



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Akustische und schwingungstechnische Charakterisierung eines Innentrommelprüfstandes

Art der Arbeit: Diplomarbeit

Irene Elisabeth Bladerer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



DIPLOMARBEIT

**Akustische und schwingungstechnische
Untersuchung eines
Innentrommelprüfstandes**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung
des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Kaltenbacher
Mitwirkung Dipl.-Ing. Stefan Gombots
Institut für Mechanik und Mechatronik, E325 A4

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften
von

Irene Elisabeth Bladerer
Matrikelnummer 0725214
Hauslehen 104
3342 Opponitz

Wien, am 31. Jänner 2019

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	6
2.1	Schwingungen und Schall	6
2.1.1	Schwingungsklassifizierung	7
2.2	Schallfeldgrößen	8
2.3	Reifen-Fahrbahngeräusch	10
2.3.1	Mechanische Anregung	13
2.3.2	Aerodynamische Anregung	19
2.3.3	Einfluss der Fahrbahntextur	23
3	Stand der Technik	26
3.1	EN ISO 11819-2 (CPX)	26
3.2	RVS 11.06.64	28
3.3	AASHTO TP 76-13 (OBSI)	30
3.4	Vorbeifahrtsmessung nach EN ISO 11819-1 (SPB-Verfahren)	32
4	Messungen	34
4.1	Zusammenfassung der drei standardisierten Verfahren und Ableitung der Vorschriften für die Messungen vom Freifeld auf ein stationäres Rad	34
4.1.1	Geforderte Umgebungseigenschaften und Messbedingungen	35
4.2	Messungen nach CPX	37
4.2.1	Art des Messgeräts	38
4.2.2	Angaben zur Lage und zum Aussehen des Messortes	38
4.2.3	Angaben zur Art und zum Aufbau der geprüften Oberfläche	39
4.2.4	Angaben zum Zustand der geprüften Oberfläche sowie Umweltfaktoren	40
4.2.5	Prüfreifen und andere Prüfbedingungen	41
4.2.6	Weitere Angaben	42
4.2.7	Grafische Darstellung der Messergebnisse	42
4.3	Messungen nach RVS	46
4.3.1	Grafische Darstellung der Messergebnisse	48
4.4	Messungen nach OBSI	48
4.4.1	Grafische Darstellung der Messergebnisse	52
5	Vergleich	54
5.1	Einfluss der Geräuschmechanismen	54
5.2	Vergleich der drei standardisierten Verfahren	55

5.2.1	Vergleich der Messergebnisse mit den Parametern nach CPX	55
5.2.2	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche nach CPX	57
5.2.3	Vergleich der Messergebnisse mit den Parametern nach RVS	57
5.2.4	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche nach RVS	59
5.2.5	Vergleich der Messergebnisse nach den Parametern nach OBSI	59
5.2.6	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche nach OBSI	61
5.2.7	Einflüsse durch mechanische und aerodynamische Anregungsmechanismen	61
5.3	Vergleich von Geschwindigkeiten	62
5.3.1	Vergleich der Geschwindigkeiten mit SRTT-Prüfreifen	62
5.3.2	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem SRTT-Prüfreifen	64
5.3.3	Vergleich der Geschwindigkeiten mit AV4-Prüfreifen	64
5.3.4	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem AV4-Prüfreifen	66
5.3.5	Vergleich der Geschwindigkeiten mit Piarc-Prüfreifen	66
5.3.6	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem Piarc-Prüfreifen	68
5.4	Vergleich der Reifen	68
5.4.1	Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Reifen	70
5.5	Vergleich von Lasten	72
6	Zusammenfassung	75
6.1	Ausblick	76
	Literatur	77
7	Anhang	79
7.1	Abbildungen: Vergleich der drei standardisierten Verfahren	79
7.2	Abbildungen: Vergleich von Geschwindigkeiten	85
7.3	Abbildungen: Vergleich der Reifen	96
7.4	Abbildungen: Vergleich von Lasten	99

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Reifen-Fahrbahn-Geräusche untersucht. Vorab werden die Grundlagen von Schwingungen und Schall und deren Einwirkungen auf den Menschen erläutert und es wird auf die Wichtigkeit der Untersuchung des Reifen-Fahrbahngeräusches aufgrund dessen Auswirkungen hingewiesen.

Ebenso werden die bekannten mechanischen und aerodynamischen Anregungsmechanismen für das entstehende Reifen-Fahrbahn-Geräusch und die dafür zur Verfügung stehenden standardisierten Verfahren zur Messung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches vorgestellt.

Für die Messung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches sind CPX, RVS und OBSI angewandt worden. Die Messungen sind am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BAST durchgeführt worden. Auf Basis dieser Messungen sind verschiedene Vergleiche gezogen sowie Interpretationen hinsichtlich der Anregungsmechanismen gemacht worden. Die Auswertungen zeigen die Einflüsse der verschiedenen Anregungsmechanismen sowie überraschenderweise, dass die aufgebrachte Achslast kaum einen Einfluss auf das entstandene Abrollgeräusch hat.

Abstract

In this master's thesis the tire-road-noises are researched and the importance of such investigations and their impact on mankind are professed.

The fundamentals of vibrations and acoustics are explained as well as the state-of-the-art of known mechanical and aerodynamically excitation mechanisms for the tire-road-noise and the available standardized methods for measuring are explained.

The measuring methods CPX, RVS and OBSI are used for the noise-measurements at PFF (test bench vehicle/road) from BAST. Based on the results of the measurements are comparisons done. Afterwards interpretations and summaries of the results has been executed. The effects of the different excitation mechanisms and the surprising result that the axisload has nearly no influence on the arising noise are shown in the examinations.

Danksagung

Ich möchte mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben.

An erster Stelle gebührt mein Dank Prof. Kaltenbacher und DI Gombots, die meine Diplomarbeit betreut und begutachtet haben. Sehr herzlich bedanken möchte ich mich für die Hilfestellungen, Tipps und konstruktiven Expertisen bei der Erstellung dieser Arbeit.

Ebenfalls möchte ich mich beim Team der BAST, Dr. Bartholomäus, Hr. Steinheuer, Fr. Sammet und Hr. Strigari bedanken, die uns die Messungen am PFF ermöglicht und mit viel Geduld, Interesse und Hilfsbereitschaft zur Seite standen.

Meinem Freund Martin Atanassov danke ich besonders für die Geduld und den starken emotionalen Rückhalt über die Dauer meines Studiums.

Abschließend möchte ich mich bei meinem vormaligen Chef Hr. Christoph Nessel und aktuellen Chef Hr. Stefan Beck für die Geduld und Unterstützung bedanken!

Irene E. Bladerer

Kapitel 1

Einleitung

Die Auswirkungen von Verkehrsgeräuschen können große Schäden an Mensch und Natur verursachen, daher wird in dieser Arbeit ein Teil des Verkehrsgeräusches, die Reifen-Fahrbahngeräusche, untersucht. Ein fahrendes Fahrzeug besitzt unterschiedliche Teilschallquellen, deren Zusammensetzung sich bei Änderung der Fahrgeschwindigkeit und der Motordrehzahl verschiebt. Die Teilschallquellen eines fahrenden PKW sind [1]:

- Motor
- Getriebe
- Ansaugung
- Auspuff und
- Reifen.

Die Automobil- und Reifenindustrie investiert große Geldsummen, um ihre Fahrzeuge und Reifen hinsichtlich ihrer Schallemissionen zu optimieren. Als Beispiel sei hier in Abb. 1.1 die Betriebspunktermittlung für ein neues Messverfahren dargestellt [2]. In aktuellen Vorbeifahrtmessmethoden (z.B. nach SPB, siehe Seite 32) werden theoretische Betriebspunkte des Fahrzeugs angewendet. Damit die Geräuschreduzierung auch wahrnehmbar ist, müssen die Messungen bei Betriebszuständen erfolgen, die im realen Verkehr dominieren. Sie zeigt eine neue Ermittlung des optimalen Betriebspunktes eines Fahrzeuges für die Geräuschemessung. Es wird die relative Fahrdauer in einem Kennfeld bei bestimmten Motordrehzahlen und bei bestimmter Motorleistung aufgetragen. Mit dem neuen Verfahren, bei dem die Geräuschemessungen aus dem Mittelwert der Motorleistung und der zugehörigen Motordrehzahl im zweiten und dritten Gang durchgeführt werden, will man aussagekräftigere Messdaten erhalten. Auf Basis dieser Messungen können dann weitere Geräuschminderungen vorgenommen werden.

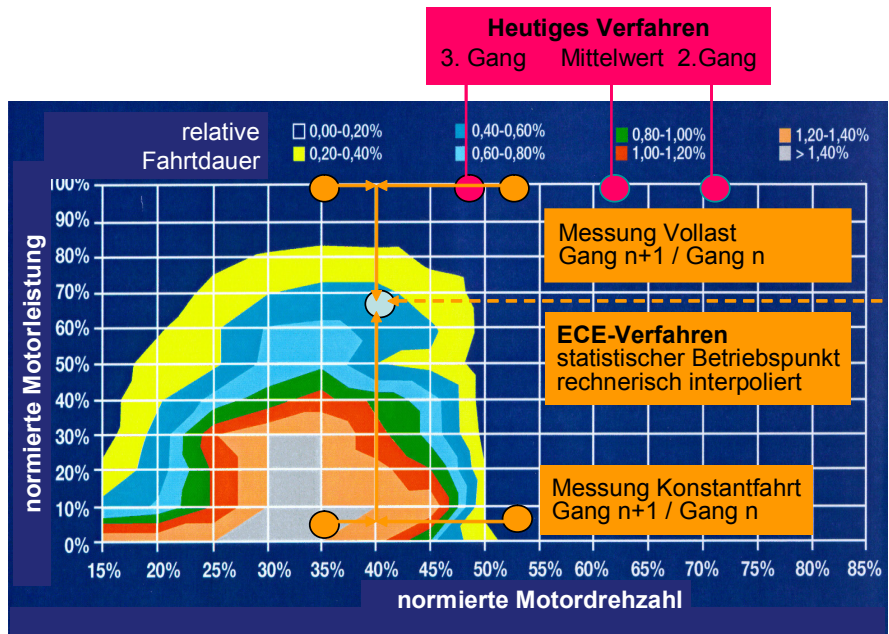


Abbildung 1.1: Ermittlung des optimalen Betriebspunktes im zweiten und dritten Gang [2]

Die Auswirkungen der Fahrgeräusche von Kraftfahrzeugen können objektiv durch Messungen erfasst werden. Sie haben aber vor allem subjektiv auf Menschen, die an viel befahrenen Straßen leben, einen großen Einfluss auf die Lebensqualität. In der Nacht wird Straßenlärm von Betroffenen als störender empfunden als tagsüber. Lärm ist ein wesentlicher Stressfaktor und kann zu physischen und psychischen Störungen wie Herz-Kreislauferkrankungen, Schlaf- und Konzentrationsstörungen und Störungen des sozialen Verhaltens führen [3]. Um solche Lärmbelastungen vermeiden zu können, werden im Straßenbau, im Fahrzeugbau und der Reifenbranche lärmreduzierende Maßnahmen getroffen. Im Straßenbau verwendet man schallmindernde Straßenbeläge und Lärmschutzwände, um die betroffenen Anrainer zu schützen. Im Fahrzeugbau werden Maßnahmen zur Lärminderung am Motoren- und Getriebegeräusch sowie der Aerodynamik der Außenkonstruktion der Fahrzeuge vorgenommen. Die Reifenindustrie reagiert durch Anpassung der Profilierung sowie dem Reifenaufbau und des verwendeten Materials auf das Straßenlärmproblem. Dennoch ist es wichtig, die lärmverursachenden Mechanismen genau zu erforschen, um den entstehenden Verkehrslärm für Mensch und Umwelt weiter zu reduzieren. Für solche Untersuchungen des entstehenden Verkehrsgeräusches gibt es verschiedene Prüfstände, an denen u. a. das Reifen-Fahrbahngeräusch gemessen werden kann. Prüfstände, wie der Innentrommelprüfstand Fahrzeug-Fahrbahn der BAST (Bundesanstalt für Straßenwesen) [4] in Bergisch-Gladbach, aber auch der Akustik-Allrad-Rollenprüfstand des KIT (Karlsruher Institut für Technologie) [5], Einzelrollenprüfstände [6] wie sie jeder Reifenhersteller besitzt oder Flachbahnprüfstände [7] vieler Fahrzeughersteller, die für akustische Messungen eingesetzt werden. Dabei kann jedoch oft der Einfluss des Straßenbelags und der Reifen-Fahrbahnkontakt nicht ausreichend genau abgebildet werden.

Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) der Bundesanstalt für Straßenwesen Der PFF der BAST (siehe Abb. 1.2) zählt zu der Klasse der Innentrommelprüfstände. Der Prüfstand besteht aus einem großen drehbaren Fahrbahnring sowie einem innenlaufenden Prüfreifen. Der Prüfreifen läuft unter vorgegebenen Bedingungen in diesem Fahrbahnring. Es können u. a. die Geschwindigkeit des Reifens auf der Fahrbahn, die aufgebrachte Last, die Art des Reifens, verschiedene Fahrbahnbeläge, unterschiedliche Fahrbahnübergänge und vieles mehr simuliert werden. Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat es sich

zur Aufgabe gemacht, durch die Ergebnisse der Erforschung des Reifen-Fahrbahnverhaltens die verkehrsbedingte Umweltbelastung, sowie die Belästigung von Anrainern durch Verkehrslärm zu reduzieren. Der PFF ermöglicht die Untersuchung des Reifen-Fahrbahngeräusches unter reproduzierbaren Bedingungen sowie Schnell- und Dauerlauftests für Reifen. Zudem ist die Ermittlung des Rollwiderstands und die Standfestigkeit von Fahrbahndecken möglich.

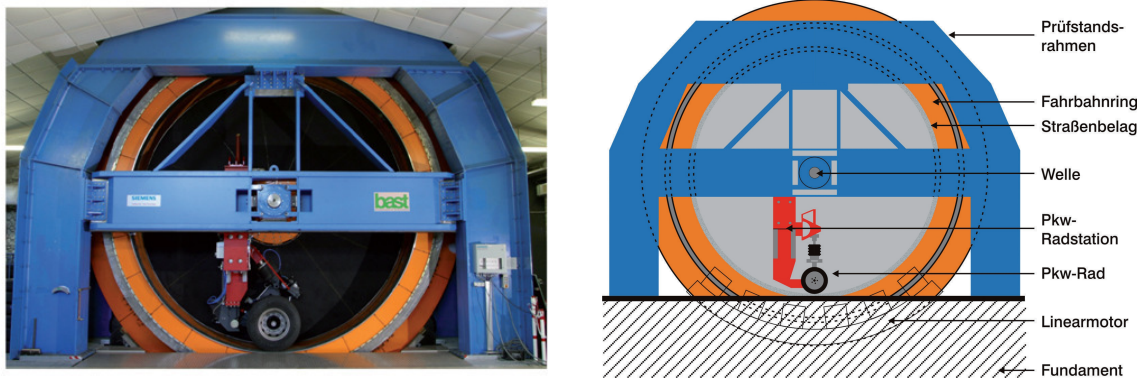


Abbildung 1.2: a) Lichtbild des PFF und b) schematische Darstellung [4]

Der drehbare Fahrbahnring des PFF hat einen Innendurchmesser von 5.5 m bei einer Masse von 32 t und ist über 12 Speichen auf einer Welle befestigt. Mittels eines zentralen Wälzlagers wird die Welle gestützt. Zur Vermeidung von Luftverwirbelungen sind die Speichen mit einem schallabsorbierenden Material ausgekleidet. Im Inneren des Rings ist eine Aufnahmevorrichtung für verschiedene Prüfreifen und Prüfbedingungen (z.B. Last, Schräglage, etc.) [4]. Der Straßenbelag wird durch 18 Fahrbahnkassetten mit 50 cm (4 mm Füllhöhe) und 85 cm (8 mm Füllhöhe) Breite am angetriebenen Fahrbahnring eingebracht. Dabei sind die Fahrbahnkassetten austauschbar und dienen der Simulation verschiedener Fahrbahnoberflächen (Asphalt, Beton,...) oder unterschiedlicher Fahrbahnübergänge. Für Prüfräder sind 2 verschiedene Radstationen, für PKW-Prüfreifen und für LKW-Prüfreifen, verfügbar. Für LKW-Reifen ist eine Höhenverstellung sowie die Anwendung von Rädern von 17.5" bis 22.5" Durchmesser möglich. Für die PKW-Reifen gibt es zusätzlich zur Höhenverstellung die Möglichkeit zur Lenkwinkelverstellung ($\pm 15^\circ$) sowie zur Rollwiderstandsmessung. Für die Messungen können Lasten von bis zu 6500 kg auf den Reifen sowie Geschwindigkeiten von bis zu 280 km/h erreicht werden.

Für die Messungen am PFF sprechen die Voraussetzungen für die Wiederholbarkeit durch reproduzierbare Prüfbedingungen (z.B. der Streckenabschnitt, der durch die Fahrbahn im Ring dargestellt wird, die aufgebrachte Last, die Umgebungstemperatur uvm.) der Messungen sowie eine angedachte Vergleichbarkeit mit anschließenden Freifeldmessungen, die mittels Prüfanhänger durchgeführt werden.

Hierbei soll auch ein besonderer Dank an die BAST, Dr. Bartholomäus, Herrn Steinheuer, Frau Sammet und Herrn Strigari gehen, die uns bei den Messungen betreut und stets mit Rat und Tat unterstützt haben. An dieser Stelle geht auch mein persönlicher und großer Dank an den Betreuer dieser Diplomarbeit, DI Gombots und Prof. Kaltenbacher!

Kapitel 2

Grundlagen

Es werden zunächst die physikalischen Schallfeldgrößen kurz beschrieben. Danach werden bekannte Mechanismen, welche im Zusammenhang mit der Reifen-Fahrbahn-Interaktion stehen, vorgestellt und erläutert.

2.1 Schwingungen und Schall

Schwingungen lassen sich sehr einfach am Beispiel einer Saite oder eines Pendels erklären. Regt man ein System, z.B. die Saite mit einem Hammer an, entsteht eine freie harmonische Schwingung in seiner Grundform, eines halben Sinus. Zum Zeitpunkt der Anregung befindet sich die Mitte der Saite am tiefsten Punkt, nach der Anregung setzt sich die Welle der Auslenkung entlang der Saite bis zum Einspannpunkt fort und wird dort reflektiert. Durch diesen Mechanismus schwingt die Saite in der Grundschwingung. Dies ist der einfachste Fall der schwingenden Saite, die Schwingungsform bzw. deren Eigenfrequenzen können auch ein vielfaches der halben Schwingung sein. Abbildung 2.1 zeigt die Schwingung einer beidseitig eingespannten Saite nach der Anregung mit einem Hammer sowie die erste und zweite Oberschwingung.

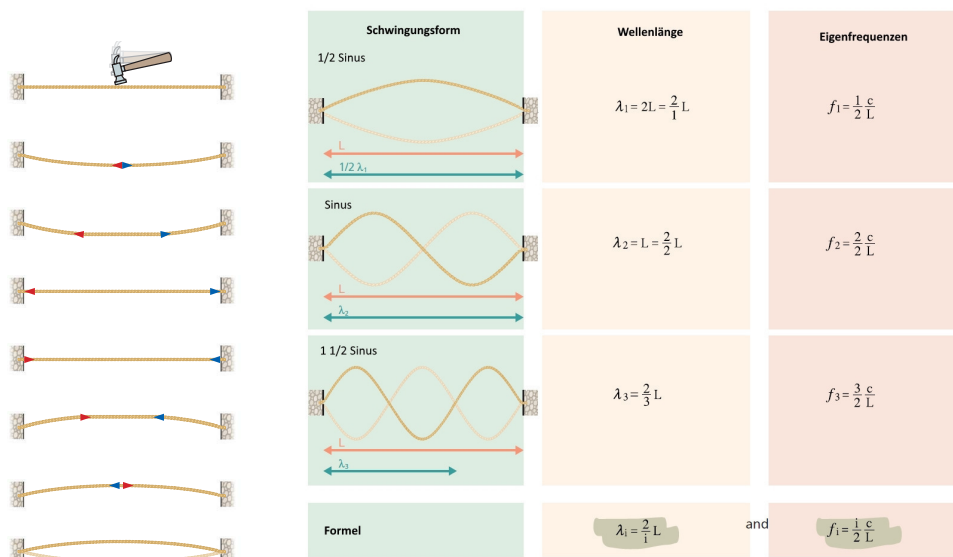


Abbildung 2.1: Anregung und Schwingen einer beidseitig eingespannten Saite in ihrer ersten Eigenschwingungsform einer halben Sinusschwingung. [8]

Luftschwingungen führen zu Schall, der durch schwingende Luftmoleküle, die im umgebenden Atmosphärendruck Unterschiede erzeugen. Es bilden sich Zonen, in denen die Luftteilchen verschieden komprimiert sind. Diese Druckunterschiede werden durch das Ohr registriert und als Geräusch wahrgenommen. Abbildung 2.2 zeigt die unterschiedlichen Druckverteilungen der Luftmoleküle und ihre Auswirkung auf den umgebenden Druck:

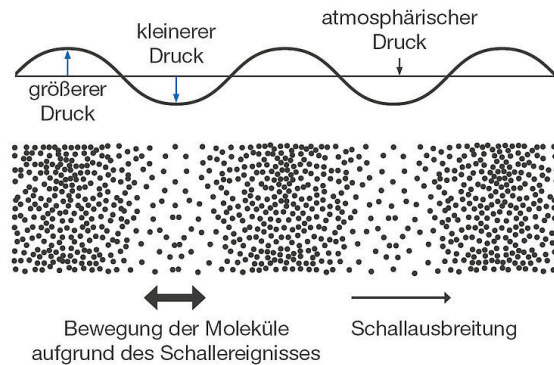


Abbildung 2.2: Grafische Darstellung der Luftschwingungen und Druckunterschiede. [9]

2.1.1 Schwingungsklassifizierung

Schwingungen sind zeitliche Vorgänge mit bestimmten Wiederholungsmerkmalen, anhand derer der Schwingungsverlauf einer Signalklassifikation zugeordnet werden kann. Die Grundformen von Schwingungen sind:

- Periodische Schwingungen, siehe Abb. 2.3

Für periodische Schwingungen gilt allgemein

$$x(t) = x(t + T) \quad (2.1)$$

sowie

$$T = 1/f, \quad (2.2)$$

dabei bezeichnet T die Periodendauer und f die Frequenz, d.h. die Schwingung wiederholt sich regelmäßig nach der Periodendauer T . Periodische Schwingungen lassen sich als Fourierreihe darstellen. Die Schwingung lässt sich aus einer Summe von harmonischen Komponenten zusammensetzen:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi f_k t + \Phi_k) \quad (2.3)$$

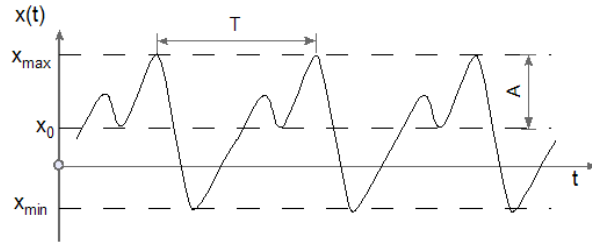


Abbildung 2.3: Beispiel einer periodischen Schwingung. [10]

- Harmonische Schwingungen

Die harmonische Schwingung $x(t)$ tritt in Form einer Sinus- bzw. Kosinusschwingung mit einer zeitlichen Abhängigkeit (t) auf. Sie kann durch die Amplitude A , die Frequenz f und den Phasenwinkel Φ vollständig beschrieben werden

$$x(t) = A \sin(2\pi ft + \Phi). \quad (2.4)$$

Abbildung 2.4 zeigt einen harmonischen Schwingungsverlauf:

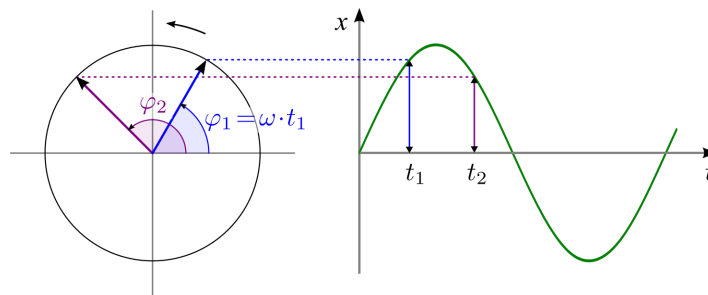


Abbildung 2.4: Beispiel einer harmonischen Schwingung. [11]

- Stochastische Schwingungen - Rauschen

Schwingungen mit Zufallsverteilung fallen in die Klasse der stochastischen Schwingungen. Das sog. Rauschen entsteht durch eine stochastische Schwingung mit kontinuierlicher Frequenzverteilung über einen breiten Frequenzbereich.

In der Akustik kommen hauptsächlich periodische Schwingungen zur Anwendung. Für die Beschreibung und Quantifizierung sind Schallfeldfrößen definiert.

2.2 Schallfeldgrößen

Die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung von Schallfeldern sollen im Folgenden kurz beschrieben werden.

Schalldruck Schall entsteht durch Schwingungen in einem kompressiblen Medium. Dem umgebenden Medium mit dem Luftdruck p_0 wird in Form von Schwingungen ein Schallwechseldruck p_a überlagert. Der Luftdruck auf Meereshöhe beträgt normgemäß $p_0 = 101325 \text{ Pa} \approx 1 \text{ bar}$ (p_a berechnet sich aus der Druckkraft auf eine Fläche, z.B. die Fläche einer Membran (A) eines Mikrofons $p_a = F/A$).

Der Schalldruck kann mithilfe eines Messmikrofons gemessen werden und wird häufig als Schalldruckpegel L_{p_a} angegeben:

$$L_{p_a} = 10 \log \left(\frac{\frac{1}{T_m} \int_{t_1}^{t_2} p_a^2 dt}{p_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p_{\text{eff}}}{p_0} \right), \quad (2.5)$$

mit T_m der Messzeit und p_0 dem Bezugsdruck (der Hörschwelle des Menschen) mit $20 \mu\text{Pa}$. Abbildung 2.5 veranschaulicht den Schalldruck zum Umgebungsdruck:

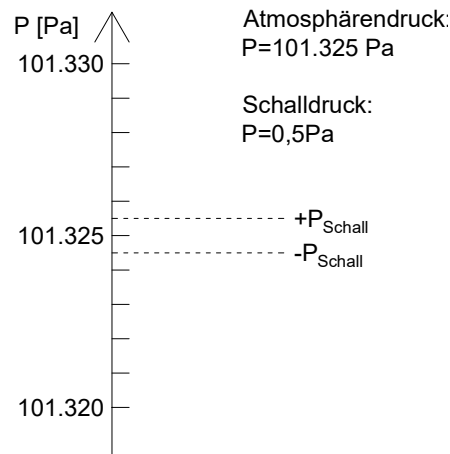


Abbildung 2.5: Schalldruck und Umgebungsdruck. [12]

Schallschnelle Aus dem Schalldruck kann die Schallschnelle abgeleitet werden, die die Schwingungswechselgeschwindigkeit der Luftteilchen, die den Schall erzeugen, angibt. Die Schallschnelle ist als zeitliche Ableitung der Auslenkung ξ eines Teilchens definiert:

$$\mathbf{v} = \frac{d\xi}{dt}. \quad (2.6)$$

Bei einer ebenen Welle ergibt sich über die akustische Impedanz

$$Z_0 = \rho_0 c_0 \quad (2.7)$$

der Zusammenhang zwischen dem Druck p_a und der Geschwindigkeit v :

$$v = \frac{p_a}{c \rho_0} \quad (2.8)$$

mit c als der Schallgeschwindigkeit für Luft ($c = 343,2 \text{ m/s} = 1236 \text{ km/h}$) bei einem Umgebungsdruck von $p_0 = 1 \text{ bar}$, einer Dichte des umgebenden Mediums von $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$) und einer Umgebungstemperatur von $T_U = 20^\circ\text{C}$.

Schallintensität Die Schallintensität ist die Schalleistung je Flächeneinheit und ergibt sich aus dem Produkt von Schallschnelle und Schalldruck:

$$\mathbf{I}_a = p \mathbf{v} \quad (2.9)$$

Die Einheit der Schallintensität ist W/m^2 , und ist wie die Schallschnelle eine vektorielle Größe.

Schalleistung Die akustische Schalleistung ist die abgegebene Energie pro Zeiteinheit einer Schallquelle. Sie ergibt sich aus der Integration der Schallintensität über eine geschlossene Hüllfläche dA :

$$P_a = \oint_A I_a \, dA = \oint_A p_a v_a \cdot n \, dA. \quad (2.10)$$

Die Einheit der Schalleistung P_a ist W .

