{korr} in km/h	$L_{p,veh,korr}$ in dB
Institut 1	0,1	79,7
Institut 2	0,1	80,0
Institut 3	0,0	79,2
Institut 4	-0,1	80,0

Es zeigt sich, dass die Streuung der Messergebnisse der Prüfinstitute 1, 2 und 4 durch diese Korrektur verringert wird. Die mittlere Abweichung des ermittelten Fahrzeuggeräuschpegels von Prüfinstitut 3 zu den übrigen Prüfinstituten beträgt 0,7 dB. Da sich die Abweichung der Messergebnisse von Prüfinstitut 3 zu den übrigen Prüfinstituten auch nach der Korrektur des Geschwindigkeitseinflusses nur geringfügig ändert, ist zu vermuten, dass Prüfinstitut 3 die maximalen Vorbeifahrtpegel systematisch zu gering bestimmt.

Der Einfluss der Querneigung der Fahrbahn auf die Höhenausrichtung des Mikrofons (und damit auf das Messergebnis) kann durch geometrische Berechnungen abgeschätzt werden. Für übliche Querneigungen der Fahrbahn von 2,5 % ist der Einfluss geringer als 0,1 dB und damit vernachlässigbar.

Zusammenfassung

Im hier vorliegenden Dokument sind die Ergebnisse von Vergleichsmessungen nach dem Verfahren der Statistischen Vorbeifahrt dargestellt. Die Untersuchungen wurden von vier voneinander unabhängigen Prüfinstituten durchgeführt. Ziel war es, systematische Fehler in der Messkette sowie weitere mögliche systematische Fehler in der Anwendung zu identifizieren und zu bewerten.

Alle Ergebnisse liegen innerhalb des Vertrauensbereichs, der im Normwerk [1] zum SPB-Verfahren angegeben ist.

Es wurden zwei verschiedene Messungen ausgewertet. Zum einen wurde eine autonome Messung durchgeführt, bei der die teilnehmenden Prüfinstitute die auszuwertenden Fahrzeugvorbeifahrten selbstständig auswählen und deren Gültigkeit bewerten. Zum anderen ist eine geführte Messung durchgeführt worden, in der alle Prüfinstitute dieselben Fahrzeuge vermessen haben. Der Vergleich beider Messungen hat gezeigt, dass systematische Fehler, die durch die subjektive Bewertung der Gültigkeit von Fahrzeugvorbeifahrten und die Zuordnung von Fahrzeugen zu einer bestimmten Kategorie verursacht werden, nur einen geringen Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Es wird vermutet, dass die systematischen Abweichungen der Messergebnisse der beteiligten Prüfinstitute untereinander auf Ungenauigkeiten in der Messkette zurückzuführen sind. Jedoch liegen diese Abweichungen im Bereich des in [1] angegebenen Intervalls.

Literatur

- [1] DIN EN ISO 11819-1: Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche, Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren. Mai 2002