2.3 Reifen-Fahrbahngeräusch

Das gesamte Verkehrsgeräusch hat zunehmend Einfluss auf den Menschen und die Natur. Bei stärker werdendem Verkehrslärm können erhebliche gesundheitliche Folgen für Anrainer entstehen, das Verhalten von Tieren wird beeinflusst und Pflanzen können im Umfeld von stark befahrenen Straßen absterben. Der Mensch hat eine subjektive Wahrnehmung von Lärm, zum Beispiel wird Musik, als nicht störend empfunden, während unerwünschte Geräusche wie zum Beispiel das Kratzen von Fingernägeln auf einer Tafel bei gleicher Lautstärke als unangenehm empfunden wird. Abbildung 2.6 zeigt verschiedene Geräusche mit dem Einfluss auf das Wohlbefinden des menschlichen Hörempfindens. Lärm kann daher auch auf die menschliche Gesundheit erhebliche Auswirkungen haben. Nach [3] und [13] näher untersucht, zählen dazu u. a.:

- Schlafstörungen mit allen kurz- und langfristigen Konsequenzen
- Kreislaufbedingte Erkrankungen
- hormonelle Störungen (Stresshormone)
- Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit
- Störungen des sozialen Verhaltens
- Beeinträchtigung der Sprache und Kommunikation
- uvm..

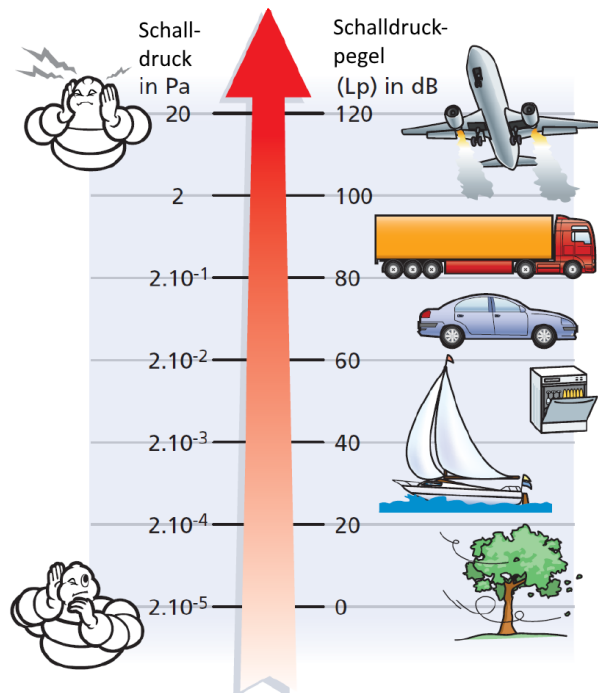


Abbildung 2.6: Störwirkung der Schallempfindung bei steigendem Schalldruck. [8]

Der Einfluss von Schwingungen auf den menschlichen Körper In 2.1 ist die Entstehung des Schalls durch Schwingungen erklärt worden, die vom menschlichen Ohr als Geräusche wahrgenommen werden. Eine Person kann Schwingungen ab 0.015 m/s^2 verspüren, ab einer Beschleunigung von 1 m/s^2 werden Schwingungen als unangenehm empfunden. Schwingungsfrequenzen werden vom Körper, abhängig vom Körperteil, schon von 0.5 bis 50 Hz wahrgenommen. Das Ohr ist fähig, Schall im Bereich von 20 bis 20000 Hz zu hören [8]. Die Wahrnehmung von Geräuschen setzt sich aus dem Geräuschpegel und der Frequenz zusammen, siehe Abb. 2.7. Die untere Hörgrenze liegt bei $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ und 1000 Hz, was einem Schalldruckpegel von 0 dB entspricht. Für die Schmerzgrenze kann bei gleichem Schalldruck ein Pegel von 140 dB bei 1000 Hz oder von 120 dB bei 5000 Hz gelten. Daher ist die Schallwahrnehmung auch von der Klangfarbe abhängig. Die Hörempfindlichkeit ist bei tiefen Tönen niedriger als bei hohen Tönen. Daraus ergibt sich die Bewertung von Schalldruckpegeln. Der A-bewertete Schalldruckpegel gilt für Umgebungsgeräusche, wie sie z.B. im Straßenverkehr vorkommen. Daneben gibt es die B-Bewertung für mittlere, die C-Bewertung für sehr laute und die D-Bewertung für extrem laute Geräusche, auf die hier jedoch nicht näher Eingegangen wird, siehe [14]. Abbildung 2.7 zeigt die Kurven gleicher Lautstärkewahrnehmung in Abhängigkeit von der Frequenz und die verschiedenen Bewertungskurven für verschiedene Schalldruckpegel abhängig von der Frequenz:

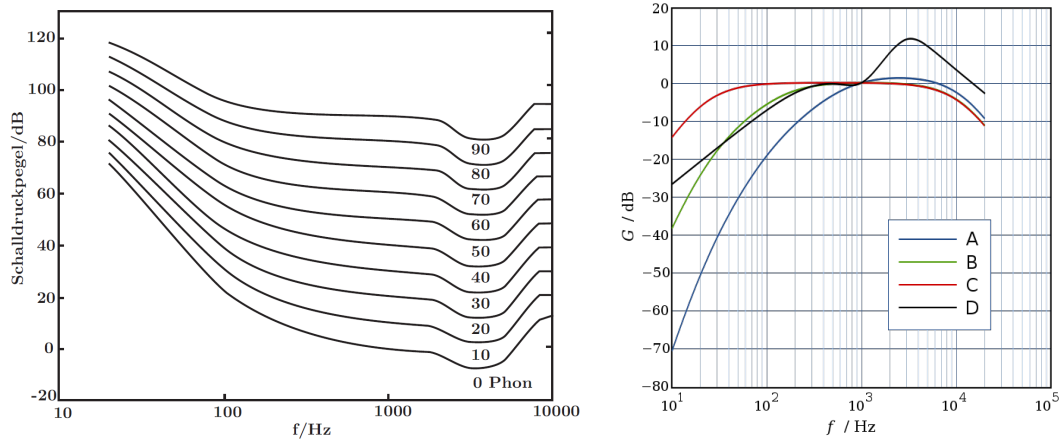


Abbildung 2.7: Kurven gleicher Lautstärkewahrnehmung und Bewertungskurven für unterschiedlich hohe Schalldruckpegel. [15], [16]

Die Mechanismen für die Entstehung des Verkehrsgeräusches werden zunehmend ernst genommen und wissenschaftlich untersucht, um sie besser verstehen zu können und Lösungen zu finden, um diese zu vermindern und in erträgliche Bereiche zu optimieren. Das Verkehrsgeräusch setzt sich aus verschiedenen Anteilen zusammen. Ab einer Geschwindigkeit von ca. 30 km/h bis ca. 80 km/h, abhängig vom betrachteten Fahrzeug, überwiegt jedoch das Rollgeräusch des Reifens auf dem Straßenbelag. In der vorliegenden Arbeit soll dieses näher betrachtet werden. Beim Reifen-Fahrbahngeräusch sind mehrere Mechanismen beteiligt, die durch die Schallfrequenz und den Schalldruckpegel charakterisiert werden. Die Geräusche entstehen dabei in drei charakteristischen Zonen, der Einlaufzone des Reifens, der Kontaktzone und der Auslaufzone.

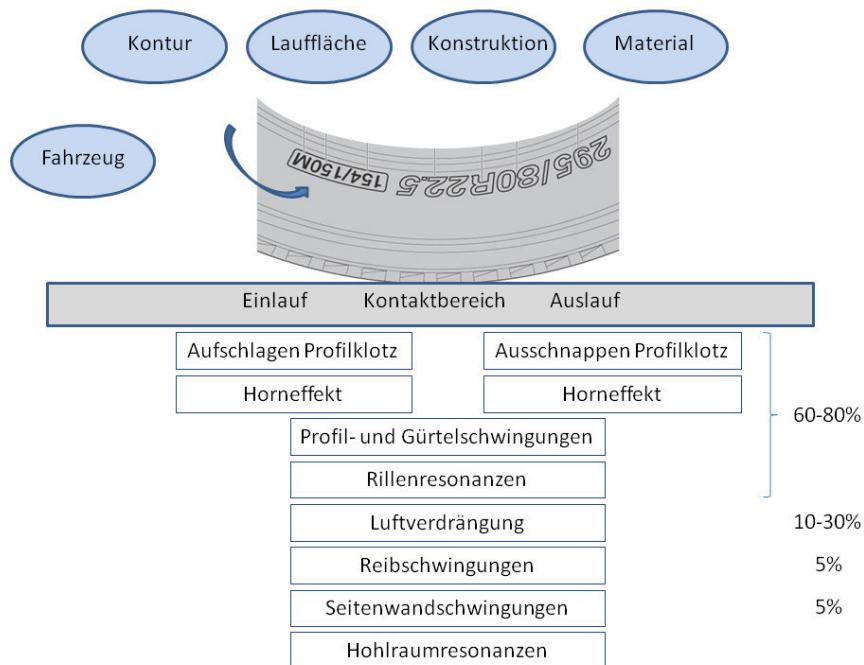


Abbildung 2.8: Geräuschmechanismen am Reifen. [1]

Abbildung 2.8 zeigt die verschiedenen Geräuschmechanismen und veranschaulicht diese jeweils auf ihren Entstehungsbereich, die Einlauf-, die Kontaktzone und die Auslaufzone des Reifens am Straßenbelag. Die einzelnen Geräuschmechanismen haben unterschiedliche Auswirkungen auf die entstehenden Außen- und Innengeräusche des Fahrzeugs. Es wird hierbei zwischen mechanischer Anregung und aerodynamischer Anregung unterschieden. In Abb. 2.9 sind diese Anregungsmechanismen übersichtlich dargestellt:

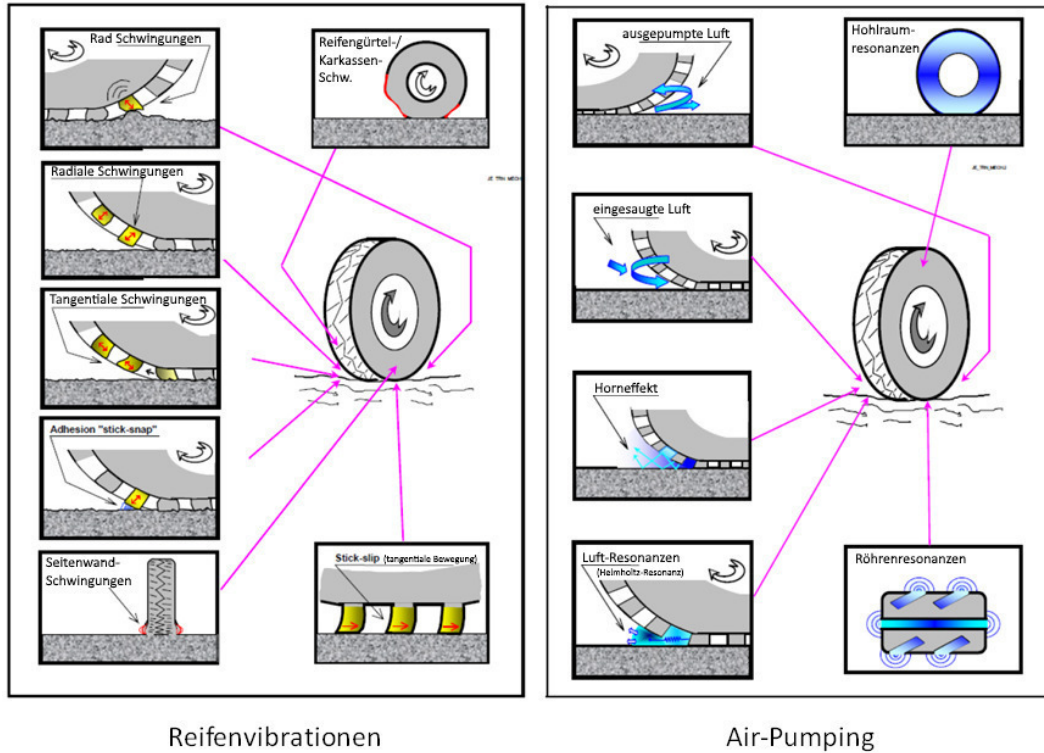


Abbildung 2.9: Reifenvibrationen und Air-Pumping. [17]

In der Einlauf- und Auslaufzone entstehen die Geräusche durch das Aufschlagen bzw. das Ausschnappen der Profilklötze, indem die Schwingungen der Klötze die Luft zu Schwingungen anregen. Durch den Horneffekt kommt es zudem in der Auslaufzone zu einer Schallverstärkung. Im Kontaktbereich des Reifens mit der Fahrbahn entsteht das Geräusch durch Profil- und Gürtelschwingungen, Luftverdrängung, Reibschwingungen, Seitenwandschwingungen und Hohlraumresonanzen. Diese Mechanismen haben den größten Anteil an der Entstehung des Rollgeräusches. Die Luftverdrängung (Air-Pumping) hat einen Anteil von ca. 10 – 30 % auf das Abrollgeräusch (siehe Abb. 2.8). Es werden im nächsten Abschnitt die Geräuschmechanismen erläutert, die Einfluss auf das Reifen-Fahrbahngeräusch haben. Die Einteilung erfolgt nach der mechanischen- und der aerodynamischen Anregung des Reifens zu Schwingungen des Materials, der Luft und der Fahrbahntextur, die sowohl Einfluss auf die mechanische als auch auf die aerodynamische Anregung hat.

2.3.1 Mechanische Anregung

Mechanische Schwingungen entstehen, wenn die Profilklötze in der Kontaktfläche auf der Fahrbahn haften und durch die Rollbewegung beim Verlassen der Fahrbahnoberfläche sich radial und tangential bewegen und elastisch zu schwingen beginnen. Diese Bewegung überträgt sich auf die umgebenden Luftmoleküle, deren Schwingungen als Schall wahrgenommen werden.

Der Reifen als Schwinger und Dämpfer

Durch das Abrollen des Reifens auf der Fahrbahnoberfläche wird der Reifen zu Schwingungen angeregt, die verstärkt oder auch als gedämpft werden können. Der Reifen ist eine komplexe Konstruktion aus verschiedenen Elastomeren, Metallen und Textilien in Lagenaufbau. Um dies zu veranschaulichen zeigt Abb. 2.10 den Aufbau eines Radialreifens.

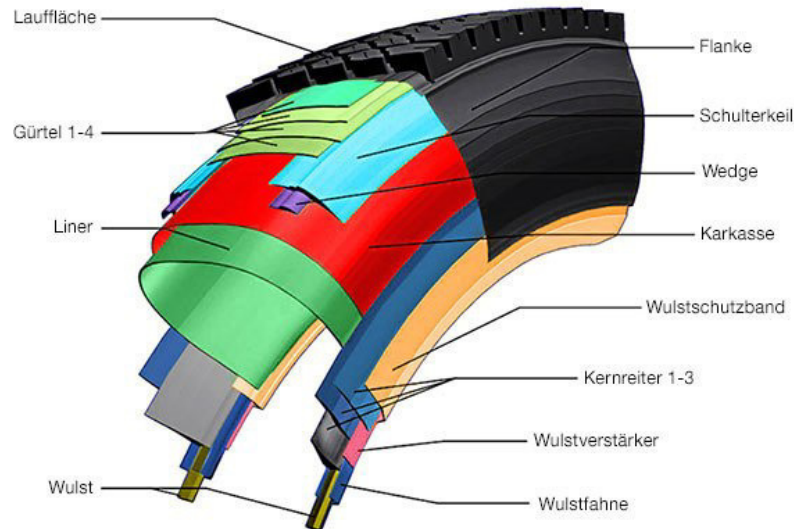


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des Aufbaus eines Radialreifens. [18]

Der Reifenaufbau ermöglicht es, elastisch zum Ausgleich von Unebenheiten zu sein und gleichzeitig besitzt er eine Steifigkeit, die das Fahrzeug trägt. Die Kombination von Flexibilität und Steifigkeit erlaubt eine Krümmung des Materials, jedoch keine Dehnung. Es gibt drei charakteristische Frequenzbereiche, in denen sich der Reifen unterschiedlich verhält: unter 30 Hz weist er das Verhalten einer reinen Sprungfeder auf, zwischen 30 und 250 Hz liegen die Eigenfrequenzen des Reifens und über 250 Hz werden Schwingungen vor und hinter der Kontaktfläche erzeugt. [8]

Unter 30 Hz wird der Reifen bei einem Hindernis komprimiert, wobei er einen Teil der Energie des Aufpralls absorbiert. Dadurch wird der auf das Fahrzeug zu übertragende Stoß abgedämpft und der Fahrkomfort weniger beeinträchtigt. Die Eigenfrequenzen des Reifens zwischen 30 und 250 Hz lassen sich über den Versuchsaufbau, siehe Abb. 2.11, ermitteln. Hierbei wird ein Reifen durch eine aufgebrachte Last auf einer Rüttelplatte angebracht, der Reifenmittelpunkt wird fixiert. Die Platte erzeugt eine Schwingungsanregung, in Form eines weißen Rauschens. Durch am Umfang des Reifens angeordnete Beschleunigungssensoren können die Schwingungen erfasst und die Eigenschwingungsformen ermittelt werden.

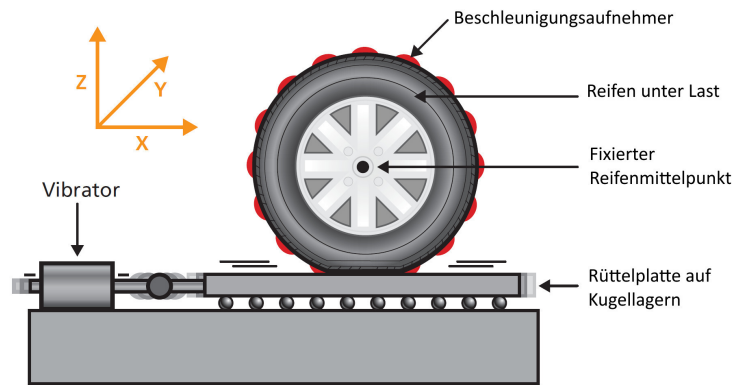


Abbildung 2.11: Versuchsaufbau zur Messung des dynamischen Verhaltens eines Reifens im Frequenzbereich von 30 bis 250 Hz. [8]

Abbildung 2.12 zeigt die verschiedenen radialen und transversalen Eigenformen eines angeregten Reifens, die am Versuchsstand in Abb. 2.11 ermittelt worden sind. Die Verformungen sind für das Auge nicht wahrnehmbar, daher sind sie hier überzeichnet dargestellt:

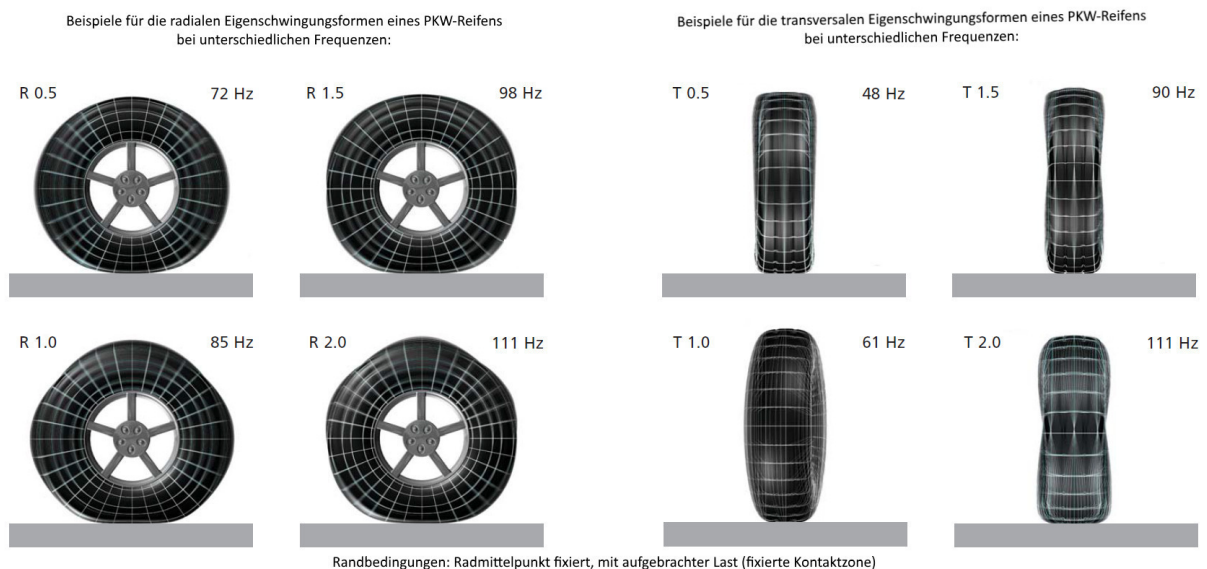


Abbildung 2.12: Radiale und transversale Schwingungseigenformen eines PKW-Reifens. [8]

Jeder Reifen hat unterschiedliche Eigenfrequenzen, abhängig von der jeweiligen Steifigkeit, Masse und Dimension. Die dynamische Steifigkeit (eines rollenden Reifens) ist 10 bis 15 mal höher als seine statische Steifigkeit (im Stillstand). [8]

Mittels des Versuchsaufbaus (Abb. 2.13) kann das Verhalten eines Reifens über 250 Hz gezeigt werden.

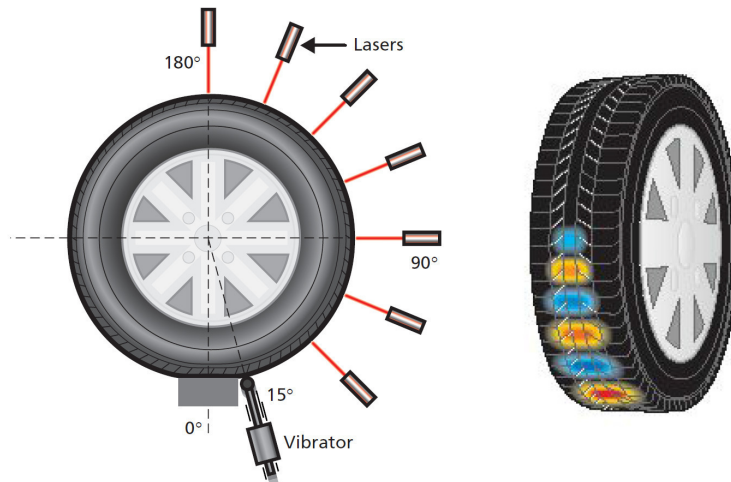


Abbildung 2.13: Versuchsaufbau für das Reifenverhalten über 250 Hz. Im linken Bild ist schematisch der Versuchsaufbau dargestellt, rechts sind die entstehenden Schwingungen an der Lauffläche farblich gekennzeichnet. [8]

Ein Reifen wird hierbei auf einer Auflagefläche fixiert und nahe der Kontaktfläche mit einem Vibrator angeregt. Die Messung der Reifenschwingungen durch mehrere Laser ergibt eine maximale Schwingung in der Nähe der Kontaktfläche und ein rasches Abklingen davon weg. Dies liegt an einer größeren Dämpfung bei höheren Frequenzen als 250 Hz, durch die visko-elastischen Eigenschaften und die verschiedenen Gummiwerkstoffe des Reifens. Der Reifen schwingt nur im Bereich vor und hinter der Kontaktfläche, sodass kaum Schwingungen an das Fahrzeug weitergegeben werden.

Der Reifen hat also unter 30 und über 250 Hz dämpfende Eigenschaften, dazwischen liegen die Eigenfrequenzen, die zu merklicher Schwingungsanregung führen.

Durch die mechanischen Anregungen des Reifens entstehen beim Abrollen Schwingungen im elastischen Reifenmaterial. Diese Schwingungen können auf unterschiedliche Teilbereiche des Reifens, wie den Reifenmantel oder die Profilklotze wirken und unterschiedliche Geräuschanteile auslösen. Geräusche durch sogenannte Strukturschwingungen können aufgrund verschiedener Mechanismen entstehen. Die Schwingungsanregung des Reifens kann durch das Aufschlagen und Ausschlagen des Profilklotzes sowie durch Seitenwandschwingungen des Reifens entstehen. Die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche (Fahrbahntextur, siehe Kap. 2.3.3) hat ebenfalls einen Einfluss auf die Frequenz des entstehenden Reifen-Fahrbahngeräusches. Je nach Fahrbahnoberfläche kann der Reifen zu unterschiedlichen Schwingungen angeregt werden. Die durch mechanische Schwingungsanregung entstehenden Geräusche liegen im tieferen und mittleren Frequenzbereich, bis ca. 1000 Hz [19]. Es werden die verschiedenen mechanischen Anregungsmechanismen im Einzelnen vorgestellt:

Reifenmantel- und Seitenwandschwingungen des Reifens Reifenmantelschwingungen entstehen durch die elastische Verformung des Reifens beim Abrollen. Das Reifenmaterial wird in der Kontaktzone gestaucht und durch den gleichbleibenden Reifeninnendruck an der Oberseite des Reifens gedehnt. Durch die Wechselbeanspruchung beim Rollen wird der Reifenmantel zu Schwingungen angeregt, die sich am Umfang fortpflanzen und ein Geräusch erzeugen.

Wie die Reifenmantelschwingungen entstehen auch die Seitenwandschwingungen des Reifens durch die andauernde Be- und Entlastung des Reifenmaterials. In der Kontaktzone baucht sich der Reifen nach außen, während die Ausbauchung an der Oberseite des Reifens flacher ist. Durch den Reifeninnendruck

hat der Reifen immer eine Ausbauchung, jedoch ist diese in der Kontaktzone größer und an der Oberseite geringer. So entstehen an der Reifenseitenwand Schwingungen, die Geräusche erzeugen.

Aufschlagen und Ausschnappen der Profilklotze Durch das Aufkommen der Lauffläche auf die Fahrbahn wird der Reifen ebenfalls zu Schwingungen angeregt. Die Verformung der Kontaktfläche erlaubt kein reines Rollen, die Klötze schlagen in der Einlaufzone auf die Fahrbahn und geben die Schwingung an den gesamten Reifen weiter. Die Frequenzen durch diesen Effekt liegen bei 300 bis 1500 Hz. Die Berechnung der Frequenzen hängt von der Wellenlänge, bestimmt durch die Länge der Profilklotze und der Fahrgeschwindigkeit ab [20]:

$$f = v/l_{\text{Klotz}} \quad (2.11)$$

mit l_{Klotz} der Klotzlänge.

Reibung und Schwingungen der Profilklotze Rollt ein Reifen auf der Fahrbahn, haftet er durch Reibung darauf. Sie setzt sich aus Haftungs- und Gleitanteilen zusammen. Je nach Textur der beiden beteiligten Materialien kann ein zischendes oder pfeifendes Geräusch entstehen.

Abbildung 2.14 zeigt die Verformung der Profilklotze während des Abrollens. Die vier Phasen dabei sind:

1. In der Einlaufzone berührt der Klotz die Fahrbahn
2. Um in Kontakt mit dem ersten Berührungspunkt auf der Straße zu bleiben, verformt sich der Profilklotz stärker. Bei der Verformung wird Energie gespeichert.
3. Die Profilklotze beginnen in der Auslaufzone ihren Halt zu verlieren, Haftung und Gleiten wechselt sich ab. Dabei wird Energie wieder freigesetzt und der Klotz beginnt zu schwingen.
4. Beim Verlassen der Kontaktzone verliert der Klotz den Kontakt zur Fahrbahnoberfläche und richtet sich plötzlich wieder auf. Die gesamte gespeicherte Energie wird freigesetzt.

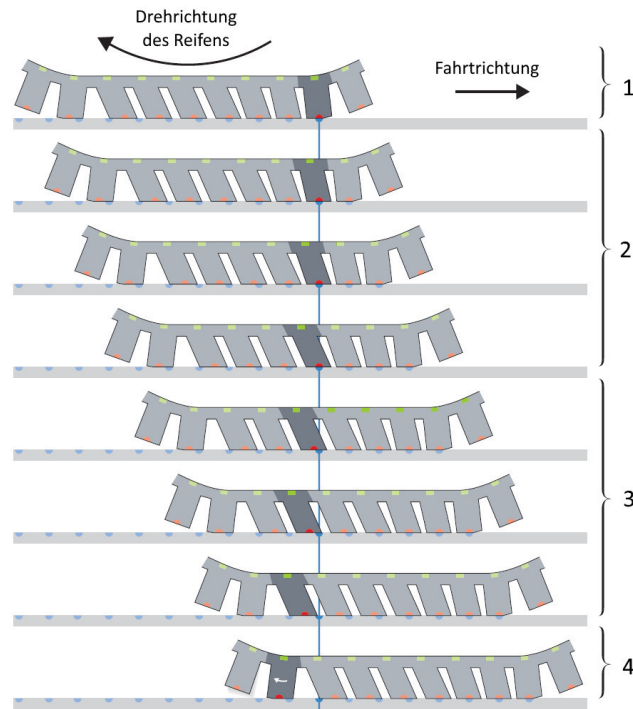


Abbildung 2.14: Detaildarstellung der elastischen tangentialen Bewegungen der Profilklotze während des Abrollens. [8]

Tangentiale Schwingungen der Profilklotze entstehen durch den gleichen Mechanismus wie radiale Schwingungen, durch die elastische Verformung und die darauf folgende Entspannung. Der Profilklotz erfährt durch die Gewichtskraft des Fahrzeugs einen Druck, der ihn zur Seite drängt. Bei der Entspannung in der Reifenauslaufzone schwingt der Profilklotz elastisch in tangentialer Richtung. Die Schwingungen der Profilklotze werden stärker, je schneller das Fahrzeug fährt und die Wechselfrequenz von Druck und Druckentlastung sich erhöht.

Zischende Geräusche entstehen bei der Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit durch das Gleiten der Klötze auf der Fahrbahn. Das Zischen liegt dabei in einem hohen Frequenzbereich von 800 bis 4000 Hz mit geringer Amplitude. Reifenquietschen entsteht durch den gleichen Mechanismus mit größerer Reibung, z.B. beim Bremsen, der Kurvenfahrt oder beim Beschleunigen. Die Klötze gleiten in der Auslaufzone schneller als bei Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit und erzeugen ein lauterer Geräusch.

Adhäsion zwischen Fahrbahnbelag und Reifenprofil „Stick-Snap - Effekt“ Der Stick-Snap - Effekt entsteht, wenn der Profilklotz beim Abrollen des Reifens in der Kontaktzone durch Adhäsion an der Fahrbanoberfläche anhaftet. Durch die Adhäsion haftet das Reifenprofil am Straßenbelag und löst sich beim Abrollen wieder in der Auslaufzone des Reifens. Dadurch entsteht ein schmatzendes Geräusch. Dieser Effekt ist abhängig vom Reifen- und Fahrbahnmaterial sowie deren tribologische Eigenschaften. Je besser ein Reifen auf trockener Fahrbahn haftet, umso intensiver ist das entstehende Geräusch beim Ausschnappen. In Abb. 2.15 ist die Ablösung des Klotzes von der Fahrbahn und die daraus resultierende radiale Schwingung dargestellt:

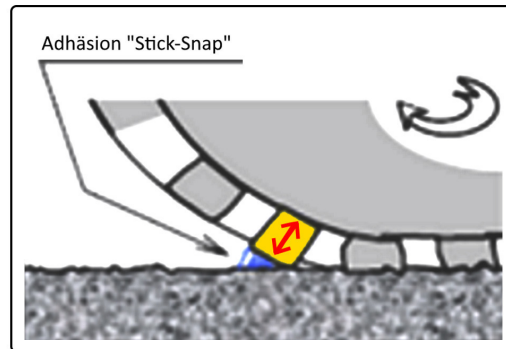


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung des ausschnappenden Profilklotzes in der Auslaufzone. [17]

Die durch den Stick-Snap - Effekt entstandenen Geräusche haben eine Frequenz von 1 bis 2 kHz.

„Stick-slip - Effekt“ Allgemein entsteht der Stick-Slip - Effekt beim Übergang von Haft- auf Gleitreibung. Durch die Relativbewegung zwischen zwei Körpern entsteht Reibung. In der Kontaktzone des Reifens mit der Fahrbahn herrscht beim normalen Abrollen des Reifens Haftreibung. Die Haftreibung ändert sich in Gleitreibung, wenn der Reifen sich weiterbewegt und der Reibkoeffizient nicht mehr für Haftung ausreicht und die Profilklötze über die Fahrbahnoberfläche gleiten. Diese Bewegung regt die Profilklötze zu tangentialen Schwingungen an, die durch die Relativbewegung zwischen Reifenmaterial und Fahrbahnbelag ein Rutschgeräusch erzeugen und durch die tangentialen Schwingungen im Reifenprofil ein Schwingungsgeräusch abgeben. Abbildung 2.16 veranschaulicht die Reibung zwischen den Profilklötzen des Reifens und der Fahrbahnoberfläche.

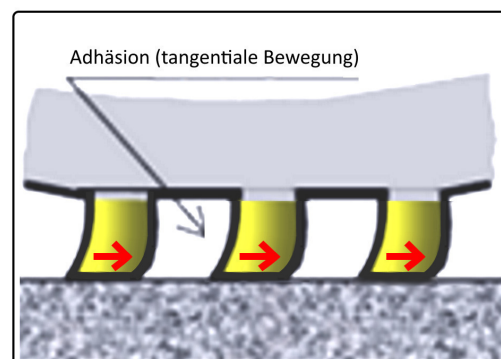


Abbildung 2.16: Schematische Darstellung der auf der Fahrbahn haftenden Profilklötze (tangentiale Schwingungen). [17]

2.3.2 Aerodynamische Anregung

Schall durch aerodynamische Anregung entsteht durch schwingende Luftsäulen sowie Komprimierung von Lufträumen, die sich in der Profilgeometrie bilden. Dieses Phänomen ist auch bei Musikinstrumenten zu beobachten. In Blasinstrumenten entsteht eine schwingende Luftsäule in einem Rohr. Es entsteht ein Ton, dessen Frequenz und Lautstärke durch die Geometrie, der Länge und dem Durchmesser sowie durch den Luftdruck der Luftsäule bestimmt wird. Beim Reifen-Fahrbahngeräusch tritt dieser Effekt ebenfalls auf. Die „Röhre“ wird durch das Reifenprofil dargestellt und die Luftdruckschwankung ergibt sich durch die Geschwindigkeit, mit der das Fahrzeug fährt.

Lufteinsaugung und Luftverdrängung Der rollende Reifen verdrängt die Luft in der Einlaufzone und der Auslaufzone. In der Einlaufzone wird Luft eingesaugt; Luftmassen die jedoch zu viel für die Einsaugung sind werden hier verdrängt. In der Auslaufzone wird die eingesaugte Luft wieder ausgestoßen. Beide Arten der Luftverdrängung am Reifen erzeugen ein Geräusch, das in Abhängigkeit von der Fahrbahntextur ein unterschiedliches Geräuschspektrum haben kann. Unter der Luftverdrängung beim Reifen-Fahrbahngeräusch versteht man allerdings im Allgemeinen den Luftausstoß in der Auslaufzone. Die Verdrängung der Luft durch Änderung der Kontaktgeometrie beim Rollen des Reifens auf der Fahrbahn wird Air-Pumping genannt. Es entsteht beim Rollvorgang durch die Verformung des Torus der sogenannte Latsch (Bodenaufstandsfläche). In diesem Bereich wird zwischen den Profilklotzen die Luft komprimiert und entweicht am Ende der Bodenaufstandsfläche mit einem zischenden Geräusch. In Abb. 2.17 ist schematisch die Luftströmung im Profil eines rollenden Reifens dargestellt. Im Bereich 1 strömt die Luft ein und wird durch das Rollen zwischen den Profilklotzen eingeschlossen. In Bereich 2 wird die eingeschlossene Luft komprimiert und übt Druck auf die Fahrbahn und die Lauffläche aus. In Bereich 3, der Auslaufzone wird die Luft plötzlich wieder entspannt und entweicht mit einem Zischen. Dieser Effekt verstärkt sich bei glatten Fahrbahnoberflächen, wenn keine oder nur sehr kleine Poren vorhanden sind. Schall entsteht dabei durch die zeitliche Änderung des Luftstroms beim Einsaugen und Ausblasen in und aus den Hohlräumen des Reifens und der Fahrbahn. Dabei sind die Einsaug- und Ausblasstelle räumlich voneinander getrennt. Durch diese räumliche Trennung werden höherfrequente Schallanteile mit $f > 1 \text{ kHz}$ erzeugt. Tieferfrequente Schallanteile bilden sich hingegen unmittelbar an der Kontaktfläche, durch die Kompensation der Gegenphasigkeit der Vorgänge am Profilein- und auslauf. Dabei haben auch die Geometrien des Reifenprofils und der Fahrbahnrauigkeit Einfluss auf die Entstehung des Schalls.

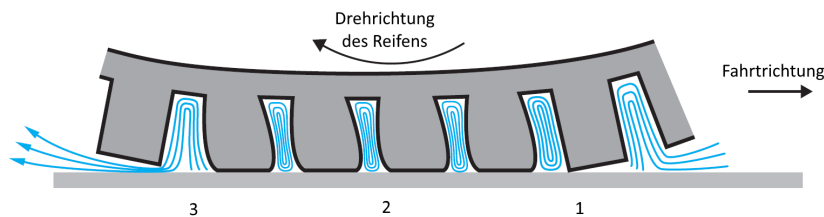


Abbildung 2.17: Schematische Darstellung der ein- und ausströmenden Luft beim Air-Pumping. [8]

Verstärkungseffekte Wenn die komprimierte Luft in der Kontaktfläche im Bereich ihrer Resonanzfrequenz schwingt, verstärkt sich das Geräusch durch die schwingenden Luftsäulen in den vom Profil und der Fahrbahnoberfläche gebildeten Kanälen, Hohlräumen und Begrenzungsflächen. Die durch Resonanzphänomene entstehenden Geräusche liegen im Frequenzbereich von 1000 Hz. Zusammenfassend kann die aerodynamische Anregung durch die Mechanismen Air-Pumping, den Kompressions- und Dekompressionsvorgängen in den Hohlräumen und den Resonanzerscheinungen in offenen Hohlräumen beschrieben werden. Arbeitet ein Resonator nach dem Feder-Masse-Prinzip, wird die Schallenergie in Bewegungsenergie umgesetzt und diese in Wärmeenergie umgewandelt. Die aerodynamische Anregung durch Resonanzphänomene kann somit das Geräusch verstärken oder, wenn die Luft nicht mit der Resonanzfrequenz schwingt, auch dämpfen (siehe Abb. 2.18, [1], [21] und [19]). In 2.18 a) sieht man das Seitenprofil des Reifens und die in die Stollen einströmende Luft. In der Kontaktzone ist die Kompression farblich dargestellt. In 2.18 b) sind die Resonanzen in den Profilknoten dargestellt.

Röhren-Resonanzen im Reifenprofil Der Röhrenresonator arbeitet nach dem Feder-Masse-Prinzip. Der Resonanzkörper ist hier eine Röhre, in der die Luftmassen schwingen. Das Rohr ist an beiden En-

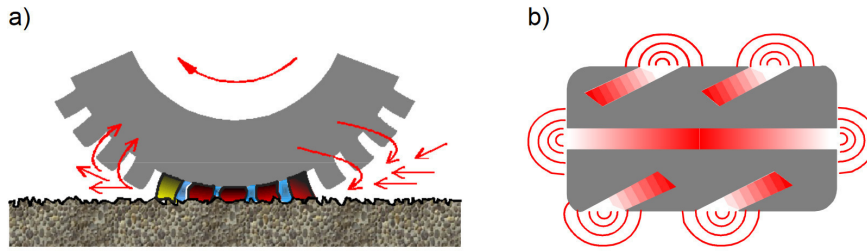


Abbildung 2.18: Aerodynamische Schwingungsanregung am rollenden Reifen. a) Air-Pumping, b) schwingende Luftsäulen in der Reifen-Fahrbahnkontaktfläche (Resonanzschwingungen). [21]

den offen. Wird die Luft zu Schwingungen mit der Resonanzfrequenz angeregt, entsteht ein pfeifendes Geräusch. Bei der Reifen-Fahrbahninteraktion stellt das Reifenprofil die Röhren dar, in denen die Luft schwingt und einen Ton erzeugt. Dieser Effekt kann anschaulich mit einer Orgelpfeife erklärt werden. In den Längsrillen des Reifens schwingt die Luft wie in der Pfeife einer Orgel. Schwingt die Luft hier in der Resonanzfrequenz, wird das Geräusch verstärkt. Abbildung 2.19 zeigt schematisch eine Orgelpfeife mit eingezeichneter halber Wellenlänge.

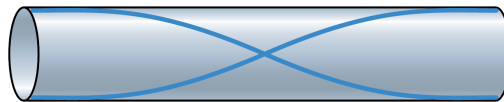


Abbildung 2.19: Orgelpfeife. [8]

Bei Betrachtung des Reifens als Röhrenresonator kann die Röhre dabei an beiden Enden geöffnet sein ($\lambda/2$ - Resonator) oder eine Seite, die andere geschlossen sein ($\lambda/4$ - Resonator). Die Frequenz durch den Röhrenresonanzeffekt liegt zwischen 900 und 2000 Hz. Die Frequenz für den $\lambda/2$ - Resonator wird durch

$$f_n = \frac{nc}{2(L + 0.8d)} \quad (2.12)$$

berechnet. Für den $\lambda/4$ - Resonator ergibt sich

$$f_n = \frac{(n - 1/2)c}{2(L + 0.8d)} \quad (2.13)$$

Darin ist n die laufende Zahl der Frequenz, λ die Wellenlänge, c die Schallgeschwindigkeit und L die Länge der Röhre.

Horneffekt In der Ein- und Auslaufzone des Reifens bildet sich ein Schalltrichter aus, der wie bei einem Blasinstrument die Schallabstrahlung verstärkt. In diesem Trichter, der durch die gekrümmte Lauffläche des Reifens und der Fahrbahnoberfläche gebildet wird, kommt es zu einer Verstärkung des Geräusches. Die Verstärkung durch den Horneffekt bewirkt eine Impedanzanpassung und kann zwischen 7 dB und 20 dB liegen, abhängig von der Frequenz und dem Abstrahlwinkel. Der Frequenzbereich des durch den Horneffekt verstärkten Schalls liegt zwischen 1 kHz und 3 kHz. Je größer der Reifendurchmesser und je geringer die Porosität der Fahrbahnoberfläche sind, desto mehr nimmt der Horneffekt zu. Offenporige Fahrbahnoberflächen dämpfen die Schallabstrahlung, sind also schallabsorbierend, während glatte Deckschichten schallreflektierend wirken [19] und [21]. Dieser Effekt ist in der Auslaufzone stärker als in der

Einlaufzone und kann eine Verstärkung des Geräusches um bis zu 20 dB bewirken [20]. Abbildung 2.20 zeigt schematisch ein rollendes Rad und die Schallabstrahlung durch den Horneffekt sowie den Trichter, der in der Auslaufzone zwischen Reifen und Fahrbahnbelag vorhanden ist [21].

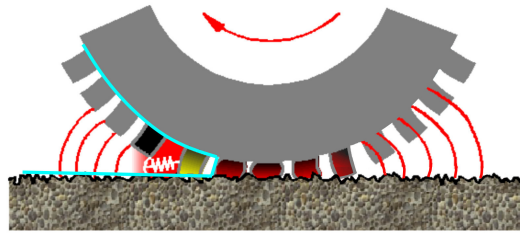


Abbildung 2.20: Horneffekt am rollenden Reifen, der Schalltrichter ist blau dargestellt. [21]

Die Poren des Straßenbelags stellen Hohlräume dar, die für Luft zugänglich sind. Besonders kleine Poren begünstigen die Geräuschbildung. Aus Sicherheitsgründen muss die Fahrbahn aber auch griffig sein, sie muss eine Struktur aufweisen, in der Poren unvermeidbar sind. Die Offenporigkeit der Fahrbahn wird beeinflusst durch die Schichtdicke, den Hohlraumgehalt, dem Strömungswiderstand, den Strukturfaktor und der akustischen Impedanz. Der Hohlraum kann in dem Moment, wenn er sich in der Kontaktfläche des Reifens befindet, als geschlossener Raum betrachtet werden. Kleine Räume weisen diskrete Eigenfrequenzen auf. Durch diese Raummoden entsteht Schall, wenn die Luft im Raum mit nur diesen Frequenzen schwingt. Schwingt die Luft allerdings nicht in der Eigenfrequenz kann es auch zu einer Abbremsung und somit zur Schallabsorbierung kommen.

Luft-Resonanzen durch Strahlung „Helmholtz-Resonanz“ Der Effekt durch die Helmholtz - Resonanz ist im Alltag bekannt, wenn ein Glas oder eine Falsche angeblasen und dadurch ein Ton erzeugt wird. Die Helmholtz-Resonanz entsteht, wenn sich Luftmassen in einem Behältnis mit offenem, kurzem, engem Hals befindet und zu Schwingungen angeregt werden, siehe Abb. 2.21. Dieses System stellt ein Masse-Feder-System dar, das eine ausgeprägte Eigenfrequenz besitzt. Die Luftmasse schwingt im gesamten Luftvolumen und erzeugt sowohl im Resonanzkörper als auch im Hals, der einen beidseitig offenen Resonator darstellt, einen Ton. Bei der Reifen-Fahrbahninteraktion stellen die Hohlräume im Reifenprofil sowie Hohlräume im Fahrbahnbelag mit entsprechender Geometrie solche Systeme dar. Schwingt darin die Luft in der Eigenfrequenz, wird ein Geräusch erzeugt. Die Frequenzen durch die Helmholtz-Resonanz liegen im Bereich von 1000 bis 2500 Hz.



Abbildung 2.21: Helmholtz-Resonator aus Messing, um 1900. [22]

Luftverwirbelungen Der rollende Reifen bewirkt in seiner direkten Umgebung Luftverwirbelungen. Dabei entstehen Geräusche mit ca. 300 Hz. Dieser Effekt kommt nur bei sehr hohen Geschwindigkeiten ($> 130 \text{ km/h}$) vor, daher ist er von untergeordneter Bedeutung bei der Betrachtung des normalen Straßenverkehrs.

2.3.3 Einfluss der Fahrbahntextur

Die Fahrbahnrauigkeit lässt sich mit der Rauigkeitstiefe, der Rauigkeitwellenlänge, der Texturgestalt, dem Strömungswiderstand und dem Reibwert beschreiben. Für die Offenporigkeit geben die Schichtdicke, der Hohlraumgehalt, der Strömungswiderstand, der Strukturfaktor und die akustische Impedanz quantifizierbare Kennwerte. Die Beschreibung der Nachgiebigkeit einer Deckschicht setzt sich aus den Eigenschaften Steifigkeit, Verlustfaktor und der mechanischen Impedanz zusammen.

Für die Beschreibung der Textur im Hinblick auf ihre akustischen Eigenschaften dienen der Wert der Rauigkeitstiefe R_{max} , die Wellenlänge im Maximum der spektralen Hüllkurve λ_{max} und der Gestaltfaktor g . Der Gestaltfaktor g ist eine Kennzahl zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Gestalt von Texturen. Die ideale Fahrbahndeckschicht für beste Geräuschdämpfung setzt sich aus einer Kombination bestimmter Texturwellenlängen, Rauigkeitstiefen und Gestalttypen der verwendeten Materialien zusammen. Die maximalen Texturwellenlängen liegen dabei bei $\lambda_{max} = 4 \text{ mm}$ bis 8 mm . Die optimale Rauigkeitstiefe liegt bei $R_{max} = 60 \mu\text{m}$ bis $200 \mu\text{m}$ und der optimale Gestaltfaktor bei $g = 80 \%$.

Eine solche ideale Fahrbahndeckschicht ist mit gewalzten Oberflächen und schluchtenförmigen Vertiefungen erzielbar. Siehe Abbildung 2.22, sie zeigt das Rauigkeitsprofil auf einer Länge von circa 100 m auf der linken Seite und auf der rechten Seite die Tragflächenkurve. Diese stellt grafisch dar, welcher Tragflächenanteil bei einer bestimmten Profiltiefe erreicht wird. Der Gestaltfaktor, der rechts eingezeichnet ist, ist ein Maß zur Kennzeichnung der Gestalt der Textur.

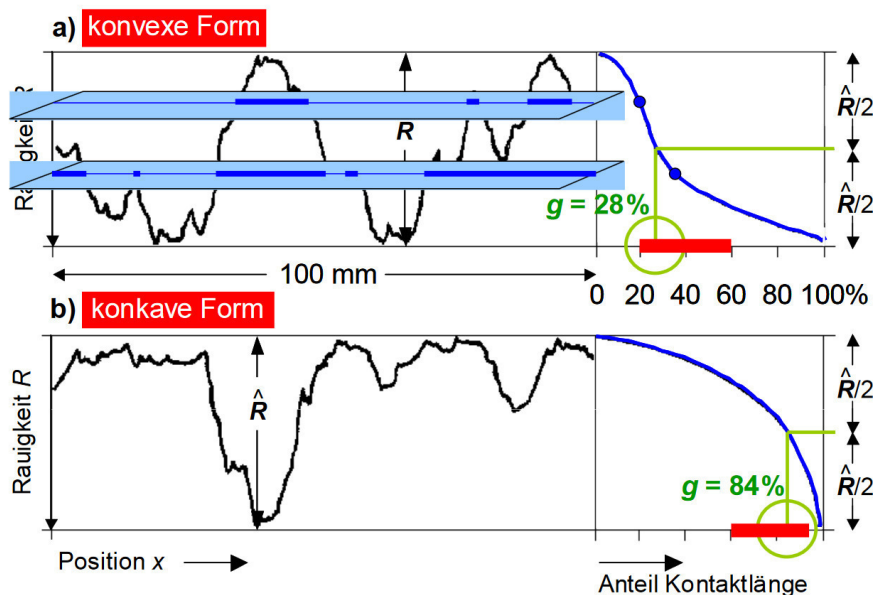


Abbildung 2.22: Konvexe und konkave Form von Straßenbelägen und Gestaltfaktor g . [21]

Geräuschmindernd wirken sich poröse Fahrbahnbeläge durch Schallabsorption aus.

Schall durch mechanische Anregung entsteht, wenn Kontaktkräfte zwischen Reifen und Fahrbahn zeitlich variieren. Solche Kraftänderungen können durch Unrundheit des Reifens, Inhomogenitäten im Reifenmaterial, schadhafter Reifenoberfläche, der Reifenprofilierung, Luftkammern oder Taschen im Profil, dem

Klotzaufschlag in Verbindung mit der Fahrbahntextur oder durch den Reifenaufbau entstehen.

Die Schallentstehung wird beeinflusst von den elastischen Eigenschaften der Seitenwände, der Reifenbreite, den Reifenabmessungen und dem verwendeten Material. Unrundheit des Reifens kann durch die beim Rollen angeregten Schwingungen entstehen. Der Reifen kann unterschiedliche Schwingungsformen in alle Richtungen sowie durch Biegung und Torsion eine unrunde Form annehmen. Je nach Steifigkeit des Reifenmaterials kann der Reifen Unebenheiten des Fahrbahnbelages dämpfen, jedoch entstehen dadurch auch Rollgeräusche.

Bei rauher Oberfläche entsteht im Frequenzbereich von 80 Hz bis 400 Hz ein Dröhnen bis Heulen, bei glatterer Oberfläche entsteht im Frequenzbereich von 200 Hz bis 3 kHz ein Heulen beziehungsweise ein Singen und bei sehr glatter Oberfläche entsteht beim Abrollen ein Zischen mit einer Frequenz von 1.5 kHz bis 6 kHz [1].

Die Fahrbahntextur kann durch ihre Porosität schallabsorbierend oder schallreflektierend wirken. Offenporige Deckschichten dämpfen die Schallausbreitung und wirken dämpfend, während Deckschichten mit geringer Porengröße den Schall reflektiert und verstärkt. Die dämpfende Wirkung von Straßenbelägen ist frequenzabhängig, empirische Ermittlungen haben eine Dämpfung von ca. 10 dB im Frequenzbereich um 1 kHz ergeben. In höheren oder niedrigeren Frequenzbändern sind keine oder nur geringe Dämpfungen feststellbar. Die Dämpfung durch eine offenporige Deckschicht wirkt sich neben dem Reifen-Fahrbahngeräusch auch auf das Antriebsgeräusch des Fahrzeugs auf den Schallpegel aus [21]. Abbildung 2.23 zeigt je eine schematische Abbildung und ein Lichtbild eines offenporigen, eines hohlraumreduzierten und eines dichten Fahrbahnbelages:

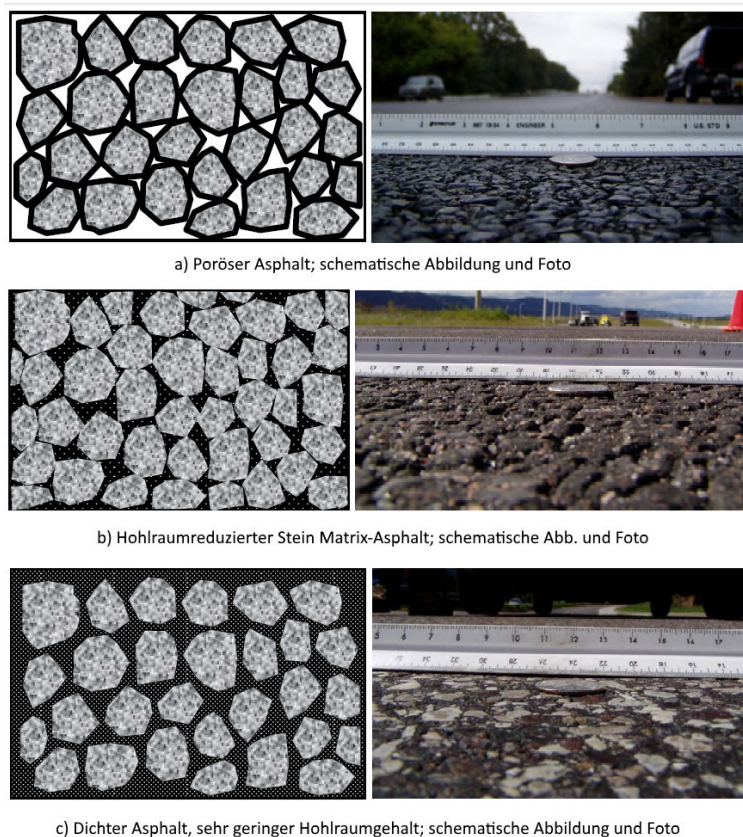


Abbildung 2.23: Offenporige, hohlraumreduzierte und dichte Asphalt-Deckschicht im Vergleich. [23]

Bei der Herstellung von Deckschichten können durch geringe feinstkörnige Mineralstoffanteile Hohlräume geschaffen werden, die von außen für Luft zugänglich sind. Für die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken sind vor allem die Korngrößenverteilung und das Bindemittel entscheidend. Sie bestimmen die Form und Beschaffenheit der Hohlräume. Asphalt kann sowohl einen dichten als auch einen offenporigen Deckschichttyp aufweisen, Beton hingegen ist in der Regel dicht. Für die Beschreibung von Fahrbahnoberflächen sind die Eigenschaften Fahrbahnrauigkeit, Offenporigkeit und Nachgiebigkeit relevant.

Für akustische Untersuchungen sind die Wellenlängen der Fahrbahntextur von Bedeutung. Diese sollen zwischen 2 mm und 200 mm liegen, das entspricht auch der Patchflächen-Länge zwischen Reifen und Fahrbahn. Auch das Herstellverfahren ist zu berücksichtigen. Gute Geräuschdämpfung des Reifen-Fahrbahngeräusches ergibt sich in der Regel durch gewalzte Fahrbahnbeläge wodurch plateauartige Texturen mit schluchtenförmigen Vertiefungen entstehen (konkave Gestalt). Abgestreute Deckschichten haben eine gebirgige Textur mit dazwischenliegenden Tälern (konvexe Gestalt), die akustisch weniger gute Dämpfungseigenschaften aufweisen.

Kapitel 3

Stand der Technik

Zur Messung des Reifen-Fahrbahngeräusches stehen drei standardisierte Messverfahren zur Verfügung. Die europäische Norm EN ISO 11819-2 (close-proximity method: CPX), die österreichische Richtlinie RVS 11.06.64, Teil IV, Rollgeräuschmessung sowie die amerikanische AASHTO Designation: TP 76-13 (on-board sound intensity: OBSI). In Europa gibt es noch zusätzlich für die Messung des Reifen-Fahrbahngeräusches die EN ISO 11819-1 (auch genannt als SPB-Verfahren: statical pass-by - Verfahren), die Norm für die stationäre Messung des Vorbeifahrgeräusches. Im folgenden werden diese Verfahren vorgestellt:

3.1 EN ISO 11819-2 (CPX)

Bei der CPX-Methode wird ein nachgezogener Messanhänger (oder ein speziell angetriebenes Messfahrzeug) eingesetzt, siehe Abb. 3.1.



Abbildung 3.1: Messanhänger zur Ermittlung des Reifen-Fahrbahngeräusches nach CPX. [24]

In diesem sind mindestens zwei Messmikrofone in der Nähe des Prüfreifens bzw. der Prüfreifen angebracht. Ermittelt wird der durchschnittlich abgestrahlte A-bewertete Schalldruckpegel über eine festgelegte Strecke bei konstanter Geschwindigkeit. Die Messungen werden bei einer oder mehreren Referenzgeschwindigkeiten von 40, 50, 80 oder 100 km/h durchgeführt. Jeder Prüfvorgang je Prüfreifen und Strecke muss aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die Strecke bzw. die Streckenabschnitte werden in Segmente von mindestens 20 m unterteilt und die Messergebnisse über die gesamte Messstrecke gemittelt. Das Ergebnis der Messungen ist der resultierende Schalldruckpegel (CPX-Pegel), der aus den Messdaten der bei-

den Messmikrofone gebildet wird. Es ist ein Nahfeldschallindex¹ anzugeben, wenn die vorgeschriebenen Referenzreifen² verwendet werden.

Vor den Messungen müssen die Messmikrofone mittels Kalibrator oder Pistonphon (zur Überprüfung des Gesamtübertragungskoeffizienten) kalibriert werden, zusätzlich jeweils zum Ende der Messungen oder nach spätestens vierstündigem Einsatz. Die einzelnen Kalibrierungen dürfen sich um maximal 0.5 dB unterscheiden.

Während einer Messfahrt müssen die Geschwindigkeit, die Lufttemperatur und die aufgebrachte Last laufend kontrolliert und aufgezeichnet werden. Die Messungen sind nur auf trockener Fahrbahn zulässig, die aufgebrachte Last auf den Prüfreifen ist mit 3.2 kN und einem Reifenfülldruck von 200 kPa vorgeschrieben. Die CPX ist für zwei Prüfreifentypen standardisiert. Für große PKW oder Vans ist der Referenzreifen des Typs P1 vorgeschrieben, dementsprechend wird ein SRTT-Reifen verwendet. Für leichte LKW und Vans ist der Prüfreifentyp H1 vorgeschrieben, es wird bei den Messungen ein Avon AV4-Reifen verwendet, der diesem Typ entspricht.

Die Mikrofonanordnung (gemessen zur Mitte der Mikrofonmembran) sind in Abb. 3.2 dargestellt. Die genauen Maße für die Mikrofonpositionen können in [24] nachgelesen werden.

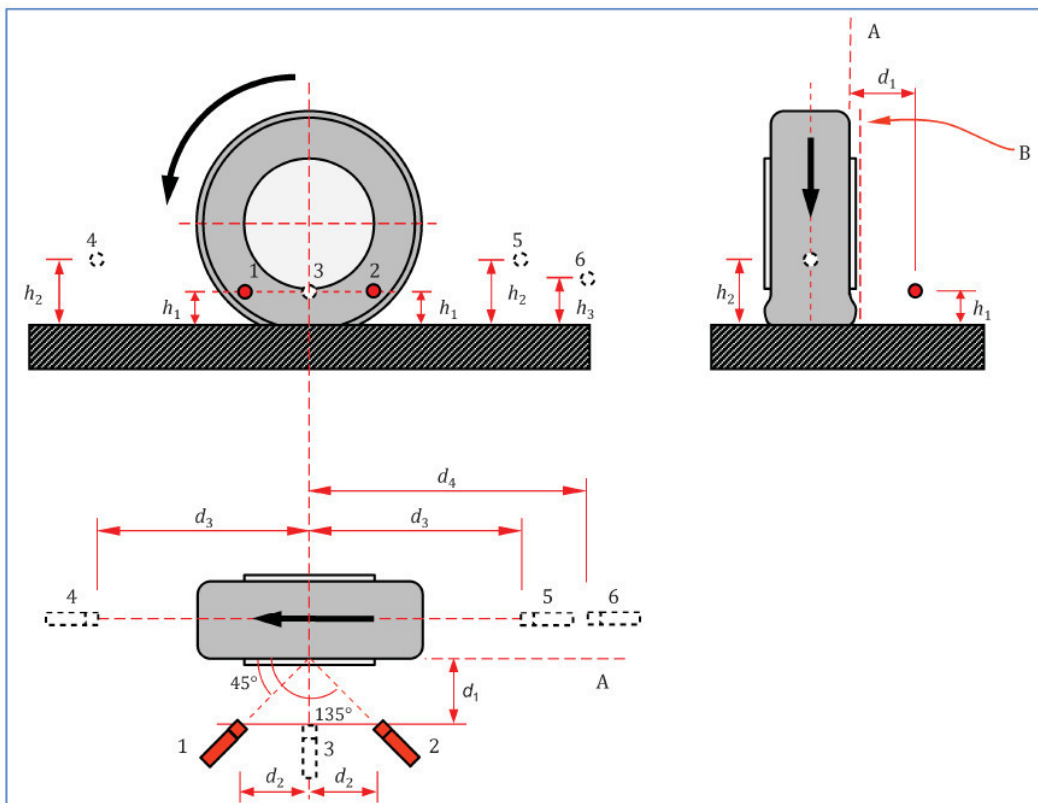


Abbildung 3.2: Mikrofonpositionen für die Messungen nach CPX. [24]

¹Standard-Index auf CPX-Basis zum Vergleich von Einzelwerten

²Lt. ISO/TS 11819-3

Legende

A	Nicht abgelenkte Reifenseitenwand	B	Abgelenkte Reifenseitenwand
1	Vorderes verpflichtend aufzustellendes Mikrofon	4	Vorderes optional aufzustellendes Mikrofon
2	Hinteres verpflichtend aufzustellendes Mikrofon	5	Hinteres optional aufzustellendes Mikrofon
3	Mittleres optional aufzustellendes Mikrofon	6	Hinterstes optional aufzustellendes Mikrofon
h_1, h_2, h_3	Siehe Tabelle 2	d_1, d_2, d_3, d_4	Siehe Tabelle 2

Abbildung 3.3: Mikrofonpositionen für die Messungen nach CPX, Legende für die Abkürzungen. [24]

Bei Messungen ohne Schallschutzkapseln müssen bis zu einem Abstand von 2 m alle reflektierenden Oberflächen von der Bewertung ausgenommen werden. Die zulässige Windgeschwindigkeit auf Höhe des Mikrofons darf vorgeschriebene Werte nicht überschreiten (für die genauen Werte siehe [24]). Für die Umgebungstemperatur gelten folgende Grenzwerte für verschiedene Klimazonen

- Gemäßig und kontinental 5 – 30 °C
- Tropisch und subtropisch 10 – 35 °C

3.2 RVS 11.06.64

Die RVS 11.06.64 legt die Prüfbestimmungen für eine Prüfung von Straßenabschnitten mit einem Zugfahrzeug und einem nachgezogenen Prüfanhänger fest.

Ergebnis dieser Messungen sind der A-bewertete Schalldruckpegel und die Darstellung des Schalldruckpegels in Terzbändern mit den Mittenfrequenzen von 250 Hz bis 10 kHz. Parallel dazu werden die Fahrgeschwindigkeit sowie die Fahrbahntemperatur aufgezeichnet. Im Messanhänger ist das Meßrad über ein Feder-Dämpfer-System aufgehängt, die Innenwände sind mit einer Entdröhnungsfolie sowie mit Absorptionmatten ausgekleidet.

Für die Messungen sind zwei Schallpegelmesser vorgeschrieben (für nähere Informationen siehe [25]). Die Auswertung soll mit Terzfiltern gemäß DIN EN 61260 erfolgen. Die Abtastrate der elektrischen Signale des Schalldruckpegels muss mindestens 20 kHz betragen, die Daten müssen in digitaler Form gespeichert werden, eine Dokumentation der Fahrgeschwindigkeit während der gesamten Messzeit (nicht zwangsweise in digitaler Form, jedoch zeitlich eindeutig zuordenbar) ist zu erstellen. Abbildung 3.4 bis 3.6 stellen die prinzipielle Messanordnung sowie die Anordnung der Mikrofone im Messanhänger dar.

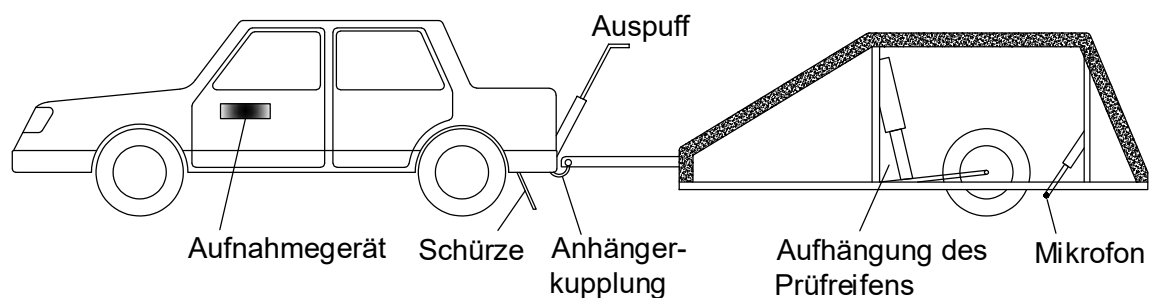


Abbildung 3.4: Prinzipdarstellung der Prüfanordnung nach RVS. [25]

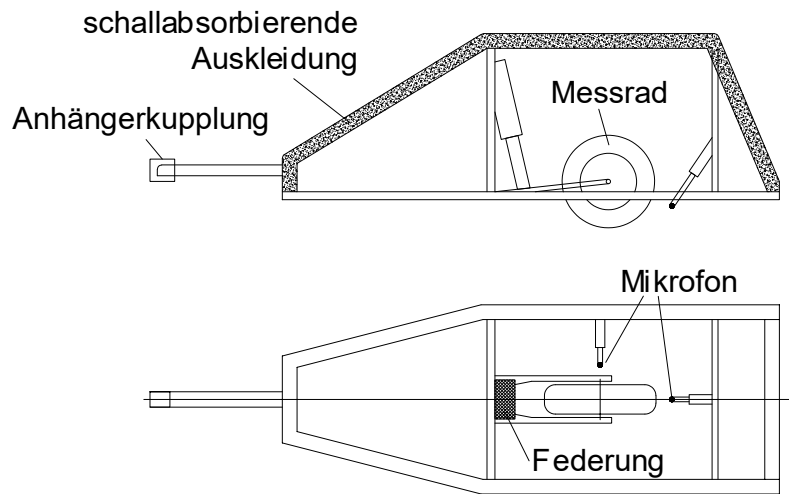


Abbildung 3.5: Prinzipieller Aufbau des Prüfanhängers. [25]

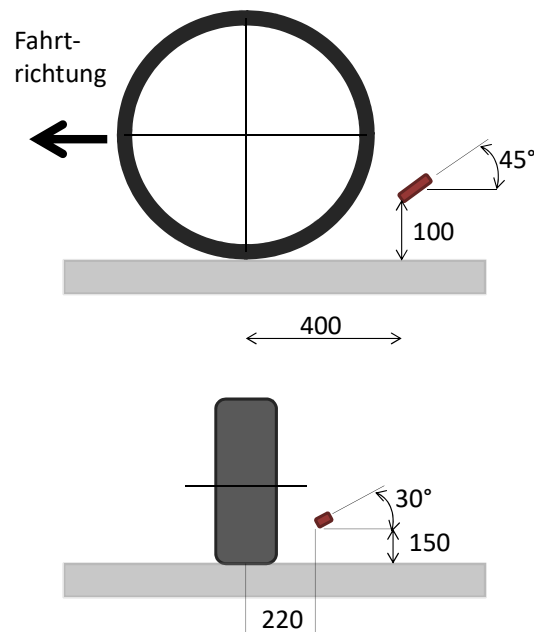


Abbildung 3.6: Mikrofonpositionen nach RVS. [25]

Der zu verwendende Messreifen ist ein PIARC-Reifen, Type Maloya 165 R 15 mit vier Längsrillen und einem vorgeschriebenen Reifenfülldruck von 2.3 bar. Die Mindestprofiltiefe des Messreifens beträgt 4 mm. Die Messungen dürfen nur bei trockener Fahrbahndecke durchgeführt werden, Regen oder Schneefall sind unzulässig für die Messungen. Messergebnisse durch das Überfahren von Stellen mit besonderer akustischer Charakteristik (Kanaldeckel, Schienenübergänge, Feuchtstellen,...) müssen ausgenommen werden. Die maximal zulässige Windgeschwindigkeit während der Messungen darf 5 m/s betragen. Die Tempera-

tur der Fahrbahndecke muss zwischen 10 °C und 40 °C liegen. Es ist eine Einfahrzeit von 15 min vorgeschrieben, um den Prüfreifen auf Betriebstemperatur für die Messungen zu bringen. Die vorgeschriebene Mindestmesszeit beträgt 15 s bei einer Fahrgeschwindigkeit, die wählbar zwischen 30 km/h und 100 km/h ist.

Fremdgeräusche an beiden Messmikrofonpositionen müssen mindestens um 10 dB geringer als das Rollgeräusch des Prüfreifens sein. Pro Messdurchgang sind mindestens zwei aufeinanderfolgende Einzelmessfahrten erforderlich. Vor und nach jeder Messung muss das Schallpegelmesssystem mit einem geeichten Kalibrator kalibriert und die Ergebnisse dokumentiert werden. Die Differenz darf nicht mehr als 0.3 dB betragen.

Idealerweise sollte die Prüfung vor der Verkehrsfreigabe (oder in Ausnahmefällen binnen 28 Tagen danach) stattfinden. Die Messergebnisse werden durch Bildung der energetischen Mittelwerte für jedes Mikrofon über die korrigierten Dauerschallpegel dargestellt, zusätzlich erfolgt eine Ermittlung der energieäquivalenten A-bewerteten Terzbandpegel mit den Mittenfrequenzen von 250 Hz bis 10 kHz. Der maßgebliche Rollgeräuschpegel in Terzbändern dient der Orientierung über die Frequenzzusammensetzung des Geräusches.

3.3 AASHTO TP 76-13 (OBSI)

Die Anordnung der Sonden am Vorderreifen der Beifahrerseite ist in Abb. 3.7 zu sehen:



Abbildung 3.7: Dual-Intensitätssonden in vertikaler OBSI-Anordnung. [26]

Im Unterschied zu CPX und RVS werden Intensitätssonden verwendet, die vor der Messung kalibriert werden müssen (für detailliertere Informationen siehe [26]). Die Messung darf nicht durch Übersteuerungssignale gestört sein, es sind A-bewertete Signale aufzuzeichnen.

Die Beschaffenheit der Teststrecke muss den vorgeschriebenen Anforderungen entsprechen:

Der gesamte Prüfabschnitt muss die gleiche Oberflächenbeschaffenheit aufweisen und ein gerader Straßenabschnitt sein, Kurven sollten vermieden werden. Der Prüfreifen muss in einer verkehrüblichen Position montiert sein. Schallreflektierende Gegenstände dürfen im Abstand von 0.5 m nicht vorhanden sein. Die Referenzprüfgeschwindigkeit beträgt 97 km/h. Sollte diese Geschwindigkeit auf dem geprüften Straßen-

abschnitt nicht möglich sein, ist die höchstmögliche der Geschwindigkeiten von 72, 56 oder 40 km/h zu wählen. Während der Messungen muss die Geschwindigkeit konstant gehalten werden. Der Reifenfülldruck im kalten Reifen beträgt 2.07 bar. Während des gesamten Messvorgangs sind konstante Umgebungsbedingungen gefordert. Die Lufttemperatur sollte 20 °C betragen, bei Temperaturabweichungen müssen die Werte mittels Korrekturfaktoren korrigiert werden.

Die Messungen erfolgen bei einem Luftdruck von 1013.25 hPa.

Die Messdurchführung darf erst gestartet werden, wenn der Prüfreifen einen Einlaufweg von 3 m der Teststrecke zurückgelegt hat. Das Messergebnis ist als eine energetische Mittelung über die Messperiode darzustellen. Für die bevorzugte Geschwindigkeit von 97 km/h und die Strecke von 134m ergibt sich eine Messzeit von 5.0s. Für die alternativen Geschwindigkeiten ergeben sich Zeiten von:

Messgeschwindigkeit	Messzeit
45 mph	6.7 ± 0.2 s
34 mph	8.6 ± 0.2 s
25 mph	12.0 ± 0.3 s

Tabelle 3.1: Messzeiten für verschiedene Messgeschwindigkeiten bei OBSI. [26]

Der PI-Index (der Druck-Intensitäts Index gibt die Differenz zwischen Schalldruckpegel und Schallintensitätspegel an) sollte innerhalb eines definierten Bereichs liegen, siehe [26].

Bei einer Messung mit nur einer Intensitätssonde, montiert an der Vorderkante der Radaufstandsfläche, werden die Ergebnisse gesondert von den separaten Messungen mit der Intensitätssonde an der Hinterkante ausgewertet. Von den Ergebnissen wird das arithmetische Mittel für die Werte von der Vorder- und Hinterkante gebildet, anschließend wird mit diesen Ergebnissen die energetische Mittelung durchgeführt. Bei Messungen mit zwei Intensitätssonden simultan wird die energetische Mittelung für jeden Testlauf einzeln durchgeführt. Für gültige Messergebnisse müssen mindestens zwei Meßdurchgänge durchgeführt werden. Die Ergebnisse jedes Testlaufs dürfen sich nicht um mehr als 1 dB(A) unterscheiden und liegen im Frequenzbereich zwischen 400 Hz und 5000 Hz. Abbildung 3.8 zeigt die vorgeschriebenen Mikrofonpositionen:

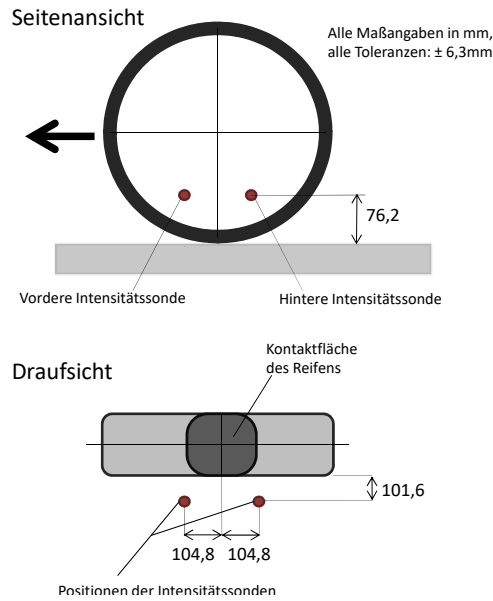
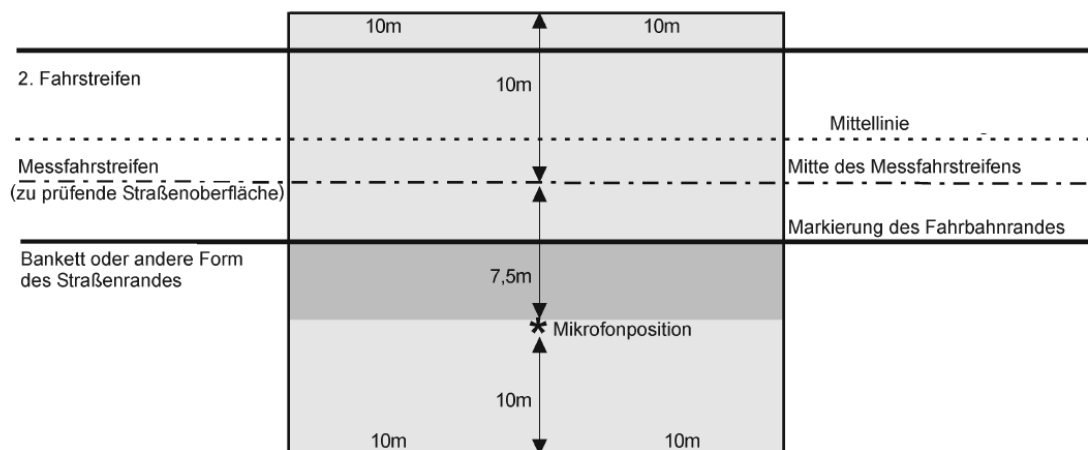


Abbildung 3.8: Mikrofonspositionen für die Messungen nach OBSI. [26]

3.4 Vorbeifahrtmessung nach EN ISO 11819-1 (SPB-Verfahren)

Die drei bisher vorgestellten Verfahren beschreiben die Reifen-Fahrbahngeräuschemessung unter Verwendung eines Messanhängers bzw. direkt am fahrenden Fahrzeug. Das SPB-Verfahren hingegen ist ein stationäres Messverfahren, bei dem ein Messmikrofon an einem festgelegten Ort neben der Fahrbahn positioniert wird und die Geräusche von vorbeifahrenden Fahrzeugen mißt. Abbildung 3.9 zeigt die Anforderungen an die Umgebung bei Vorhandensein von Schutzwänden und Schutzplanken. Abbildung 3.10 zeigt die vorgeschriebene Messanordnung an einem Straßenabschnitt.



Innerhalb dieses Rechtecks sind Schutzwände mit absorbierendem Material abzudecken. Innerhalb des Teils des Rechtecks zwischen der Mikrofonposition und dem Messfahrstreifen (dunkler Teil) dürfen keine abschirmenden Schutzplanken oder Schutzwände vorhanden sein.

Abbildung 3.9: SPB-Verfahren: Anforderungen bzgl. Schutzwänden und Schutzplanken. [27]

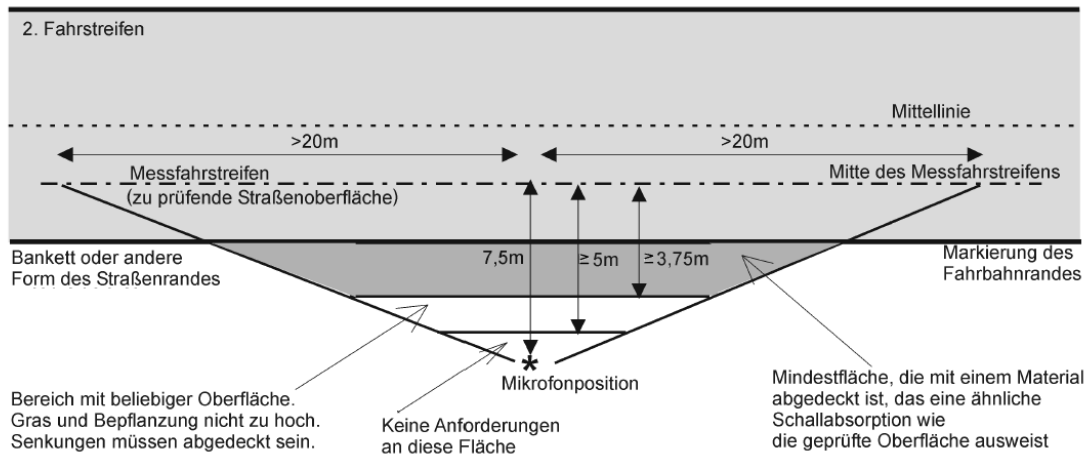


Abbildung 3.10: SPB-Verfahren: Messanordnung. [27]

Der entscheidende Unterschied zu den drei Verfahren bei denen während der Fahrt gemessen wird besteht darin, dass das Gesamt-Fahrzeuggeräusch ermittelt wird. Dabei sind die Parameter durch den freien Verkehr nicht exakt bekannt. Der genaue Reifentyp ist nicht bekannt, das Fahrzeug wird in nur drei Kategorien „PKW“ „zweiachsige LKW“ und „mehrachsige LKW“ unterteilt und die Geschwindigkeit wird zwar aufgezeichnet, das Fahrzeug fährt allerdings nicht mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit und der bei den anderen Verfahren vorgeschriebenen Konstanz. Die Angaben, die über die Straßenoberfläche zu treffen sind, sind annähernd ähnlich. Das Messmikrofon befindet sich stationär in einer Entfernung von $7,5 \pm 0,5$ m (siehe Abbildung 3.10). Für die verschiedenen Fahrzeugkategorien sind Mindestanzahlen der Fahrzeuge pro Messdurchgang vorgeschrieben.

- Kategorie 1 PKW, mind. 100 Fahrzeuge
- Kategorie 2a zweiachsige LKW, mind. 30 Fahrzeuge
- Kategorie 2b mehrachsige LKW, mind. 30 Fahrzeuge
- Kategorie 2a und 2b zusammen, mind. 80 Fahrzeuge

Kapitel 4

Messungen

Die Messungen des Reifen-Fahrbahngeräusches sind in Anlehnung an die drei standardisierten Verfahren CPX, RVS und OBSI erfolgt. Dabei sind die Reifen, Lasten, Geschwindigkeiten und andere Parameter gemäß diesen Vorschriften gewählt worden. Alle Messdurchgänge sind mit allen drei Verfahren gemessen und aufgezeichnet worden, um im Anschluss eine Auswertung nach den einzelnen Verfahren vornehmen zu können und die Verfahren untereinander zu vergleichen.

Reifen-Fahrbahngeräuschmessungen werden nach den oben genannten Verfahren im Freifeld durchgeführt. Es gibt dafür verschiedene Normen und Richtlinien, die schon in Kapitel 3 erläutert worden sind. Dabei handelt es sich um

- die österreichische Richtlinie RVS 11.06.64,
- die europäische Norm EN ISO 11819-2 (CPX)
- und die amerikanische Norm AASHTO TP 76-13 (OBSI).

Die Vorgaben dieser drei Verfahren für Freifeldmessungen werden an die Gegebenheiten für die Messungen in der Halle am Innentrommelprüfstand entsprechend adaptiert und bei den Messungen angewandt. Indem die Messungen am PFF durchgeführt werden, ist es möglich reproduzierbare Messbedingungen herzustellen und die Parameter nach den Verfahren für die Messungen einzustellen. So können die Messungen nach den verschiedenen Vorschriften durchgeführt und zusätzlich Messungen nach den verschiedenen Verfahren jedoch mit den Parametern der jeweils anderen Vorschriften angestellt werden, um sie objektiv vergleichbar zu machen. Die Ergebnisse dieser zusätzlichen Messdurchgänge werden im Kapitel 5 ab Seite 54 behandelt. Im Folgenden werden die drei Verfahren RVS, CPX und OBSI für die Messungen zusammengefasst.

4.1 Zusammenfassung der drei standardisierten Verfahren und Ableitung der Vorschriften für die Messungen vom Freifeld auf ein stationäres Rad

Da in einem stationär positionierten Innentrommelprüfstand gemessen wird, anstatt mittels eines Prüffahrzeugs mit Prüfanhänger, müssen die Messverfahren angepasst werden. Um die zur Verfügung stehende Zeit am PFF mit größtmöglicher Effizienz zu nutzen, werden alle durchgeführten Messungen mit allen vorgeschriebenen Mikrofonen in den entsprechenden Positionen gleichzeitig durchgeführt. Es werden daher insgesamt 4 Freifeldmikrofone für CPX und RVS sowie 2 Intensitätssonden für OBSI benötigt. Die Anforderungen an die Mikrofone, Kalibrierer und das Aufzeichnungsequipment sind den Normen CPX [24],

OBSI [26] und der Richtlinie RVS [25] zu entnehmen. Es werden Freifeldmikrofone von B&K des Typs 4190 jeweils mit passendem Vorverstärker verwendet. Für OBSI kommen zwei Intensitätssonden, zwei Mikrofonpaare von B&K des Typs 4197, mit den entsprechenden Vorverstärkern zum Einsatz.

4.1.1 Geforderte Umgebungseigenschaften und Messbedingungen

Je Verfahren sind unterschiedliche Umgebungseigenschaften gefordert, die sich aber teilweise überschneiden. Nachstehend werden diese Forderungen gegenübergestellt.

Umgebungstemperatur Je Verfahren ist ein bestimmter Temperaturbereich der umgebenden Luft zulässig.

- Nach RVS: 10 – 40 °C
- Nach CPX: 5 – 30 °C
- Nach OBSI: 20 °C

Um allen drei Verfahren gerecht zu werden, muss die Umgebungstemperatur in der Halle zwischen 10 °C und 30 °C liegen. Temperaturschwankungen sind nach allen drei Vorschriften durch Korrekturfaktoren bei der Auswertung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Nach der Einlaufzeit des Prüfstandes und des Prüfreifens ist allerdings anzunehmen, dass während der Testläufe keine großen Temperaturänderungen auftreten werden.

Windgeschwindigkeit Die Windgeschwindigkeit in der Prüfhalle kann vernachlässigt werden.

Prüfstrecke Die Prüfstrecke ist mit mindestens 500 m von der RVS-Richtlinie am Längsten. Daher wurde die Prüfstrecke mit mindestens 500 m gewählt. In der CPX- und OBSI-Norm sind keine Kurven zulässig, diese kommen im Innentrommelprüfstand auch nicht vor. Ebenso ist die Forderung einer trockenen Fahrbahn bei den Messungen am PFF erfüllt.

Prüfgeschwindigkeiten Die Prüfgeschwindigkeiten werden so gewählt, dass alle drei Messvorschriften eingehalten werden. Einzelne Durchläufe für jede geforderte Geschwindigkeit stellen keinen großen Aufwand dar. Die Prüfgeschwindigkeiten für alle drei Messverfahren sind in der folgenden Tabelle 4.1 aufgelistet :

Prüfgeschwindigkeit	Verfahren
30 km/h	RVS
40 km/h	CPX, OBSI
50 km/h	CPX, RVS
56 km/h	OBSI
60 km/h	*
72 km/h	OBSI
80 km/h	CPX, RVS, *
97 km/h	OBSI
100 km/h	CPX, *
120 km/h	*
* entsprechend früheren Messungen der BAST am PFF	

Tabelle 4.1: Prüfgeschwindigkeiten für die Messungen, diese berücksichtigen alle drei Verfahren sowie frühere Messungen der BAST (mit * gekennzeichnet).

Prüfreifen Es werden die bei der BAST vorhandenen Prüfreifen verwendet. Dies sind zwei GEstro¹-Reifen, sowie ein PIARC²-Reifen.

- SRTT Uniroyal Tiger Paw 225/60 R16
- Avon AV4 195/80 R14
- Piarc 165/80 R15

Reifeninnendruck Die geforderten Reifeninnendrucke betragen:

- 2.0 bar nach CPX
- 2.3 bar nach RVS sowie
- 2.07 bar nach OBSI.

Für die Messungen wird ein Druck von 2.0 bar gewählt.

Übersicht Die folgende Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über alle in den Normen geforderten Messparameter sowie der Parameter, nach denen im PFF gemessen wird:

¹Reifen, wie sie im realen Straßenverkehr verwendet werden

²europäischer Standardreifen

	CPX	RVS	OBSI	Für die Messungen am PFF gewählte Parameter:
Umgebungstemperatur:	5 - 30°C	10 - 40°C	20°C	10-30°C
Windgeschwindigkeit	max. 5m/s	max. 5m/s	-	-
Reifenfülldruck	2.0 ±0.1 bar	2.3 ±0.2 bar	2.07 ±0.14 bar	2.0 ±0.1 bar
Messstrecke	mind. 20m besser ab 100m	mind. 500m ab 2000m Aufteilung in 500m Teilstrecken	keine Angabe; mind. Einfahrtsweg vor der Messung: 3m (Vorgabe von Messzeiten, abh. von der Geschwindigkeit)	mind. 500m
Prüfgeschwindigkeit	40 km/h 50 km/h 80 km/h 100 km/h	30 km/h 50 km/h 80 km/h	Standard: 97 km/h 72 km/h 56 km/h 40 km/h	30 km/h 40 km/h 50 km/h 56 km/h 60 km/h 72 km/h 80 km/h 97 km/h 100 km/h 120 km/h
Messzeit	keine Angabe	mind. 15s	je Geschwindigkeit: 97 km/h → 5.0s 72 km/h → 6.7s 56 km/h → 8.6s 40 km/h → 12.0s	Die Messzeiten werden je nach Verfahren gewählt. Für die Vergleiche werden 20s gewählt.

Tabelle 4.2: Vorgeschriebene Parameter für die Messungen nach RVS, CPX und OBSI sowie die Parameter für die Messungen am Innentrommelprüfstand

4.2 Messungen nach CPX

Die CPX-Norm wurde schon vorgestellt, siehe Abschnitt 3.1 auf Seite 26. Bei dieser Norm wird der Schalldruckpegel mit 2 Freifeldmikrofonen gemessen. Die beiden Mikrofone befinden sich seitlich des Reifens auf 100 mm Höhe, im Abstand von 200 mm und sind symmetrisch mit der Neigung von 45° horizontal nach innen angeordnet. In diesem Abschnitt werden die Messdaten gemäss den Vorgaben der CPX-Norm ausgewertet:

Datum und Zeitpunkt der Messungen: 30. 3. 2017, 7:00 bis 17:00 Uhr

Prüfinstitut / für die Messung Verantwortliche

- TU Wien
- DI Stefan Gombots
- Irene Bladerer

Zweck der Messung: Ermittlung des abgestrahlten Schalldruckpegels der gewählten Prüfanordnung, Untersuchung des Innentrommelprüfstands der BAST, der Vergleich der drei verschiedenen Prüfverfahren untereinander unter gleichen Versuchsbedingungen sowie die Auswertung der Prüfparameter (Reifen, Lasten, Geschwindigkeiten) auf ihren Einfluss auf das Messergebnis.

4.2.1 Art des Messgeräts

Für die Messungen nach CPX sind das Prüffahrzeug sowie der Messreifen und das System zur Geräuschemessung genau spezifiziert, im Folgenden werden die bei den Messungen verwendeten Messgeräte aufgezählt:

Prüffahrzeug: Die Messungen sind für wissenschaftliche Zwecke nicht mit einem Prüffahrzeug mit Messanhänger sondern unter reproduzierbaren Bedingungen an einem Innentrommelprüfstand durchgeführt worden, der es erlaubt, objektiv vergleichbare Bedingungen zu schaffen.

Prüfreifen: Die Messungen nach CPX sind mit den drei folgenden Reifen durchgeführt worden:

- SRTT
- Avon AV4
- Piaro

Nach CPX können zwei Typen von Reifen für die Messungen verwendet werden: Der Referenzreifen P1, ein Reifen für große PKW's oder Vans: SRTT mit der Dimension 225/60R16 sowie der Referenzreifen H1, ein Reifen für leichte LKW's oder Vans, der Avon AV4 mit der Dimension 195/80R14

Geräuschemesssystem: Es wird das Geräuschemesssystem von B&K der BAST verwendet.

Kalibrierungseinheit: B&K 3451-A Kalibrator

Geschwindigkeitsmesseinrichtung: Tachosignal des PFF

Meteorologische Geräte:

- Messung der Fahrbahntemperatur mit Temperaturfühler, eingebaut im PFF
- Messung der Umgebungstemperatur mit Raumthermometer
- Messung der Reifentemperatur mit Temperaturfühler, eingebaut im PFF

Verwendete Mikrofone: 2x B&K 4190 Freifeldmikrofone mit B&K 2670 Vorverstärkern

Zertifizierung des Prüffahrzeugs: Eine Zertifizierung des Prüffahrzeugs liegt nicht vor, da die Messungen an einem Innentrommelprüfstand durchgeführt worden sind.

4.2.2 Angaben zur Lage und zum Aussehen des Messortes

Das Messergebnis ist von der Örtlichkeit der Messung abhängig und muss protokolliert werden. Dazu zählen auch eventuell auftretende Längs- oder Querneigungen der Fahrbahn, es dürfen keine Kurven auftreten bzw. müssen von der Auswertung ausgenommen werden.

Lage des Messortes: Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch-Gladbach. Die Angabe des Messortes ist für diese Messungen nicht relevant, da definierte Bedingungen herrschten.

Zulässige Höchstgeschwindigkeit: Die Höchstgeschwindigkeit des PFF beträgt 280 km/h. Die Messungen sind mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h durchgeführt worden.

Längsneigung: Die Längsneigung im PFF beträgt 0°. Allerdings ist die Fahrbahn ein Ring mit einem Innendurchmesser von 5.5 m, in dem der Prüfreifen läuft, eine Längsneigung entspricht somit vor- und hinter dem Reifen dem Durchmesser. Eine Lenkwinkelverstellung ist im Bereich $\pm 15^\circ$ möglich.

Querneigung: Die Querneigung im PFF beträgt 0°.

Lageplan des Messortes: Wie schon erwähnt, fanden die Messungen an einem Prüfstand statt mit einem Prüffahrzeug auf einer Prüfstrecke statt. Daher zeigt die folgende Abbildung 4.1 nicht den geografischen Lageplan des Messortes sondern den Prüfstand PFF der BAST in Bergisch-Gladbach. Der Prüfstand befindet sich in einer Halle, die mit Schalldämmstoffen ausgestattet ist, um möglichst viele Störgeräusche zu eliminieren.



Abbildung 4.1: PFF der BAST in Bergisch-Gladbach. [4]

Gemessene Gesamtentfernung: Die Messungen erfolgten bei 30 km/h bis 120 km/h für je ca. 12 s im Innentrommelprüfstand. Das entspricht einer Messstrecke von 100 m bis 400 m.

Startposition (GPS-Daten): Die GPS-Daten des Messortes sind bei Messungen in einem stationären Prüfstand nicht von Relevanz.

- Längengrad von Bergisch Gladbach: 7.1286213
- Breitengrad von Bergisch Gladbach: 50.9923091

Endposition (GPS-Daten): Die GPS-Daten des Messortes sind bei Messungen in einem stationären Prüfstand nicht von Relevanz.

- Längengrad von Bergisch Gladbach: 7.1286213
- Breitengrad von Bergisch Gladbach: 50.9923091

Seitliche Messposition auf der Straße: Der Prüfreifen läuft im PFF in der Mitte der Fahrspur. Diese ist 0.56 m breit.

4.2.3 Angaben zur Art und zum Aufbau der geprüften Oberfläche

Wie in Abschnitt 2.3.3 beschrieben, hat die Oberfläche der Fahrbahn Einfluss auf das Messergebnis, daher werden die Attribute der Fahrbahn protokolliert:

Art der Oberfläche und deren Auslegungsparameter: Die Fahrbahn ist mit einem Safety-Walk-Belag ausgestattet. Dieser Belag ist besonders rutschfest und kann für die Messungen als Schallhart betrachtet werden.

Dicke der Deckschicht: Die Dicke des Safety-Walk-Belages beträgt 0.9 mm auf Stahluntergrund.

Maximale Korngröße: maximal 0.7 mm

Hohlraumgehalt nach ISO 10844: Sehr gering

Schallabsorptionsgrad nach ISO 13472-1: Der Safety-Walk-Belag kann als Schallhart betrachtet werden.



Abbildung 4.2: Safety-Walk - Fahrbahnbelag im Prüfstand Fahrzeug-Fahrbahn der BAST

Abbildung 4.2 zeigt den Safety-Walk Belag auf der Fahrbahn im PFF.

Texturtiefe (MPD³) nach ISO 13743-1: maximal 0.8 mm

Materialzusammensetzung für die Oberfläche: Rutschhemmende Mineralkörnung, eingebettet in ein zähes, dauerhaftes Polymer und fest verbunden mit einem starken, dimensionsstabilen Polyesterfilm. Die Rückseite ist mit einem druckempfindlichen Kleber auf Gummibasis ausgestattet, der wiederum durch einen abziehbaren Liner geschützt ist. Zitat [28], solutions.3mdeutschland.de, 2018.

4.2.4 Angaben zum Zustand der geprüften Oberfläche sowie Umweltfaktoren

Zusätzlich zu den oben genannten Eigenschaften der Fahrbahn müssen weitere Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit gemacht werden:

Alter und Zustand der Oberfläche: Alter: ca. 17 Jahre. Zustand: neuwertig

Besondere Oberflächenbehandlung: Die Fahrbahn ist mit einem Safety-Walk-Belag beschichtet.

Anmerkungen zur Homogenität der Oberfläche: Der Safety-Walk-Belag ist sehr homogen.

Anzahl der Tage seit dem letzten Niederschlag: Die Messungen finden in einem Prüfstand in einer Halle statt. \Rightarrow kein Niederschlag.

Durchschnittliche Luft- und Straßenoberflächentemperatur über den Prüfabschnitt: Durchschnittliche Lufttemperatur während der Messungen mit SRTT: $T_{U_{SRTT}} = 23.87^\circ\text{C}$

Durchschnittliche Lufttemperatur während der Messungen mit AV4: $T_{U_{AV4}} = 25.2^\circ\text{C}$: Durchschnittliche Fahrbahntemperatur während der Messungen mit SRTT: $T_{F_{SRTT}} = 24.75^\circ\text{C}$

Durchschnittliche Fahrbahntemperatur während der Messungen mit AV4: $T_{F_{AV4}} = 25.56^\circ\text{C}$: Durchschnittliche Reifentemperatur während der Messungen mit SRTT: $T_{R_{SRTT}} = 30.06^\circ\text{C}$

Durchschnittliche Reifentemperatur während der Messungen mit AV4: $T_{R_{AV4}} = 35.79^\circ\text{C}$

Verwendete Temperaturkorrekturkoeffizienten: Der Temperaturkorrekturwert für den CPX-Level wird mit der Formel $C_{T,t} = -\gamma_t(T - T_{ref})$ berechnet.

Die Referenztemperatur beträgt $T_{ref} = 20^\circ\text{C}$:

Der Temperaturkorrekturfaktor für den P1-Prüfreifen SRTT wird mit der jeweils betrachteten Geschwindigkeit berechnet: $\gamma_{P1} = \gamma_{SRTT} = -0.14 + 0.0006 v$

Der Temperaturkorrekturfaktor für den H1-Prüfreifen AV4 wird mit der jeweils betrachteten Geschwindigkeit berechnet: $\gamma_{H1} = \gamma_{AV4} = -0.10 + 0.0004 v$

³MPD: Mean Profile Depth

Tabelle 4.3 zeigt die Korrekturfaktoren für die Reifen H1 sowie P1 für alle angewandten Messgeschwindigkeiten.

Temperaturkorrekturfaktor	Reifen	Geschwindigkeit in km/h			
		40	50	80	100
Berechnungsformel:					
$\gamma_{SRTT} = -0,14 + 0,0006 * v$	SRTT	-0,116	-0,11	-0,092	-0,092
$\gamma_{AV4} = -0,10 + 0,0004 * v$	AV4	-0,084	-0,08	-0,068	-0,068

Tabelle 4.3: Temperaturkorrekturfaktoren für H1- und P1-Reifen bei den Prüfgeschwindigkeiten 40, 50, 80 und 100 km/h

4.2.5 Prüfreifen und andere Prüfbedingungen

Verwendete Prüfreifen, Kennzeichnung der Reifen und Herstellungsdatum:

SRTT, Dimension 225/60R16, Datum: nicht bekannt

AV4, Dimension 195/80R14, Datum: nicht bekannt

Shore-Härte der Prüfreifen (nicht älter als 3 Monate):

Shore-Härte des SRTT-Reifens: 70 ShoreA

Shore-Härte des AV4-Reifens: 67 ShoreA

Anzahl der Durchläufe, auf denen L_{CPX} basiert:

8 Durchläufe bei 40 km/h

9 Durchläufe bei 50 km/h

11 Durchläufe bei 80 km/h

11 Durchläufe bei 100 km/h.

Verwendete Referenzgeschwindigkeit: Die Referenzgeschwindigkeiten für CPX sind

- 40 km/h
- 50 km/h
- 80 km/h
- 100 km/h.

Da die Messdurchgänge den Bedingungen aller drei Messvorschriften und zu Vergleichszwecken auch den Bedingungen unter denen die BAST bereits Messungen durchgeführt hat genügen sollen, ist jeder Messdurchlauf mit zehn Geschwindigkeiten durchgeführt worden.

- 30 km/h
- 40 km/h
- 50 km/h
- 56 km/h
- 60 km/h
- 72 km/h
- 80 km/h

- 97 km/h
- 100 km/h
- 120 km/h

Tatsächlich gemessene Prüfgeschwindigkeiten, als Mittelwert über den Prüfabschnitt: Die Messgeschwindigkeiten für CPX betragen 40, 50 und 80 km/h. Im PFF ist es möglich, die vorgeschriebenen Geschwindigkeiten genau einzuhalten.

L_{CPX} - Werte:

Tabelle 4.4 zeigt in abhängigkeit von den jeweiligen Geschwindigkeiten die A-bewerteten Gesamtpegel für die beiden Prüfreifen P1 und H1:

A-bewerteter Gesamtpegel	Reifen	Geschwindigkeit in km/h			
		40	50	80	100
L_{CPX_SRTT}	SRTT	77,2	82,7	90,0	92,8
L_{CPX_AV4}	AV4	82,4	85,3	95,0	92,5

Tabelle 4.4: A-bewertete Gesamtpegel für P1 und H1 je Prüfgeschwindigkeit

4.2.6 Weitere Angaben

Die bei Korrekturen bezüglich der Geschwindigkeit verwendete Geschwindigkeitskonstante B: Die tatsächliche Geschwindigkeit während der Messung entspricht durch die Bedingungen im PFF exakt der Referenzgeschwindigkeit. Daher ist keine Korrektur der Geschwindigkeit vorzunehmen.

Einzelheiten besonderer Vorkehrungen, um ISO 11819-2 zu entsprechen: Angaben zu Anpassungen der Messbedingungen, um der ISO 11819-2 zu entsprechen, sind bereits in den Angaben zur Art des Messgeräts in Kap. 4.2.1, zur Lage und Aussehen des Messortes in Kap. 4.2.2, zur Art und zum Aufbau der geprüften Oberfläche in Kap. 4.2.3 sowie in den Angaben zum Zustand der geprüften Oberfläche in Kap. 4.2.4 gemacht worden.

4.2.7 Grafische Darstellung der Messergebnisse

Die Messungen sind, wie in Kap. 4.2.5 bereits erwähnt, je Prüfreifen mit zehn Prüfgeschwindigkeiten und mit je drei Prüflasten durchgeführt worden. Um Wiederholungen zu vermeiden, werden hier nur die Ergebnisse der Messungen unter den Prüfbedingungen gem. CPX dargestellt. Dabei wird der Terzbandpegel unter der Berücksichtigung der vorgeschriebenen Korrekturen grafisch dargestellt.

Die Korrektur des Gesamtpegels wird gem. der folgenden Formel berechnet:

$$L_{CPX:t,w,r,f,vr} = L'_{CPX:t,w,r,f,vr} + C_{d_f} - B * \log\left(\frac{v_{t,w,r,i}}{vr}\right) \text{ dB} - C_{T_t} * (T_i - 20) - C_{SH,t} * (SH - 66) \quad (4.1)$$

Mit den Korrekturfaktoren

$L'_{CPX:t,w,r,f,vr}$ = Autospektrum

C_{d_f} = Prüfsystemkorrektur

B = Korrekturwert für das Abweichen der Messgeschwindigkeit von der Referenzgeschwindigkeit.

$v_{t,w,r,i}$ = Messgeschwindigkeit. Am PFF hat die Messgeschwindigkeit einen Bereich durchlaufen, dessen Mittelwert genau der Referenzgeschwindigkeit entspricht. Daher muss keine Korrektur in Bezug auf die Geschwindigkeit durchgeführt werden.

v_r = Referenzgeschwindigkeit

C_{T_t} = Korrektur für das Abweichen der Temperatur von der Referenztemperatur

T_t = Umgebungstemperatur

$C_{SH,t}$ = Korrekturfaktor für die Gummihärte

SH = gemessene Gummihärte

Messungen nach CPX mit P1-Prüfreifen (SRTT)

Verwendete Messparameter:

Prüfreifen: SRTT

- Die gemessene Shore-Härte des P1-Reifens beträgt: $H_{ASRTT} = 70$ ShoreA
- Der Korrekturfaktor für die Shore-Härte des Reifens beträgt $C_{HASRTT} = \beta_{SRTT} (H_A - H_{ref})$
- Referenzhärte für P1-Reifen: $H_{ref} = 62 - 73$ ShoreA
- Der Gummihärtekoefizient für den P1-Prüfreifen beträgt $\beta_{SRTT} = 0.20$ dB/ShoreA
- Der Korrekturfaktor für die Shore-Härte des Reifens beträgt $C_{HASRTT} = \beta_{SRTT} (H_A - H_{ref})$
 $C_{HASRTT} = 0.20 (70 - 67.5) = 0.5$ dB

Prüflast: 3.2 ± 0.2 kN

Die Prüflast kann am PFF genau eingestellt werden, daher sind keine Korrekturen notwendig.

Messunsicherheit

- Die Messunsicherheit berechnet sich durch $\delta_{P1} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$
- Auch diese Korrektur kommt aufgrund der genauen Messparameter am PFF nicht zur Anwendung.

Messergebnisse für den SRTT-Prüfreifen, grafisch ausgewertet bei 40 km/h, 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h. Zur Anwendung kommen die oben genannten Parameter nach CPX. Unter Berücksichtigung der Korrekturen nach 4.2.7 ergibt sich der Schallpegel für den P1-Reifen wie in Abb. 4.3 zu sehen ist:

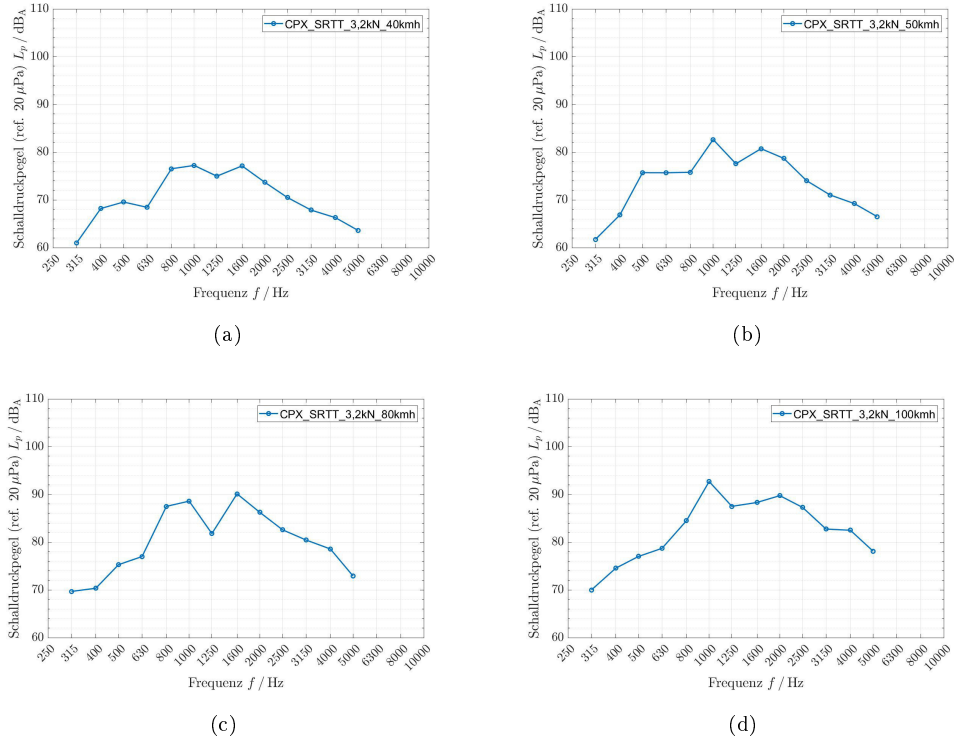


Abbildung 4.3: Grafische Auswertung der Messergebnisse nach CPX, mit SRTT-Prüfreifen und 3.2kN Last bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.

Messungen nach CPX mit H1-Prüfreifen (AV4)

Verwendete Messparameter:

Prüfreifen: AVON AV4

- Die gemessene Shore-Härte des H1-Reifens beträgt: $H_{AAV4} = 67$ ShoreA
- Der Korrekturfaktor für die Shore-Härte des Reifens beträgt $C_{HAAV4} = \beta_{SRTT} (H_A - H_{ref})$
- Referenzhärte für H1-Reifen: $H_{ref} = 60 - 73$ ShoreA
- Der Gummihärtekoefizient für den H1-Prüfreifen beträgt $\beta_{AV4} = 0.20$ dB/ShoreA
- Der Korrekturfaktor für die Shore-Härte des Reifens beträgt $C_{HAAV4} = \beta_{AV4} (H_A - H_{ref})$
 $C_{HASRTT} = 0.20 (67 - 67.5) = -0.1$ dB

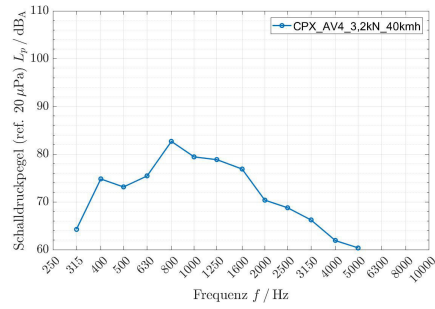
Prüflast: 3.2 ± 0.2 kN

Die Prüflast kann am PFF genau eingestellt werden, daher sind keine Korrekturen notwendig.

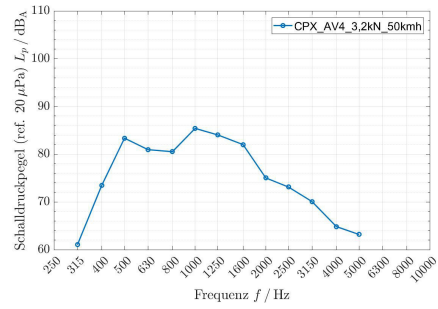
Messunsicherheit

- Die Messunsicherheit berechnet sich durch $\delta_{P1} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4$
- Auch diese Korrektur kommt aufgrund der genauen Messparameter am PFF nicht zur Anwendung.

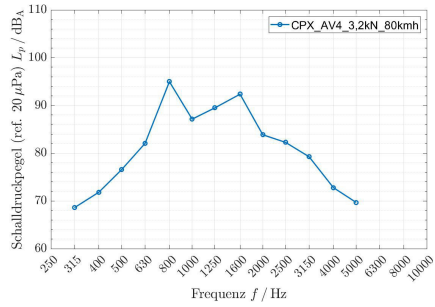
Messergebnisse für den AV4-Prüfreifen, grafisch ausgewertet bei 40 km/h, 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h. Zur Anwendung kommen die oben genannten Parameter nach CPX. Unter Berücksichtigung der Korrekturen nach 4.2.7 ergibt sich der Schallpegel für den H1-Reifen wie in Abb. 4.4 zu sehen ist:



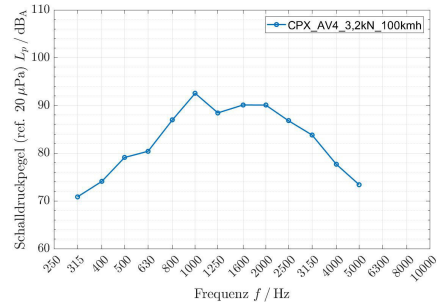
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 4.4: Grafische Auswertung der Messergebnisse nach CPX, mit AV4-Prüfreifen und 3.2 kN Last bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.

CPX-Schallindex für gemischten Verkehr Der CPX-Schallindex (CPXI) für gemischten Verkehr gibt einen Vergleich der beiden Reifen.

$$CPXI = 0.5 L_{P1} + 0.5 L_{H1} \quad (4.2)$$

Durch die Kombination der CPX-Pegel für leichte Fahrzeuge und Lastkraftwagen wird eine befahrene Straßensituation repräsentiert, die zu 80% von leichten Fahrzeugen und 20% Lastkraftwagen befahren wird.

Abbildung 4.5 zeigt die Messergebnisse für CPXI für H1- und P1-Reifen bei den Geschwindigkeiten 40 km/h, 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h:

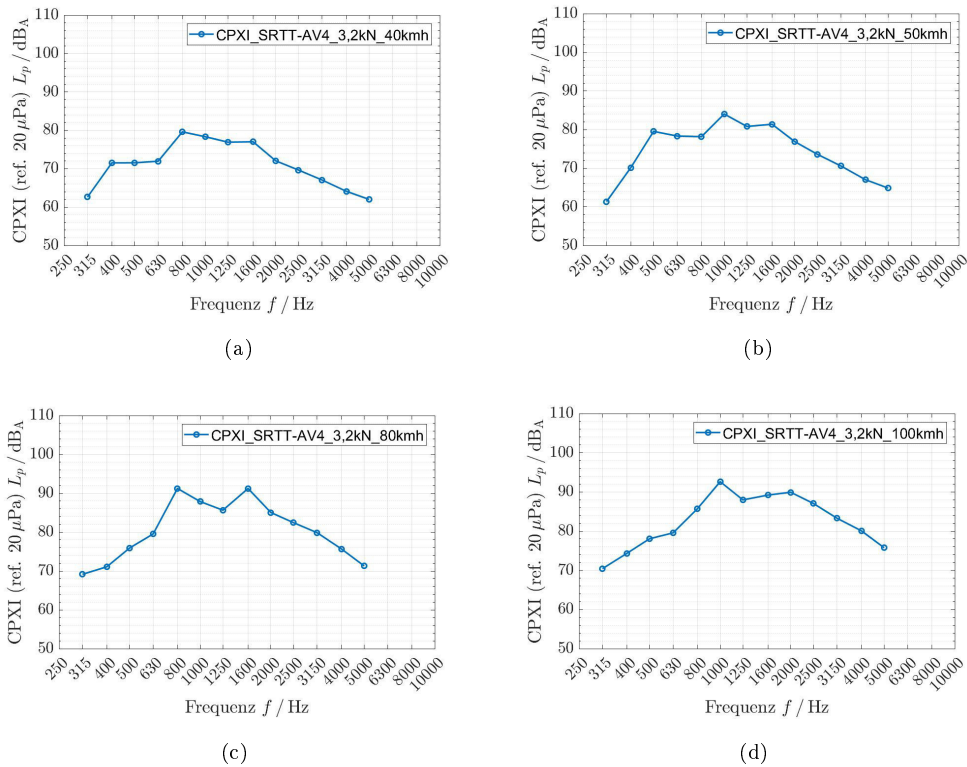


Abbildung 4.5: CPXI-Werte mit AV4 und SRTT bei 40, 50, 80 und 100 km/h sowie 3.2 kN Last und bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.

4.3 Messungen nach RVS

Rollgeräuschmessungen nach RVS 11.066

Art der Prüfung: Schallpegelmessung des Reifen-Fahrbahngeräusches unter reproduzierbaren Bedingungen am PFF der BAST.

Datum der Messungen: 30. 3. 2017, 7:00 bis 17:00 Uhr

Prüfanordnung: Die Prüfanordnung erfolgte nach den Vorschriften der RVS, mit einem Kondensatormikrofon seitlich und einem hinter dem Reifen, in den dafür definierten Abständen. Siehe auch Kap. 3.2, Abb. 3.6.

Genau Bezeichnung des Prüfabschnitts: Der PFF befindet sich in Bergisch-Gladbach. Eine Bezeichnung des Prüfabschnittes ist nicht vorhanden. Durch den rotierenden Fahrbahnring kann eine homogene Prüfstrecke simuliert werden.

Art der Fahrbahndecke: Die Fahrbahn ist die Innenseite des rotierenden Rings aus Stahl des PFF. Die befahrene Fläche ist mit einem rutschfesten Safety-Walk-Belag ausgestattet, der als schallhart betrachtet werden kann.

Angaben zur Fahrbahn (Alter, Besonderheiten):

- Alter: ca. 17 Jahre
- Deckschichtdicke: 0,9 mm
- Maximale Korngröße: 0,7 mm
- Sehr geringer Hohlraumgehalt

Oberflächentemperatur der Fahrbahndecke: 26 °C

Soll- und Istgeschwindigkeit (Mittelwert je Fahrstreifen und Messabschnitt): Die vorgeschriebenen Messgeschwindigkeiten nach RVS betragen:

- 30 km/h
- 50 km/h
- 80 km/h

Am PFF können die Geschwindigkeiten exakt eingehalten werden. Die Istgeschwindigkeiten entsprechen daher den Sollgeschwindigkeiten.

Anzahl der Messungen je Messabschnitt von 500 m:

- 2 Durchläufe bei 30 km/h
- 2 Durchläufe bei 50 km/h
- 2 Durchläufe bei 80 km/h

Fremdgeräusche: Fremdgeräusche sind bei Messungen im PFF durch seinen Standort in einer Halle vernachlässigbar.

Die Messparameter für die Messungen nach RVS sind:

Prüfreifen: Piarç

Shore-Härte des Prüfreifens: 65⁴ ShoreA

Reifendruck: 2.0 bar (entgegen den gem. RVS geforderten 2.3 bar)

Aufgebrachte Prüflast: 4000 N

Korrekturfaktoren:

Pegelkorrektur für die Abweichung der Oberflächentemperatur: Die Fahrbahntemperatur beträgt während der RVS-Messungen 26 °C. Dies entspricht einer Abweichung von $\Delta T = 6$ °C von der Referenztemperatur von 20 °C. Die Pegelkorrektur beträgt 0.07 db/°C.

Pegelkorrektur für die Abweichung von der Referenzgeschwindigkeit:

Am PFF hat die Messgeschwindigkeit einen Bereich durchlaufen, dessen Mittelwert genau der Referenzgeschwindigkeit entspricht. Daher muss keine Korrektur in Bezug auf die Geschwindigkeit durchgeführt werden.

Genauigkeit:

Wiederholstandardabweichung: $\sigma_r = 0.4$ dB

Vergleichsstandardabweichung: $\sigma_R = 0.6$ dB

Beziehungen zwischen den statischen Kenngrößen:

Wiederholgrenze: $r = 1.96 \sqrt{2} \sigma_r = 2.77 \sigma_r = 1.108$ dB

Vergleichsgrenze: $R = 1.96 \sqrt{2} \sigma_R = 2.77 \sigma_R = 1.662$ dB

Werte für LH , LS , LMA und $LMA_{t,i}$ für die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen von 250 Hz bis 10 kHz können in den Abb. 4.3.1 abgelesen werden.

Anmerkungen und Angaben über eventuelle, unvermeidbare Abweichungen von dieser Richtlinie:

Die Messungen sind unter den von der RVS-Richtlinie vorgegebenen Bedingungen am PFF der BASt durchgeführt worden.

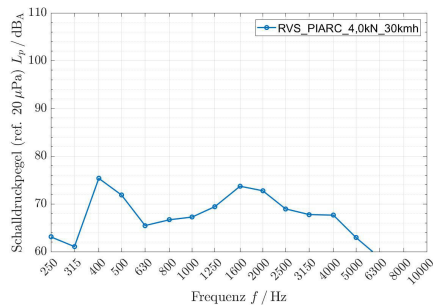
⁴Shore-Härte beim Piarç-Reifen: Gemessen in der Mitte: 66 ShoreA, an der Seite 64 – 65 ShoreA.

Unterschrift der Verantwortlichen

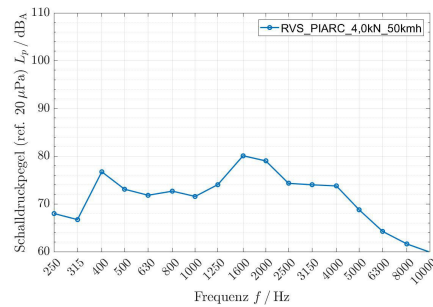
Name und Bezeichnung der Prüfstelle: TU Wien

4.3.1 Grafische Darstellung der Messergebnisse

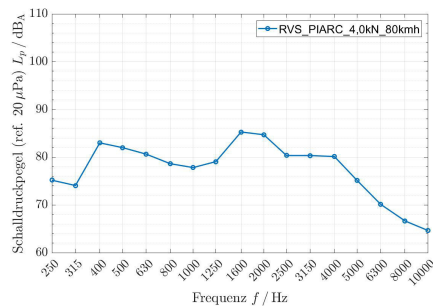
Unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren, wie oben beschrieben, sind die Schallpegel in Abb. 4.6 zu sehen:



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.6: Grafische Auswertung der Messergebnisse nach RVS, mit Piarc-Prüfreifen und 4.0 kN Last bei (a) 30, (b) 50 und (c) 80 km/h.

4.4 Messungen nach OBSI

Die Geräuschmessungen sind auch nach der amerikanischen OBSI durchgeführt worden. Im Unterschied zu der CPX und RVS wird hier die Schallintensität anstatt des Schalldruckpegels angegeben.

Straßenabschnittsnummer, Bezeichnung, Fahrbahnrichtung: Der PFF befindet sich in Bergisch-Gladbach. Eine Bezeichnung des Prüfabschnittes ist nicht vorhanden. Durch den rotierenden Fahrbahnring kann eine homogene Prüfstrecke simuliert werden.

Datum und Zeit der Messung: 30.3.2017, 7:00 bis 17:00 Uhr

Lufttemperatur während der Messungen: 23 °C

Fahrbahnoberflächenbeschaffenheit: Die Fahrbahn ist die Innenseite des rotierenden Rings aus Stahl des PFF. Die Lauffläche bildet ein Safety-Walk-Belag von 3M [28].

- Alter: ca. 17 Jahre
- Deckschichtdicke: 0,9 mm

- Maximale Korngröße: 0,7 mm
- Sehr geringer Hohlraumgehalt

GPS-Koordinaten oder amtliche Streckenmarke an der Startposition (Genauigkeit: ± 10 ft):

Bundesanstalt für Straßenwesen in Bergisch-Gladbach. Die Angabe des Messortes ist für diese Messungen nicht relevant, da bei den Messungen Laborbedingungen herrschten. Der Vollständigkeit des Protokolls seien sie jedoch trotzdem angeführt

Längengrad von Bergisch Gladbach: 7.1286213

Breitengrad von Bergisch Gladbach: 50.9923091

Messgeschwindigkeit, inkl. Angabe, ob die gewählte Geschwindigkeit von der vorgeschriebenen Standardgeschwindigkeit von 97 km/h (60 mph) abweicht:

25 mph = 56 km/h

34 mph = 72 km/h

45 mph = 97 km/h

Die vorgeschriebenen Messgeschwindigkeiten können im PFF exakt eingehalten werden, daher sind keine Korrekturen nötig.

Mittelwert der gemessenen Reifenhärte sowie Datum der Härtemessung: 70 ShoreA, am 30.3.2017.

Mittelwert (aller gültigen Messungen) der Gesamt-Schallintensität und Mittelwert der Schallintensität in Terzbandpegeln mit Mittenfrequenzen von 400 Hz bis 5 kHz. Beide korrigiert und normiert. Die Messergebnisse sind im Detail in Kap. 4.4.1 auf Seite 52 grafisch aufbereitet.

Herstellardatum des Prüfreifens: nicht bekannt

Komponenten des Messsystems, inkl. Seriennummern:

2 Intensitätssonden, Typ 4197, jeweils mit Vorverstärkern des Typs 2670, von B&K.

Die Anordnung der Intensitätssonden erfolgte gem. den Vorschriften der OBSI, siehe auch Kap. 3.3.

Geräte zur Geschwindigkeitsmessung und zur Erfassung der Umgebungsbedingungen: Im Prüfstand integrierter Tacho des PFF.

Datum der letzten Kalibrierung aller Messgeräte: 30.3.2017

Position und Beschreibung von akustisch reflektierenden Gegenständen innerhalb eines Abstands von 0.5 m von der Reifenseitenwand:

Die innenliegende Rückwand des Fahrbahnringes ist mit schallabsorbierendem Material ausgestattet, um Schallreflexionen zu minimieren.

Die Hallenwände und das Dach sind ebenfalls mit Schalldämmmaterial ausgestattet.

Im Messbereich und vor der offenen Seite des PFF befinden sich im relevanten Bereich keine akustisch reflektierenden Gegenstände.

Die Schallintensitäten sind den grafischen Auswertungen auf Seite 52 zu entnehmen.

Bereiche der Gesamt-IL und Terzbandpegel mit Mittenfrequenzen von 400 Hz bis 5 kHz. Die Messergebnisse sind im Detail in Kap. 4.4.1 auf Seite 52 grafisch aufbereitet.

PI-Index, Schallintensität und Kohärenzergebnisse

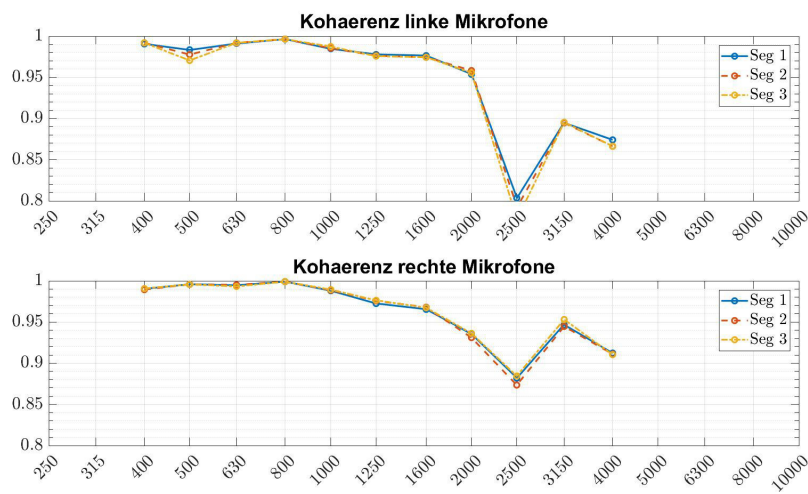
Der PI-Index für 56 km/h liegt für die Frequenzen von 400 bis 1250 Hz unter -1 , für 72 km/h für 400 bis 1600 Hz unter -1 und für 97 km/h liegt der PI-Index für die Frequenzen von 400 bis 2500 Hz unter dem vorgeschriebenen Mindestwert von -1 . Daher sind die Messungen nach der Vorschrift ungültig und müssten wiederholt werden. Darauf ist aus Kostengründen verzichtet worden.

Die PI-Indices sind in Tabelle 4.5 abgebildet, die ungültigen Werte sind farblich gekennzeichnet:

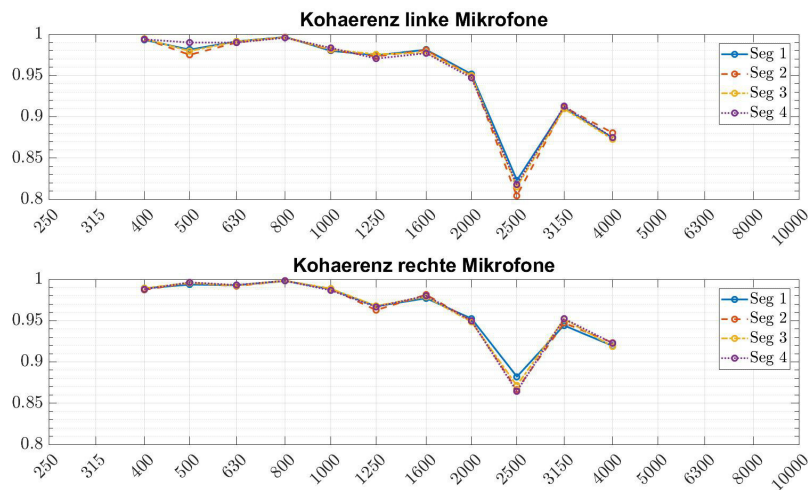
Frequenz	56 km/h			72 km/h			97 km/h		
	SPL	Intensity	PI-Index	SPL	Intensity	PI-Index	SPL	Intensity	PI-Index
400	68,013	73,502	-5,489	71,801	76,588	-4,787	74,369	80,291	-5,922
500	76,04	81,32	-5,28	76,721	81,983	-5,262	80,327	85,265	-4,938
630	83,359	88,658	-5,299	81,42	87,084	-5,664	79,507	83,981	-4,474
800	80,671	84,448	-3,777	87,864	92,026	-4,162	87,726	92,076	-4,35
1000	81,25	85,646	-4,396	84,815	89,584	-4,769	94,542	100,04	-5,498
1250	80,068	82,611	-2,543	82,567	87,18	-4,613	86,553	91,12	-4,567
1600	81,537	82,229	-0,692	88,172	90,838	-2,666	87,604	89,518	-1,914
2000	81,281	81,256	0,025	82,111	82,881	-0,77	89,178	90,78	-1,602
2500	74,787	73,502	1,285	79,956	79,169	0,787	84,989	86,225	-1,236
3150	71,846	69,468	2,378	77,356	75,601	1,755	82,164	81,202	0,962
4000	68,055	64,58	3,475	72,686	70,234	2,452	81,244	80,819	0,425
5000	65,896	60,831	5,065	69,041	64,476	4,565	74,057	70,069	3,988

Tabelle 4.5: PI-Index für 56, 72 und 97 km/h

Die Kohärenzergebnisse sind in Abb. 4.7 und 4.8 abgebildet:



(a)



(b)

Abbildung 4.7: Kohärenzergebnisse für (a) 56 und (b) 72 km/h, jeweils für die linke und die rechte Intensitätssonde.

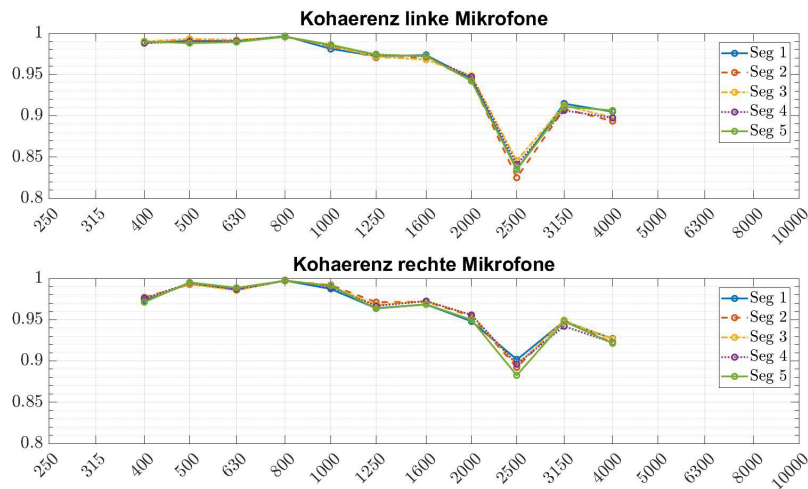


Abbildung 4.8: Kohärenzerggebnisse für 97 km/h für die linke und die rechte Intensitätssonde.

Richtungsvektor: Der Richtungsvektor zeigt in Betrag und Richtung immer von Prüfteifen weg, zu den Intensitätssonden.

Luftdruck während der Messungen: 1 bar

Representative Fotos oder Videos der Oberfläche mit einer Referenz für die Texturgröße:

Abbildung 4.2 auf Seite 40 zeigt anschaulich die Fahrbahnoberfläche im PFF inklusive Prüfreifen und Maßband.

Windgeschwindigkeit während der Messungen: Bei den Messungen in der Halle kann die Windgeschwindigkeit vernachlässigt werden.

Überwachung der Straßengeometrie, Straßenneigung und dem Straßengefälle: Der PFF stellt die Straßengeometrie in Form des rotierenden Rahrbahnringes dar. Die Straßengeometrie ist somit nahezu fehlerfrei, Kurven oder Straßenneigungen sind ausgeschlossen. Das Straßengefälle kann durch den Radius, in dem das Prüfrad rollt, dargestellt werden. Abweichungen gleichen sich jedoch die gleiche Neigung vor und hinter dem Reifen aus.

Überwachung der Straßenbeschaffenheit: Die Beschaffenheit der Straßenoberfläche wurde durch kontinuierliche Messungen der Fahrbahntemperatur überwacht. Zusätzlich ist eine Sichtprüfung nach jedem Messdurchgang durchgeführt worden. Abweichungen sind nicht festgestellt worden.

Historie des Straßenabschnitts inkl. vorherige Prüfergebnisse und Aufzeichnungen der Straßengestaltung, des Materials, technische Daten und Konstruktion: Die befahrene Fläche ist mit einem rutschfesten Safety-Walk-Belag ausgestattet, der als schallhart betrachtet werden kann.

Die Messparameter für die Messungen nach OBSI sind:

Prüfreifen: SRTT mit der Dimension 225/60R16

Shore-Härte des Prüfreifens: 70 ShoreA

Reifendruck: 2.0 bar

Aufgebrachte Prüflast: 3530 N

Korrekturfaktoren:

Korrektur für die Referenztemperatur von 20 °C:

- Umgebungstemperatur während der Messungen: 23 °C.
- Differenz zur Referenztemperatur: 3 °C.
- Die Korrektur wird mit folgender Formel berechnet:

$$IL_{\text{Normalized}}(\text{dBA}) = IL_{\text{Measured}}(\text{dBA}) + 0.072 (T_U (\text{°C}) - 20 \text{°C})$$

Eine Korrektur für eine abweichende Prüfgeschwindigkeit ist nicht nötig.

4.4.1 Grafische Darstellung der Messergebnisse

Abbildung 4.9 zeigt die grafische Auswertung der Schallintensitäten der Messungen nach OBSI mit SRTT-Prüfreifen und 3.53 kN Last:

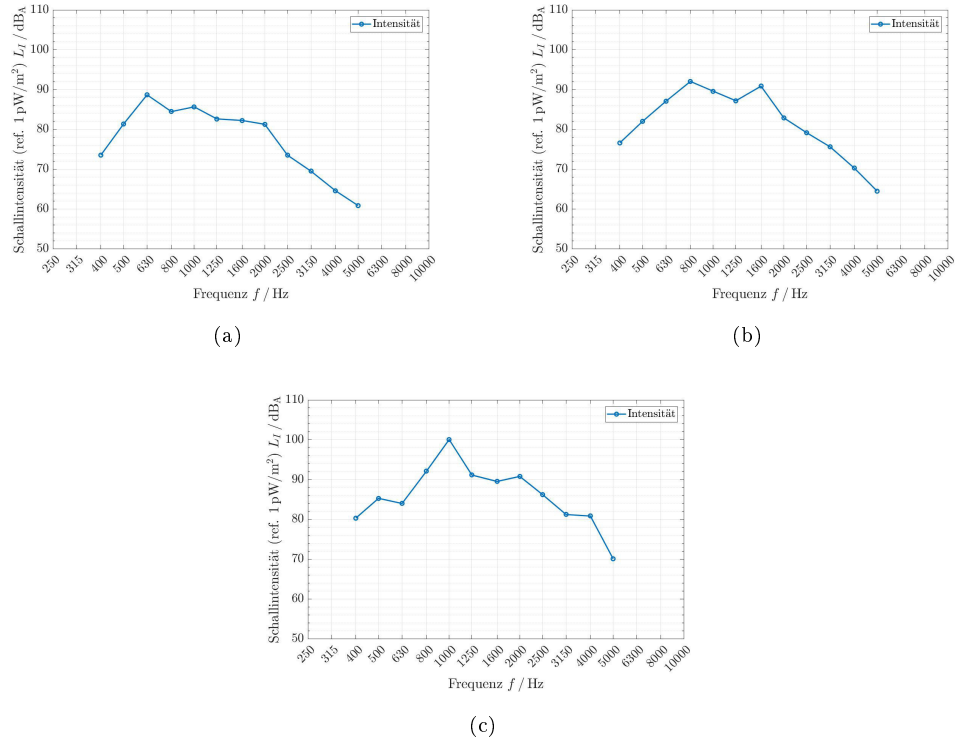
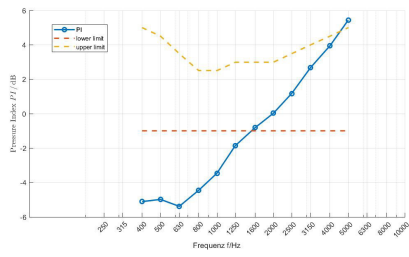
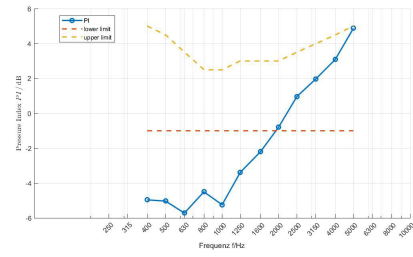


Abbildung 4.9: Grafische Auswertung der Messergebnisse nach OBSI, mit SRTT-Prüfreifen und 3.53 kN Last bei (a) 56, (b) 72 und (c) 97 km/h.

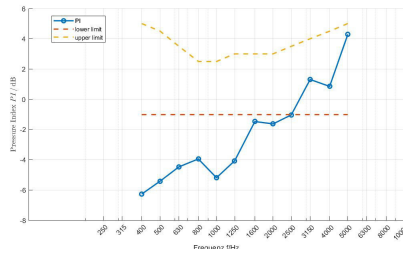
Abbildung 4.10 zeigt die grafische Auswertung der PI-Indices für die Messgeschwindigkeiten nach OBSI. Die Gültigkeitsbereiche befinden sich zwischen der roten und gelben Kurve:



(a)



(b)



(c)

Abbildung 4.10: Grafische Auswertung des PI-Index für jeden OBSI-Messdurchgang mit (a) 56, (b) 72 und (c) 97 km/h.

Kapitel 5

Vergleich

Damit die Messdaten nach den unterschiedlichen Messnormen vergleichbar sind, werden jeweils die Autospektren und die Terzbandpegel ermittelt und miteinander unter verschiedenen Aspekten verlichen.

5.1 Einfluss der Geräuschmechanismen

Bevor allerdings die unterschiedlichen Vergleiche gezogen werden, werden Anhand eines Prüflaufs mit einem SRTT-Reifen (3.2 kN aufgebrachter Prüflast, 80 km/h) die verschiedenen geräuscherzeugenden Anregungsmechanismen auf den Reifen mit den dazugehörigen Frequenzen in Abb. 5.1 dargestellt.

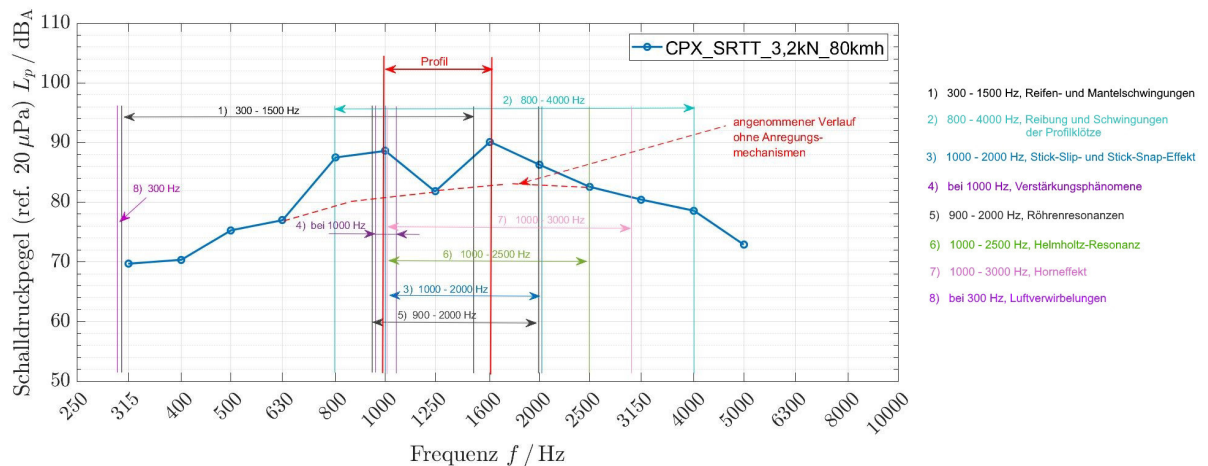


Abbildung 5.1: Einfluss der verschiedenen Geräuschmechanismen auf den SRTT-Reifen bei 3.2 kN Last und 80 km/h Geschwindigkeit

Die dämpfenden Eigenschaften des Reifens selbst gelten ab 250 Hz, somit sind sie im gesamten betrachteten Bereich aktiv. Der Frequenzbereich von 300 bis 1500 Hz, in dem die Reifen- und Mantelschwingungen wirken ist in der Abb. 5.1 schwarz gekennzeichnet, von 800 bis 4000 Hz wirken die Reibung und Schwingungen der Profilklotze (türkis), Stick-Slip - und Stick-Snap wirken im Bereich von 1000 bis 2000 Hz (blau), aerodynamische Anregungen sind ab 1000 Hz wirksam, Verstärkungsphänomene (lila) liegen bei 1000 Hz, Röhrenresonanzen (dunkelgrau) haben von 900 bis 2000 Hz Einfluss, die Helmholtz-Resonanz (grün) wirkt sich von 1000 bis 2500 Hz aus, der Horneffekt wirkt von 1000 bis 3000 Hz (rosa) und die

Luftverwirbelungen (pink) erzeugen Geräusche bei 300 Hz.

Der angenommene Verlauf des Schalldruckpegels ohne die Berücksichtigung von besonders starken Geräuschanregungsmechanismen durch das Reifenprofil ist in der Abb. 5.1 durch eine rote strichlierte Linie dargestellt. Man erkennt einen steilen Anstieg des Schalldruckpegels ab 630 Hz bis 800 Hz, bis zum Wendepunkt bei 1000 Hz. In diesem Bereich wirken verschiedene Geräuschanregungen, die mechanischen Reifen- und Mantelschwingungen, ab 800 Hz die Reibung und Schwingungen der Profilklotze, der Stick-Slip- und Stick-Snap - Effekt sowie ab 1000 Hz verschiedene aerodynamische Anregungen, die Helmholtz-Resonanz, die Röhrenresonanzen und der Horneffekt. Der zweite Ausschlag liegt bei 1600 Hz. Mechanisch wirken hier der Stick-Slip- und Stick-Snap-Effekt und die Klotzreibung und -schwingungen. Aerodynamische Effekte sind der Horneffekt, der Röhreneffekt sowie die Helmholtz-Resonanzen. In den Bereichen der Profiresonanzen sind alle mechanischen und aerodynamischen Effekte zur Geräuscherzeugung vertreten und summieren sich, sodass die gezeigten Überhöhungen entstehen.

Der untere Wendepunkt bei 1250 Hz kann am Abklingen bzw. Beginnen verschiedener Effekte liegen, wodurch hier der Schalldruckpegel einen Tiefpunkt hat. Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich jedoch sowohl für die Ausschläge als auch für das Tal nicht die letztgültige Ursache ermitteln.

In den folgenden Kapitel werden unter jeweils gleichen Bedingungen die drei standardisierten Prüfverfahren in Kap. 5.2, die Geschwindigkeiten in Kap. 5.3, die Reifen in Kap. 5.4 und die aufgebrachten Lasten in Kap. 5.5 verglichen und anschließend analysiert und interpretiert.

5.2 Vergleich der drei standardisierten Verfahren

Das Kapitel 4 hat die drei Verfahren nach den jeweils vorgeschriebenen Kriterien und Korrekturen behandelt. Hier werden die Messergebnisse mit den jeweils vorgeschriebenen Prüfparametern, jedoch einheitlicher Auswertung des Autospektrums und des Terzbandpegels miteinander verglichen. Im Folgenden ist exemplarisch nur eine Abbildung für eine repräsentative Geschwindigkeit dargestellt, alle Abbildungen zum Vergleich der drei standardisierten Verfahren sind im Anhang, ab Seite 79 zu sehen.

5.2.1 Vergleich der Messergebnisse mit den Parametern nach CPX

In der EN ISO 11918-2 (CPX) sind folgende Parameter vorgeschrieben:

- Prüfreifen:

P1: SRTT, Dim. 225/60R16

H1: Avon AV4, Dim. 195/80R14

- Messgeschwindigkeiten:

40 km/h

50 km/h

80 km/h

100 km/h

- Prüflast:

3.2 kN.

Die folgenden Messergebnisse zeigen die Messergebnisse nach den Kriterien nach CPX, verglichen mit den Messergebnissen nach RVS und OBSI.

Vergleich CPX-RVS

Vergleiche mit SRTT und AV4, 3.2kN und den Geschwindigkeiten nach CPX. Exemplarisch ist das Ergebnis für den Vergleich mit 80 km/h in Abb. 5.2 abgebildet:

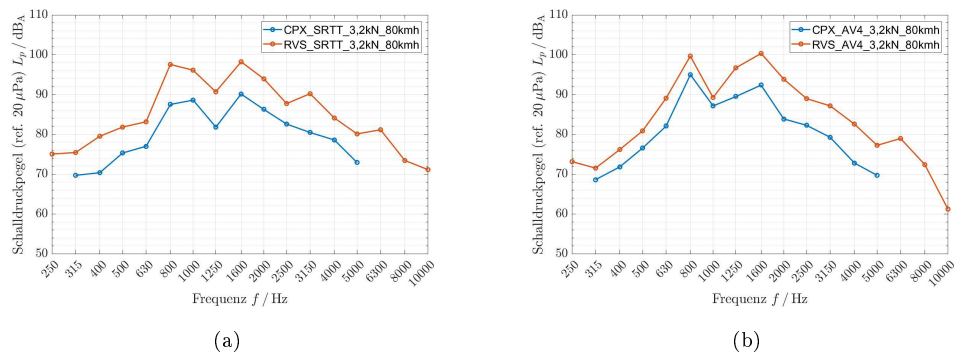


Abbildung 5.2: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX und RVS mit den Prüfparametern nach CPX und (a) dem SRTT-Reifen sowie (b) dem AV4-Reifen, jeweils bei 80 km/h.

Vergleich CPX-OBSI

Vergleiche der Messergebnisse von CPX mit den Ergebnissen von OBSI, unter den Prüfbedingungen von CPX. Die Schallintensitäten von OBSI können hier zum Vergleich nicht herangezogen werden, daher werden auch für OBSI das Autospektrum und dessen Terzbandpegel ermittelt und in den folgenden Grafiken gezeigt. In Abbildung. 5.3 werden die Messdaten mit SRTT- und AV4-Reifen unter der Last von 3.2kN und den Geschwindigkeiten von CPX dargestellt. Zusätzlich ist der Verlauf der Schallintensität in den Diagrammen enthalten.

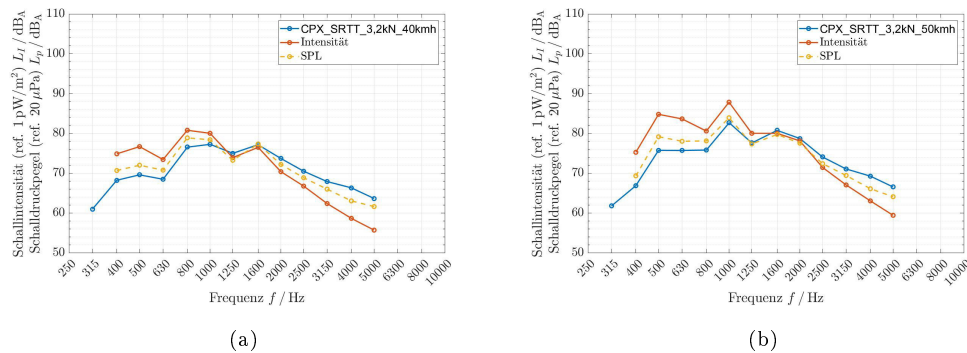


Abbildung 5.3: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und (a) dem SRTT-Reifen sowie (b) dem AV4-Reifen, jeweils bei 80 km/h.

Vergleich CPX-RVS-OBSI

Hier werden die Messparameter von CPX herangezogen und nach CPX, RVS und OBSI ausgewertet und verglichen. Die Prüfreifen sind der SRTT und der Avon AV4, mit einer Last von 3.2 ,kN und den Geschwindigkeiten 40, 50 und 80 km/h. Die Abbildung 5.4 zeigt die Ergebnisse mit dem SRTT- und AV4-Reifen:

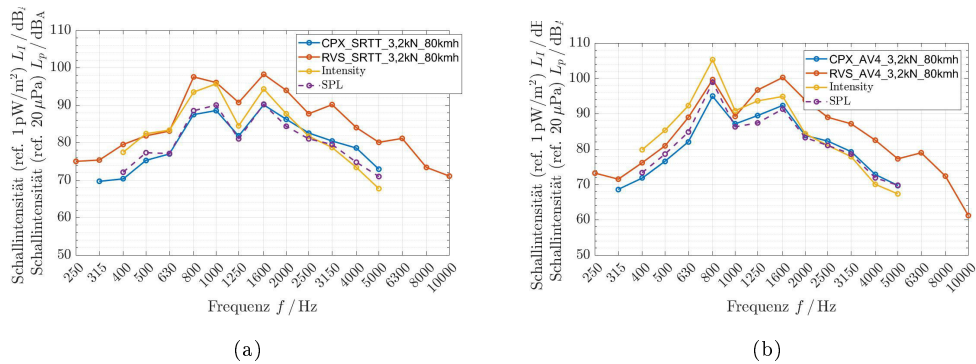


Abbildung 5.4: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX, RVS und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und (a) dem SRTT-Reifen sowie (b) dem AV4-Reifen, jeweils bei 80 km/h.

5.2.2 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche nach CPX

Alle Parameter der Messungen, Reifen SRTT und AV4, Last 3.2 kN und die Geschwindigkeiten 40, 50, 80 und 100 km/h, sind nach CPX gewählt worden. Die Auswertung erfolgte nach CPX und RVS, CPX und OBSI sowie nach allen drei Verfahren. Der Vergleich CPX-RVS zeigt, dass die RVS-Auswertungsmethode tendentiell höhere Schalldruckpegel ergibt als die CPX-Methode. Beim SRTT-Reifen ist die Differenz über den gesamten Frequenzbereich relativ konstant mit ca. 7 – 8 dB(A) siehe Abb. 5.2 und 5.4, ausgenommen bei 2 kHz hier liefert die RVS-Auswertung eine Differenz von ca. 15 dB(A). Die Differenzen der Auswertung des Schalldruckpegels des AV4-Reifens sind ebenfalls konstant, aber mit ca. 4 – 6 dB(A) geringer. Bei 1 kHz sind die Werte beinahe ident, die große Differenz bei 2 kHz ist hier nicht vorhanden.

Das Ergebnis der Auswertung nach OBSI ist die Schallintensität. Für den direkten Vergleich mit den anderen Verfahren ist für OBSI ebenfalls der Schalldruckpegel ermittelt und herangezogen worden, siehe Abb. 5.3 und 5.4. Die Gegenüberstellung mit CPX zeigt in niedrigeren Frequenzbereichen höhere Werte, in höherfrequenten Bereichen einen geringeren Schalldruckpegel als nach Auswertung mittels CPX. Zusätzlich ist in den Diagrammen 5.3 die Schallintensität dargestellt. Die Werte der Schalldruckpegel nach OBSI weichen mit ca. 2 – 4 dB(A) nur gering von denen nach CPX ab.

Im direkten Vergleich von CPX mit RVS und OBSI, Abb. 5.4, zeigt sich deutlich, dass durch RVS die höchsten Werte für den Schalldruckpegel errechnet werden.

5.2.3 Vergleich der Messergebnisse mit den Parametern nach RVS

In der österreichischen RVS 11.06.64 sind folgende Parameter vorgeschrieben:

- Prüfreifen:
 - Piarc Prüfreifen, Dim. 165/R15
- Messgeschwindigkeiten:
 - 30 km/h
 - 50 km/h
 - 80 km/h.
- Prüflast:
 - 4.0 kN.

Die folgenden Diagramme stellen die Messergebnisse nach den Kriterien von RVS in direkten Vergleich zu CPX und OBSI.

Vergleich RVS-CPX

In Abbildung 5.5 werden die Auswertungsverfahren von RVS und CPX mit den Parametern nach RVS gegenübergestellt:

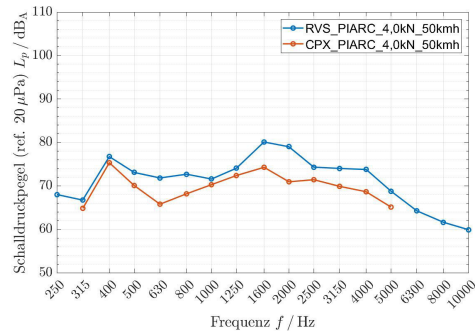


Abbildung 5.5: Vergleich der Auswertungsverfahren von RVS und CPX, mit den Prüfparametern nach RVS und dem Piarc-Reifen bei 50 km/h.

Vergleich RVS-OBSI

Vergleiche von RVS mit OBSI mit Piarc, 4.0 kN und 50 km/h nach RVS, ist in Abb. 5.6 zu sehen:

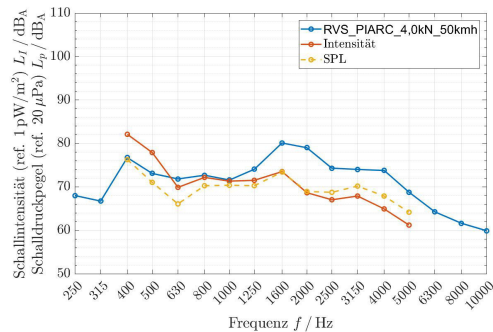


Abbildung 5.6: Vergleich der Auswertungsverfahren von RVS und OBSI, mit den Prüfparametern nach RVS und dem Piarc-Reifen bei 50 km/h.

Vergleich RVS-CPX-OBSI

Direkter Vergleich der drei Auswerteverfahren nach RVS, CPX und OBSI, mit den Prüfparametern nach RVS, Abb. 5.7:

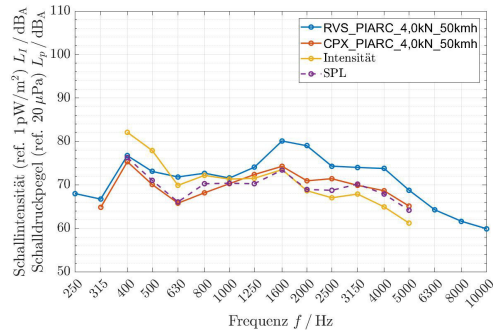


Abbildung 5.7: Vergleich der Auswertungsverfahren von RVS, CPX und OBSI, mit den Prüfparametern nach RVS und dem Piarc-Reifen bei 50 km/h.

5.2.4 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche nach RVS

Nach RVS ist der Piarc-Prüfreifen mit 4.0kN Last und den Geschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h eingesetzt worden und im Vergleich mit CPX und OBSI ausgewertet worden. Die Geschwindigkeiten sind ähnlich denen nach CPX, durch den Piarc-Reifen ergeben sich geringere Schalldruckpegel als durch die Prüfreifen von CPX. Die Gegenüberstellung zeigt wieder tendentiell höhere Werte durch die Auswertung nach RVS, die Ergebnisse nach CPX und OBSI sind wieder annähernd gleich.

5.2.5 Vergleich der Messergebnisse nach den Parametern nach OBSI

In der amerikanischen AASHTO TP 76-13 (OBSI) sind folgende Parameter vorgeschrieben:

- Prüfreifen:
SRTT, Dim. 225/60R16
- Messgeschwindigkeiten:
56 km/h
72 km/h
97 km/h
- Prüflast:
3.53 kN.

Die folgenden Messergebnisse zeigen die Ergebnisse nach den Kriterien von OBSI, verglichen mit den Messergebnissen von CPX und RVS.

Vergleich OBSI-CPX

Vergleiche mit SRTT, 3.53 kN und den Geschwindigkeiten nach OBSI. Das Ergebnis für 72 km/h ist in Abb. 5.8 zu sehen:

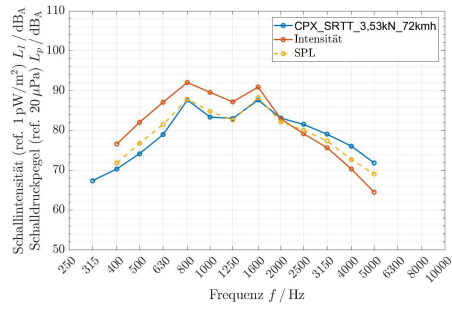


Abbildung 5.8: Vergleich der Auswertungsverfahren von OBSI und CPX mit den Prüfparametern nach OBSI und dem SRTT-Reifen bei 72 km/h.

Vergleich OBSI-RVS

Der Vergleich von OBSI mit RVS unter den Prüfbedingungen von OBSI sind in der folgenden Abb. 5.9 dargestellt:

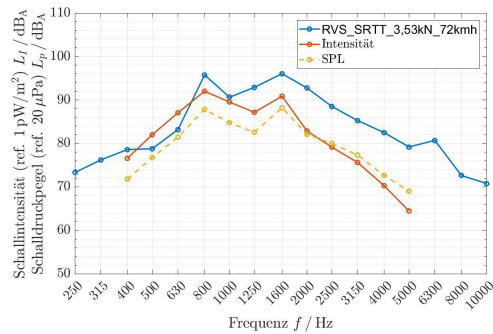


Abbildung 5.9: Vergleich der Auswertungsverfahren von OBSI und RVS mit den Prüfparametern nach OBSI und dem SRTT-Reifen bei 72 km/h.

Vergleich OBSI-CPX-RVS

Alle drei Auswertungsverfahren werden auch auf die Paarmeter von OBSI angewandt und verglichen, Abb. 5.10:

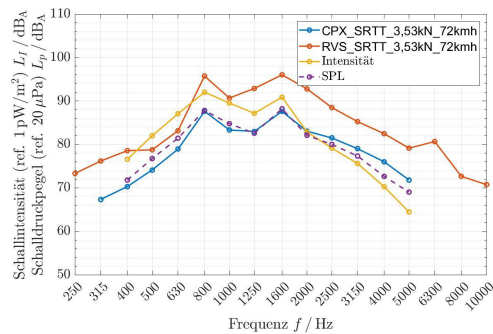


Abbildung 5.10: Vergleich der Auswertungsverfahren von OBSI, CPX und RVS mit den Prüfparametern nach OBSI und dem SRTT-Reifen bei 72 km/h.

5.2.6 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche nach OBSI

OBSI schreibt den SRTT-Reifen bei 3.53 kN Achslast und 56, 72 und 97 km/h Prüfgeschwindigkeit vor. Hier ist die Last ähnlich der bei CPX. Die Auswertungen nach allen drei Verfahren zeigen wieder die höchsten Schalldruckpegel-Werte nach RVS, annähernd ähnliche Werte ergeben sich durch die Berechnungen nach OBSI und CPX.

5.2.7 Einflüsse durch mechanische und aerodynamische Anregungsmechanismen

Zusammenfassend für alle drei standardisierten Verfahren soll hier noch einmal das Messergebnis nach CPX mit dem SRTT- und AV4-Reifen sowie mit 80 km/h im Vergleich mit den Auswertungsergebnissen nach RVS und OBSI gezeigt werden, um exemplarisch die mechanischen und aerodynamischen Anregungsmechanismen aus dem Diagramm zu veranschaulichen, siehe Abb. 5.11:

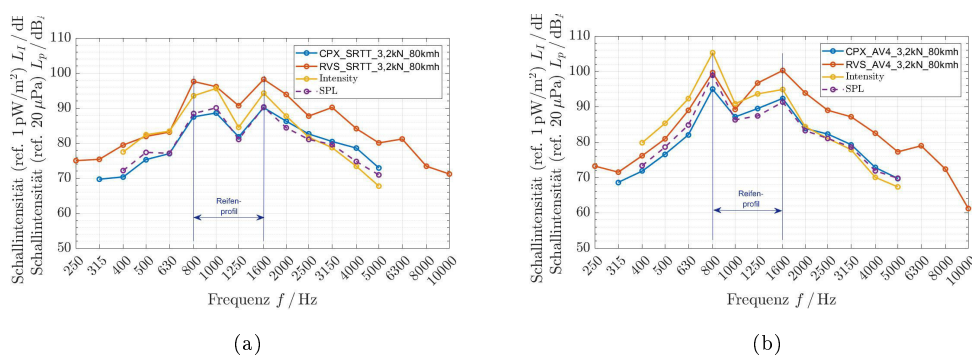


Abbildung 5.11: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX, RVS und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und (a) dem SRTT-Reifen sowie (b) dem AV4-Reifen, jeweils bei 80 km/h.

Die folgenden Erläuterungen zu den Anregungsmechanismen gelten für alle drei standardisierten Verfahren, lediglich die numerische Auswertung sowie die Positionierung bzw. Typen der Mikrofone unterscheiden sich. Die daraus resultierenden Effekte sind aber aus den Ergebnissen aller drei Verfahren ablesbar. Der ausgewertete Frequenzbereich für alle drei Verfahren ist größer als 250 Hz, und liegt damit über dem Bereich der Eigenfrequenzen (von 30 bis 250 Hz) der Reifen. Darüber hat ein Reifen i. a. dämpfende Eigenschaften, die mit steigender Frequenz stärker werden. Die dämpfende Wirkung des Reifens wird allerdings durch verschiedene andere Geräuschanregungen überlagert, die in Kap. 2.3, ab Seite 10 bereits erläutert worden sind. In Kap. 5.4 ab Seite 68 werden die Prüfreifen einer direkten Gegenüberstellung unterzogen, in der die genannten Effekte noch deutlicher erkennbar sind. Ausschläge sind durch die Auswertung nach RVS ausgeprägter als durch CPX und OBSI. Sie treten beim SRTT-Reifen und 40 bzw. 50 km/h bei 500, 1000 und 1600-2000 Hz auf (siehe Abb. 7.1 und Abb. 7.2 im Anhang). Bei Geschwindigkeiten von 80 bis 100 km/h gibt es keinen Ausschlag bei 500 Hz mehr. Die Ausschläge bei 500 Hz können durch das Aufschlagen und Ausschnappen der Profilklotze oder den Helmholtz-Resonanzeffekt begründet sein. Bei 1000 und 1600 – 2000 Hz können die Ausschläge von den Mechanismen der Reibung und Schwingungen der Klötze, der Adhäsion, der Lufteinsaugung und Verdrängung sowie den Verstärkungsphänomenen Röhren-Resonanz, Horneffekt und Helmholtz-Resonanz herrühren. Die Effekte und Ausschläge sind auch in den weiteren Vergleichen von Reifen und Geschwindigkeiten ablesbar.

5.3 Vergleich von Geschwindigkeiten

Beim Vergleich der Messungen nach Geschwindigkeiten werden je Messung ein Reifentyp sowie eine Last herangezogen, um identische Prüfbedingungen herzustellen. Unter den gleichen Bedingungen werden sodann Messdurchgänge mit den Parametern der standardisierten Verfahren bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten verglichen. Die aufgebrachten Achslasten sind die in den drei standardisierten Verfahren vorgeschriebenen, 3.2 kN für CPX, 3.53 kN für OBSI und 4.0 kN für RVS sowie jeweils 80 % des Loadindex jedes Reifens (ausg. Piarc), die Prüfreifen sind der SRTT, der AV4 und der Piarc. Ausgewertet wird der A-bewertete Schalldruckpegel nach CPX. Im Folgenden sind die Vergleiche bei verteilten Geschwindigkeiten, von 30, 60, 80 und 100 km/h gezeigt. Alle Abbildungen der Vergleiche von Geschwindigkeiten sind im Anhang ab Seite 85 zu sehen.

5.3.1 Vergleich der Geschwindigkeiten mit SRTT-Prüfreifen

Der SRTT-Prüfreifen wird bei einer Last und verschiedenen Geschwindigkeiten ausgewertet. Dabei gibt es je einen niedrigen, einen hohen und einen verteilten Geschwindigkeitsbereich.

Reifen SRTT und 3.2 kN Last Es werden die Messdaten des SRTT-Reifens nach CPX und mit 3.2 kN ausgewertet und bei niedrigen, hohen und von niedrigen bis hohen Geschwindigkeiten gemischt dargestellt und verglichen, Abb. 5.12:

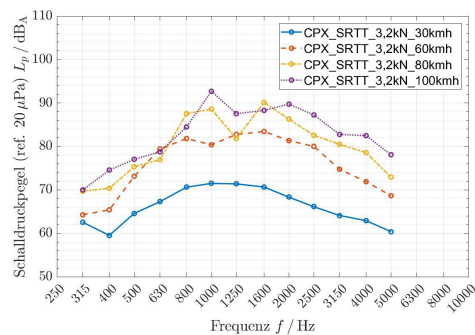


Abbildung 5.12: Vergleich des SRTT-Reifens bei 3.2 kN aufgebrachter Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Reifen SRTT und 3.53 kN Last Vergleich der Messergebnisse des SRTT-Reifens mit 3.53 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.13:

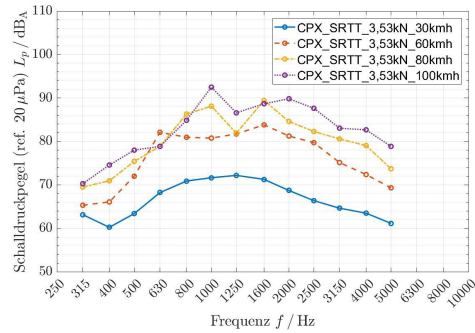


Abbildung 5.13: Vergleich des SRTT-Reifens bei 3.53 kN aufgebrachtter Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Reifen SRTT und 4.0 kN Last Vergleich der Messergebnisse des SRTT-Reifens mit 4.0 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.14:

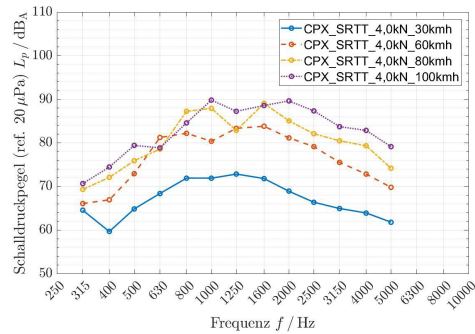


Abbildung 5.14: Vergleich des SRTT-Reifens bei 4.0 kN aufgebrachtter Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Reifen SRTT und 5.73 kN Last Vergleich der Messergebnisse des SRTT-Reifens mit 5.73 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.15:

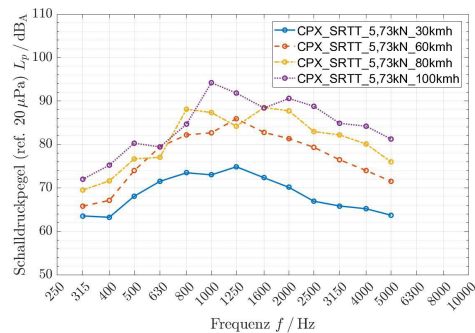


Abbildung 5.15: Vergleich des SRTT-Reifens bei 5.73 kN aufgebrachtter Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

5.3.2 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem SRTT-Prüfreifen

Der SRTT Prüfreifen ist mit jeder der drei Prüflasten und jeweils mit drei niedrigen, drei hohen und drei Geschwindigkeiten von 30 – 120 km/h ausgewertet worden. Die Auswertung erfolgte nach CPX.

Geschwindigkeitsvergleiche mit SRTT-Reifen Der SRTT-Reifen wurde mit den Lasten

- 3.2 kN
- 3.53 kN
- 4.0 kN
- 5.73 kN (80% des Loadindex des SRTT-Reifens)

beaufschlagt. Die ausgewerteten Geschwindigkeitsbereiche sind:

- 30, 40 und 50 km/h der Bereich für niedrige Geschwindigkeiten,
- 30, 60, 80 und 100 km/h für den von niedrig bis hoch verteilten Geschwindigkeitsbereich und
- 80, 100 und 120 km/h der höhere Geschwindigkeitsbereich.

Der Verlauf des Schalldruckpegels bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist über den betrachteten Frequenzbereich bei allen Lasten relativ sprunghaft. Nur bei 30 km/h ist der Verlauf eine glatte Kurve. Bei Betrachtung der Geschwindigkeiten im niedrigen und höheren Bereich kreuzt die Kurve der mittleren Geschwindigkeit die Kurve der jeweils höheren und niedrigeren. Das Diagramm mit den Geschwindigkeiten von 80 – 120 km/h (siehe Abb. 7.16 im Anhang) zeigt deutlich die steigenden Schwankungen im höheren Geschwindigkeitsbereich. Die Variierung der Last hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse.

5.3.3 Vergleich der Geschwindigkeiten mit AV4-Prüfreifen

Der AV4-Reifen wird bei jeweils einer Last und mit verschiedenen Geschwindigkeiten ausgewertet. Dabei gibt es wieder wie beim SRTT-Reifen je einen niedrigen, einen hohen und einen verteilten Geschwindigkeitsbereich.

Reifen AV4 und 3.2 kN Last Es werden die Messdaten des AV4-Reifens nach CPX und mit 3.2 kN ausgewertet und bei niedrigen, hohen und von niedrigen bis hohen Geschwindigkeiten gemischt dargestellt und verglichen, Abb. 5.16:

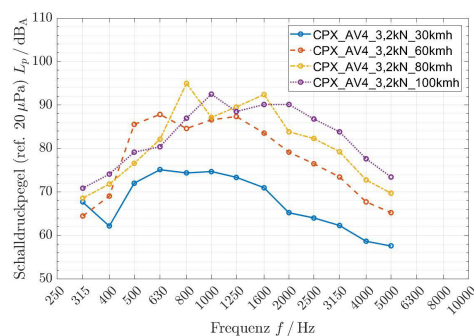


Abbildung 5.16: Vergleich des AV4-Reifens bei 3.2 kN aufgebrachtener Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Vergleich der Messergebnisse des AV4-Reifens mit 3.53 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.17:

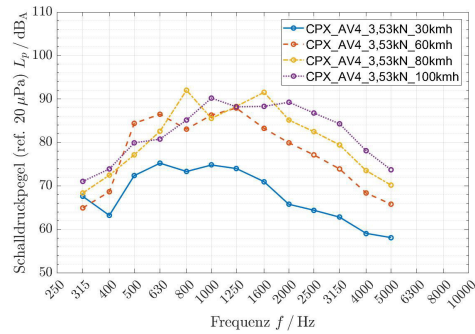


Abbildung 5.17: Vergleich des AV4-Reifens bei 3.53 kN aufgebrachtener Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Reifen AV4 und 4.0 kN Last Vergleich der Messergebnisse des AV4-Reifens mit 4.0 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.18:

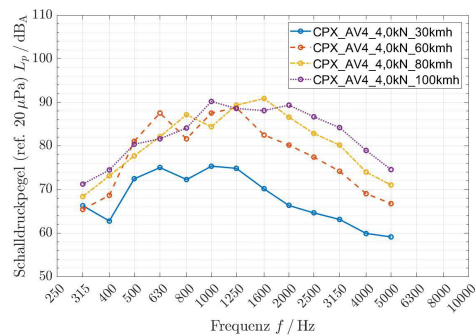


Abbildung 5.18: Vergleich des AV4-Reifens bei 4.0 kN aufgebrachtener Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Reifen AV4 und 7.0 kN Last Vergleich der Messergebnisse des AV4-Reifens mit 7.0 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.19:

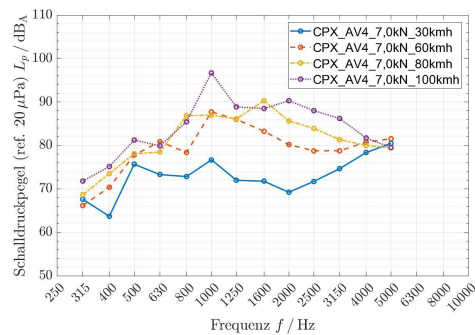


Abbildung 5.19: Vergleich des AV4-Reifens bei 7.0 kN aufgebrachtener Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

5.3.4 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem AV4-Prüfreifen

Jeder der drei Prüfreifen ist mit jeder der drei Prüflasten und jeweils mit drei niedrigen, drei hohen und drei Geschwindigkeiten von 30 – 120 km/h ausgewertet worden. Die Auswertung erfolgte nach CPX.

Geschwindigkeitsvergleiche mit AV4-Reifen Die Vorgehensweise für den Vergleich von Geschwindigkeiten mit dem AV4-Reifen erfolgte analog zu den Vergleichen des SRTT-Reifens. Der AV4-Reifen wurde mit den Lasten

- 3.2 kN
- 3.53 kN
- 4.0 kN
- 7.0 kN (80% des Loadindex des AV4-Reifens)

beaufschlagt. Die ausgewerteten Geschwindigkeitsbereiche sind:

- 30, 40 und 50 km/h der Bereich für niedrige Geschwindigkeiten,
- 30, 60, 80 und 100 km/h für den von niedrig bis hoch verteilten Geschwindigkeitsbereich und
- 80, 100 und 120 km/h der höhere Geschwindigkeitsbereich.

Die Kurven des Schalldruckpegels weisen für den Vergleich im niedrigen Geschwindigkeitsbereich und im höheren Frequenzbereich eine bessere Konstanz auf als es beim SRTT-Reifen der Fall ist. Im höheren Geschwindigkeitsbereich treten Überschneidungen der Kurven im Frequenzbereich von 630 – 1600 Hz auf. Im Diagramm mit den über alle Bereiche verteilten Geschwindigkeiten haben insbesondere die Kurven für 60 und 80 km/h im Frequenzbereich von 400 – 1600 Hz unbeständige Verläufe. Unterschiedliche Lasten bei den Gegenüberstellungen der Geschwindigkeiten haben nur unwesentlichen Anteil.

5.3.5 Vergleich der Geschwindigkeiten mit Piarc-Prüfreifen

Der Piarc-Standardtestreifen wird ebenfalls bei jeweils einer Last und verschiedenen Geschwindigkeiten ausgewertet. Dabei gibt es je einen niedrigen, einen hohen und einen verteilten Geschwindigkeitsbereich.

Reifen Piarc und 3.2 kN Last Es werden die Messdaten des Piarc-Reifens nach CPX und mit 3.2 kN ausgewertet und bei niedrigen, hohen und von niedrigen bis hohen Geschwindigkeiten gemischt dargestellt und verglichen, Abb. 5.20:

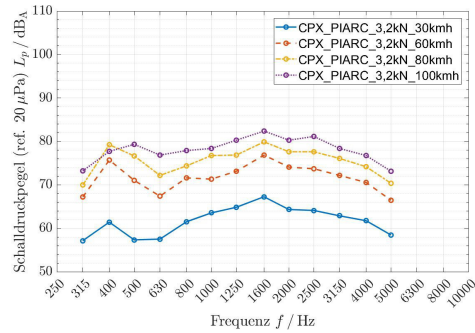


Abbildung 5.20: Vergleich des Piarc-Reifens bei 3.2 kN aufgebracht Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Reifen Piarc und 3.53 kN Last Vergleich der Messergebnisse des AV4-Reifens mit 3.53 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.21:

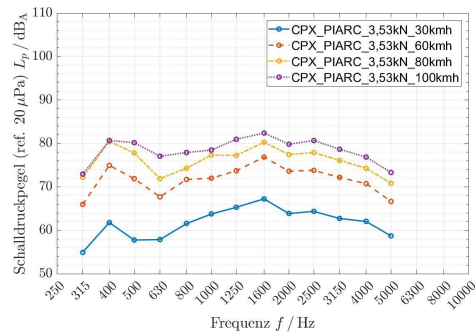


Abbildung 5.21: Vergleich des Piarc-Reifens bei 3.53 kN aufgebracht Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Vergleich der Messergebnisse des Piarc-Reifens mit 4.0 kN Last und verschiedenen Geschwindigkeiten, Abb. 5.22:

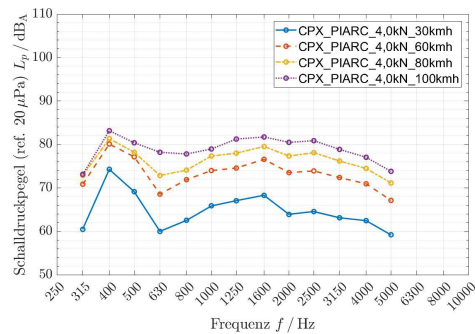


Abbildung 5.22: Vergleich des Piarc-Reifens bei 4.0 kN aufgebracht Achslast mit unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h Geschwindigkeiten.

Für den Piarc-Prüfreifen ist kein Loadindex des Herstellers gegeben, daher wurde auf Messungen mit 80% des Loadindexes verzichtet.

5.3.6 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem Piarc-Prüfreifen

Jeder der drei Prüfreifen ist mit jeder der drei Prüflasten und jeweils mit drei niedrigen, drei hohen und drei Geschwindigkeiten von 30 – 120 km/h ausgewertet worden. Die Auswertung erfolgte nach CPX.

Geschwindigkeitsvergleiche mit dem Piarc-Reifen Die Vorgehensweise für den Vergleich von Geschwindigkeiten mit dem Piarc-Reifen erfolgte analog zu den Vergleichen des SRTT- und AV4-Reifens. Der Piarc-Reifen wurde mit den Lasten

- 3.2 kN
- 3.53 kN
- 4.0 kN

beaufschlagt. Die ausgewerteten Geschwindigkeitsbereiche sind:

- 30, 40 und 50 km/h der Bereich für niedrige Geschwindigkeiten,
- 30, 60, 80 und 100 km/h für den von niedrig bis hoch verteilten Geschwindigkeitsbereich und
- 80, 100 und 120 km/h der höhere Geschwindigkeitsbereich.

Im Vergleich zu den SRTT- und AV4-Reifen hat der Piarc sehr konstante Schalldruckpegel-Verläufe über den betrachteten Frequenzbereich. Überschneidungen der Kurven sind nur im niedrigen Frequenzbereich und bei Betrachtung der geringen Geschwindigkeiten zu erkennen. Bei Frequenzen > 630 Hz verlaufen die Kurven des Schalldruckpegels nahezu parallel.

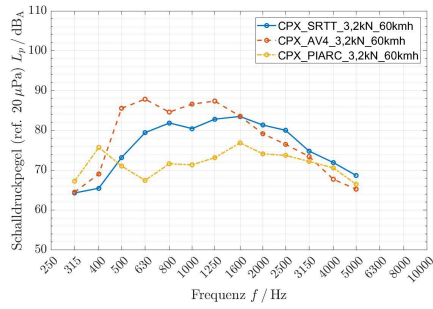
Aus den Diagrammen lässt sich die Abhängigkeit des Schalldruckpegels von der Geschwindigkeit vor allem bei den verteilten Geschwindigkeiten von 30 bis 120 km/h ablesen. Der Sprung von 30 auf 60 km/h ist hier am größten, ebenso die Pegeldifferenz.

Die Gegenüberstellungen der Geschwindigkeiten geben vorab auch schon einen Einblick in das Geräuschverhalten der unterschiedlichen Reifen.

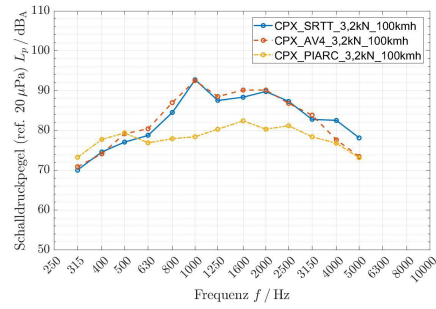
5.4 Vergleich der Reifen

Bei den Messdurchläufen sind 3 Prüfreifentypen verwendet worden, der SRTT, der AV4 sowie der Piarc. Hier werden bei jeweils einer Prüflast und Geschwindigkeit diese drei Reifen direkt gegenübergestellt. Zur einheitlichen Darstellung wird die Auswertung nach CPX herangezogen. Hier sind exemplarisch nur die Vergleiche mit 60 und 100 km/h dargestellt, alle Abbildungen dieser Vergleiche sind im Anhang, auf Seite 96 zu sehen.

Vergleich der Reifen mit 3.2 kN Last und unterschiedlichen Geschwindigkeiten Es werden alle drei Reifentypen bei jeweils einer Last von 3.2 kN und einer Geschwindigkeit verglichen, Abb. 5.23:



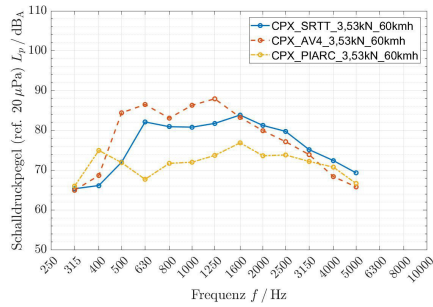
(a)



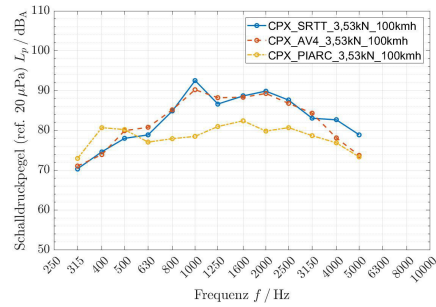
(b)

Abbildung 5.23: Vergleich der drei Prüfreifentypen mit 3.2kN Last und jeweils bei (a) 60 und (b) 100 km/h.

Es werden alle drei Reifentypen bei jeweils einer Last von 3.53kN und einer Geschwindigkeit verglichen, Abb. 5.24:



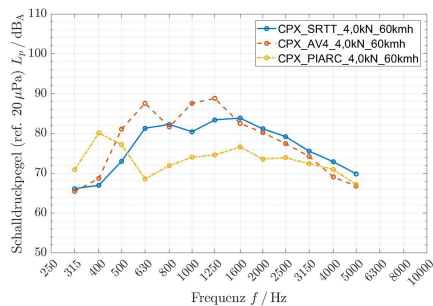
(a)



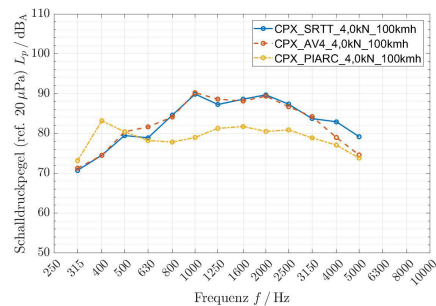
(b)

Abbildung 5.24: Vergleich der drei Prüfreifentypen mit 3.53kN Last und jeweils bei (a) 60 und (b) 100 km/h.

Vergleich der Reifen mit 4.0kN Last und unterschiedlichen Geschwindigkeiten Es werden alle drei Reifentypen bei jeweils einer Last von 4.0kN und einer Geschwindigkeit verglichen, Abb. 5.25:



(a)



(b)

Abbildung 5.25: Vergleich der drei Prüfreifentypen mit 4.0kN Last und jeweils bei (a) 30 und (b) 100 km/h.

5.4.1 Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Reifen

Alle Auswertungen zur Gegenüberstellung der drei Prüfreifen sind nach CPX durchgeführt worden, um vergleichbare Werte zu erhalten. Als Auswerteparameter sind alle vorhandenen Prüflasten und -geschwindigkeiten herangezogen worden. In den Diagrammen, Abb. 7.24, 7.25 und 7.26 im Anhang sind exemplarisch für jeden Reifenvergleich die Geschwindigkeiten 30, 60, 80, 100 und 120 km/h aufgetragen.

Der SRTT-Reifen zeigt unabhängig von allen Geschwindigkeiten im niedrigeren Frequenzbereich geringere Schalldruckpegel als im mittleren Frequenzbereich. Ab ca. 2500 Hz beginnt die Kurve wieder abzufallen. Die Verläufe der Schalldruckpegel sind gleichmäßiger als die des AV4-Reifens, bis Frequenzen von ca. 1600 Hz ist der Pegel im Allgemeinen etwas geringer als der des AV4, darüber steigt der SRTT-Schalldruckpegel gegenüber dem AV4 immer geringfügig an. Die Kurven der Schalldruckpegel des SRTT und AV4 verlaufen jedoch relativ ähnlich. Im Vergleich zum Piarc ergeben sich nur im niedrigen Frequenzbereich geringere Werte des Schalldruckpegels, darüber ist er höher. In Abbildung 5.26 ist das Reifenprofil des SRTT-Reifens dargestellt:



Abbildung 5.26: Reifenprofil des SRTT-Reifens. [29]

Der AV4-Reifen besitzt vor allem im mittleren Frequenzbereich von ca. 630 bis 1600 Hz die sprunghaftesten Schalldruckpegel im Vergleich zu den anderen Reifen. Der Verlauf ist ähnlich dem des SRTT, bis ca. 1600 Hz jedoch höher, darüber niedriger als der des SRTT. Die Kurven des Piarc werden nur bei niedrigen und hohen Frequenzen gekreuzt, im Allgemeinen hat der AV4 eine größere Schallemission als der Piarc. Abbildung 5.27 zeigt das Profil des AV4-Reifens:



Abbildung 5.27: Reifenprofil des AV4-Reifens. [30]

Der Piarc-Reifen Siehe Abb. 5.28, hat über den gesamten ausgewerteten Frequenzbereich die gleichmäßigsten Verläufe, wobei die Werte unter 500 Hz meist höher als die des SRTT und AV4 liegen und über

4000 Hz höher als der Verlauf des AV4-Reifens sind. Im zwischenliegenden Frequenzbereich hat der Piarc relativ konstante und geringere Schalldruckpegel-Werte als die beiden anderen Prüfreifen.



Abbildung 5.28: Reifenprofil des Piarc-Reifens.

Mechanische und aerodynamische Einflüsse auf das Geräuschverhalten der Reifen Die direkten Vergleiche unter den Reifen zeigen am deutlichsten die verschiedenen mechanischen und aerodynamischen Einflüsse auf das Reifen-Fahrbahn-Geräuschverhalten auf. Nachstehend sind die Mechanismen und die davon beeinflussten Frequenzbereiche aufgelistet:

- Aufschlagen und Ausschnappen der Profilklötze im Frequenzbereich von 333 bis 1667 Hz (siehe Tab. 5.1 auf Seite 72),
- Reibung und Schwingung der Profilklötze im Frequenzbereich von 800 bis 4000 Hz
- Stick-Slip - und Stick-Snap - Effekt über 1 bis 2 kHz,
- Lufteinsaugung und Luftverdrängung über 1 kHz,
- Air-Pumping und schwingende Luftsäulen im Frequenzbereich von 1 kHz,
- Röhrenresonanzen bei 900 bis 2000 Hz, siehe Tab. 5.2 auf Seite 72,
- Horneffekt und Helmholtz-Resonanzen im Bereich von 1 bis 3 kHz,
- Luftverwirbelungen bei ca. 300 Hz sowie
- der Einfluss der Fahrbahntextur. Der auf die Fahrbahn aus Stahl aufgebrachte Safety-Walk - Belag ist Schallhart und hat somit keine Geräuschdämpfenden Eigenschaften. Er reflektiert und Verstärkt durch die oben genannten Mechanismen das Reifen-Fahrbahngeräusch.

v in km/h	v in m/s	f _{AV4} in Hz	f _{SRTT} in Hz
30	8,33	333,33	416,67
40	11,11	444,44	555,56
50	13,89	555,56	694,44
56	15,56	622,22	777,78
60	16,67	666,67	833,33
72	20,00	800,00	1000,00
80	22,22	888,89	1111,11
97	26,94	1077,78	1347,22
100	27,78	1111,11	1388,89
120	33,33	1333,33	1666,67

Tabelle 5.1: Frequenzen durch das Aufschlagen und Ausschnappen der Profilklötze des AV4- und SRTT-Reifens. Der Piarc-Prüfreifen besitzt nur Längsrillen, daher hat dieser Effekt keine Auswirkung auf den Piarc-Reifen.

$\lambda/2$ - Resonator:			
n	f _{Piarc} in Hz	f _{AV4} in Hz	f _{SRTT} in Hz
1	197,40	185,91	183,93
2	394,81	371,82	367,86
3	592,21	557,73	551,79
4	789,61	743,64	735,72
5	987,01	929,55	919,65
6	1184,42	1115,46	1103,58
7	1381,82	1301,37	1287,51
8	1579,22	1487,28	1471,44
9	1776,62	1673,19	1655,37
10	1974,03	1859,10	1839,30

$\lambda/4$ - Resonator:			
n	f _{Piarc} in Hz	f _{AV4} in Hz	f _{SRTT} in Hz
1	98,70	92,95	91,97
2	296,10	278,86	275,90
3	493,51	464,77	459,83
4	690,91	650,68	643,76
5	888,31	836,59	827,69
6	1085,71	1022,50	1011,62
7	1283,12	1208,41	1195,55
8	1480,52	1394,32	1379,48
9	1677,92	1580,23	1563,41
10	1875,32	1766,14	1747,34

Tabelle 5.2: Die Tabellen listen die Werte der Röhrenresonanzen des $\lambda/2$ - und $\lambda/4$ -Resonators für die drei Reifentypen auf. Die linke Tabelle zeigt die Werte für den $\lambda/2$ -Resonator, er gilt für den Piarc-Reifen. Die rechte Tabelle zeigt die Resonanzfrequenzen des $\lambda/4$ -Resonators, er gilt für den AV4- und SRTT-Reifen.

5.5 Vergleich von Lasten

Hier wird jeweils ein Reifentyp bei einer Geschwindigkeit, jedoch mit unterschiedlichen Lasten ausgewertet und im Vergleich dargestellt. In jedem Diagramm in Abb. 5.29, 5.30 und 5.31 sind alle vier bzw. drei Lasten des jeweiligen Reifens aufgetragen:

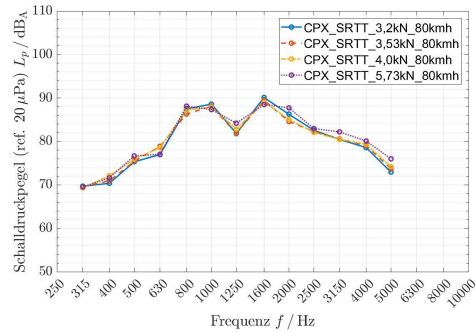


Abbildung 5.29: Vergleich des SRTT-Reifens mit allen Lastfällen und 80 km/h.

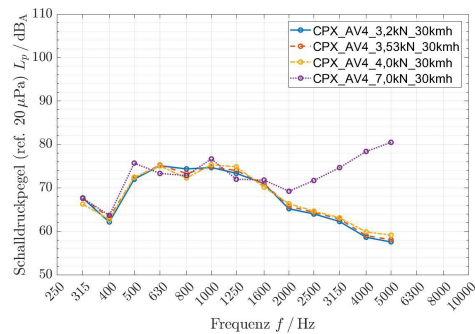


Abbildung 5.30: Vergleich des AV4-Reifens mit allen Lastfällen und 30 km/h.

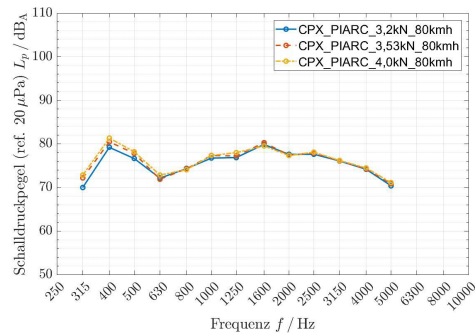


Abbildung 5.31: Vergleich des Piarc-Reifens mit allen Lastfällen und 80 km/h.

Die Abbildungen der Auswertungen für alle Prüfreifen und allen Achslasten sind im Anhang zu sehen, ab Seite 99.

Zusammenfassung und Interpretation der Vergleiche mit unterschiedlichen Achslasten Um die angewandten Prüflasten zu Vergleichen sind jeweils ein Prüfreifen mit einer Geschwindigkeit aber mit allen verfügbaren Lasten beaufschlagt und dargestellt worden, siehe Abb. 5.29, 5.30 und 5.31. Für alle Reifen zeigen sich keine nennenswerten Unterschiede bei Variierung der Achslast. Der SRTT weist bei Gegenüberstellung der Achslasten über alle Frequenz- und Geschwindigkeitsbereiche ähnliche Schalldruckpegel-Werte auf. Nur für den AV4-Reifen ist bei 7.0 kN anzumerken, dass ab 2000 Hz und

im unteren Geschwindigkeitsbereich der Schalldruckpegel wieder ansteigt; bei höheren Geschwindigkeiten gleicht sich der Verlauf wieder denen mit geringeren Lasten an, siehe Abb. 5.30. Der Piarc zeigt bei einer Last von 4.0 kN höhere Schalldruckpegel bei niedrigen Geschwindigkeiten und im niedrigen Frequenzbereich, unter 630 Hz.

Kapitel 6

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Reifen-Fahrbahn - Geräusch. Motivation für die Erforschung der Geräusche durch rollende Reifen auf Straßen ist in erster Linie die Reduzierung dadurch verursachter Belastungen für Anrainer. Im Kapitel 2 sind die physikalischen Grundlagen zu Schwingungen und Schall, mit den mechanischen und aerodynamischen Anregungseffekten behandelt worden. Dabei wird der Reifen als Ganzes sowie in Teilen, wie die Profilierung, die Klötze oder die Seitenwand betrachtet. Physikalische Effekte wie Reibung, Adhäsion, Vibration in radialer und tangentialer Richtung, Materialeigenschaften, Luftströmungen und Resonanzen spielen bei der Geräuschenstehung eine wichtige Rolle und werden in verschiedenen Mess- und Prüfanordnungen untersucht.

Das Kapitel 3 beschäftigt sich mit den gängigen standardisierten Prüfverfahren für die Messung des Reifen-Fahrbahngeräusches bzw. das Verkehrsgeräusch im Allgemeinen. Darin werden die Methoden, Geräte, Umgebungsbedingungen und Auswertungskriterien beschrieben. Normen und Richtlinien dienen der standardisierten Untersuchung der Verkehrs- und Reifen-Fahrbahngeräusche und erlauben eine objektive Beurteilung der Messergebnisse. Hier werden die aktuellen Verfahren vorgestellt und die wichtigsten Eigenschaften wie die zu verwendenden Mikrofontypen, Umgebungseigenschaften und Methodiken erörtert. Unterschieden wird nach mobilen Verfahren für die Ermittlung des Reifen-Fahrbahngeräusches durch einen nachgezogenen Prüfanhänger (CPX und RVS) oder am Prüffahrzeug montierten Intensitätssonden (OBSI) und stationären Verfahren für das Verkehrsgeräusch im Allgemeinen (SPB), wo das Messmikrofon am Straßenrand positioniert wird.

Es sind Messungen nach den drei Verfahren CPX, RVS und OBSI in abgewandelter Form am PFF der BAST durchgeführt worden. Bei den untersuchten Methoden handelt es sich um mobile Messverfahren, wo die Messmikrofone in einem nachgezogenen Anhänger oder direkt am Prüffahrzeug montiert sind. Diese Vorgehensweise war am PFF nicht möglich, daher ist für die korrekten Mikrofonpositionen eine Haltevorrichtung gefertigt worden, die die Mikrofone an den vorgeschriebenen Stellen und Ausrichtungen zum Reifen fixiert. Der Prüfreifen rollt am untersten Punkt des Fahrbahnringes des PFF, die Mikrofonanordnung ist davor fix montiert worden. Der Straßenabschnitt ist durch den sich drehenden Fahrbahnring simuliert worden. Der Reifeninnendruck wurde, abweichend der RVS (2.3 bar), für alle Reifen mit 2.0 bar gewählt. Diverse Umgebungseigenschaften wie Wind und Temperatur konnten sehr gut konstant gehalten werden, da sich der PFF in einer Halle befindet. Die Prüflasten können für alle Verfahren genau eingestellt und während des Messdurchgangs konstant gehalten werden. Die Messergebnisse sind in Kapitel 4 protokolliert.

Am PFF war es möglich, Messungen nach den drei Verfahren gleichzeitig durchzuführen und mit zusätzlichen Parametern zu erweitern. Die Messergebnisse werden in Kapitel 5 nach verschiedenen Gesichtspunkten analysiert. Es werden die drei standardisierten Verfahren, die verschiedenen Messgeschwindigkei-

ten, die Prüfreifen sowie die aufgebrachten Lasten direkt gegenübergestellt. Aus den Vergleichen werden Schlüsse gezogen und interpretiert, mögliche Ursachen für Ausschläge und Breitbandverschiebungen in den Schalldruckpegelverläufen werden aus den Beobachtungen festgestellt.

Der Vergleich der Verfahren hat gezeigt, dass unabhängig vom Reifen nach CPX und OBSI sehr ähnliche Ergebnisse erzielt werden, während die Auswertung nach RVS tendenziell höhere Schalldruckpegel ergibt. Dies zeigt sich deutlich bei Ausschlägen, diese sind nach der RVS-Auswertungsmethode ebenfalls ausgeprägter.

Die Gegenüberstellung von unterschiedlichen Geschwindigkeiten hat erwartungsgemäß höhere Schalldruckpegel ergeben, je höher die Geschwindigkeit gewählt worden ist. Bei größerer Geschwindigkeit von 80 bis 120 km/h nehmen die Differenzen allerdings ab bzw. überschneiden sich die Kurven, der Einfluss der Geschwindigkeit auf das Reifen-Fahrbahngeräusch nimmt ab. Dieses Phänomen im Frequenzbereich von 630 bis 1600 Hz ist besonders stark beim AV4-Reifen zu beobachten, aber auch beim SRTT. Beim Piarc tritt dies leicht im höheren Geschwindigkeits- und niedrigen Frequenzbereich von 315 bis 400 Hz auf.

Der Piarc-Reifen hat sehr konstante und im Vergleich mit den beiden anderen Reifen die niedrigsten Verläufe des Schalldruckpegels über den gesamten betrachteten Frequenzbereich, weist jedoch bei 400 Hz und niedrigeren Geschwindigkeiten eine Überhöhung auf. Der AV4-Prüfreifen hat von 400 bis ca. 1600 Hz die höchsten Schalldruckpegel gegenüber den anderen Reifen. Ab ca. 1600 Hz sind die Schalldruckpegel des SRTT-Reifens im Allgemeinen höher.

Aufgebrachte Lasten haben kaum Einfluss auf das abgegebene Reifen-Fahrbahngeräusch.

6.1 Ausblick

In dieser Arbeit wurde der Reifen-Fahrbahn - Teilbereich des Verkehrsgeräusches untersucht. Weitere Optimierungen der Reifenprofilierungen, des Reifenmaterials und der Reifenquerschnitte sowie der Straßenbeläge können beachtliche Verbesserungen hinsichtlich des abgegebenen Geräusches liefern [2]. Durch die Messergebnisse zeigt sich jetzt schon ein geringeres Geräusch alleine durch die Längsrillen des Piarc-Reifens. Die Abstimmung der Profilierung hinsichtlich Sicherheit bei der Wasserabführung und auf rutschigen Fahrbahnen sind Sache der Reifenhersteller. Die Versuche haben allerdings schon deutliche Unterschiede zu den GeStrO-Reifen gezeigt. Auch die Fahrzeugindustrie arbeitet an der Optimierung der verschiedenen geräuschabstrahlenden Komponenten, wie Motor, Getriebe, aerodynamisches Außendesign und der Geräuschdämmung insgesamt.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Mundl. *VO-Skriptum Reifentechnik*. TU Wien, 2016.
- [2] Ernst-Ulrich Saemann. *Reduzierung des Reifen-/Fahrbahngeräusches*. Continental AG, Hannover, 2006.
- [3] Umweltbundesamt. Auswirkungen von Lärm, http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/laerm/laerm_auswirkungen/, Wien, 2018.
- [4] Dr. Glaeser, Dr. Bartolomaeus. *PFF*. Bundesanstalt für Strassenwesen, Bergisch-Gladbach, 2014.
- [5] Thorsten Dreher, Michael Frey, Frank Gauterin, Marcus Geimer. Akustik - Allrad-Rollenprüfstand, <https://www.fast.kit.edu/lff/4664.php>, Karlsruhe, 2018.
- [6] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Rollenprüfstand, <https://de.wikipedia.org/wiki/Rollenprüfstand>, 2018.
- [7] AIP Automotive. Gepulster Flachbahnprüfstand, <https://www.aip-automotive.de/de/Produkte/Prüfstände/FORSCHUNG-UND-ENTWICKLUNG/Gepulster-Flachbahnprüfstand>, 2018.
- [8] Michelin. *The Tyre*. Société de Technologie Michelin, Clermont-Ferrand, 2002.
- [9] Annett Wettig. Vom Schalldruck zum Schalldruckpegel, <https://www.inventer.de/wissen/grundlagen-der-lueftung/geraesuentwicklung-und-schall-bei-der-lueftung/>, 2018.
- [10] Stefan Gössner. Mechanik, das Web und der ganze Rest, <http://goessner.net/learn/dynamik/lec10/index.html>, 2007.
- [11] Bernhard Grotz. Schwingung, <https://www.grund-wissen.de/physik/mechanik/schwingungen-und-wellen/harmonische-schwingungen.html>, 2018.
- [12] DI Eberhard Sengspiel. Geräuscentwicklung und Schall bei der Lüftung, <https://www.inventer.de/wissen/grundlagen-der-lueftung/geraesuentwicklung-und-schall-bei-der-lueftung/s>, 2018.
- [13] Charlotte Hurtley. *Night Noise Guidelines for Europe*. World Health Organization, Dänemark, 2009.
- [14] Deutsche Industrienorm. *DIN61672-1 BewertungsfILTER*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2003.
- [15] M. Kaltenbacher, J. Kolerus, J. Metzger. *Skriptum Akustik für Ingenieure*. TU Wien, 2015.
- [16] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Bewertungskurven für Schalldruckpegel, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schalldruckpegel>, 2018.
- [17] Sandberg Ejsmont. *Tyre Road Noise Reference Book*. Informex Harg Sweden, 1980.

- [18] T. Pichler, C. Riegger. Reifenlexikon, <https://blog.rp-tools.com/reifen-lexikon/>, RP-Tools, 2018.
- [19] P Zeller. *Handbuch Fahrzeugakustik*. Springer Verlag, 2012.
- [20] R. Blom. *Report on tyre/road noise*. Technische Universität Eindhoven, 2004.
- [21] T. Beckenbauer. *Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche*. Müller-BBM, Basel, 2008.
- [22] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. Helmholtz-Resonator, <https://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz-Resonator>, 2018.
- [23] R. O. Rasmussen, R. J. Bernhard, U. Sandberg, E. P. Mun. *The little Book of quieter pavements*. The Transtec Group, Austin, Texas, 2007.
- [24] Deutsche Industrienorm. *DIN EN ISO 11819-2*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2001.
- [25] Richtlinien und Vorschriften für das Strassenwesen. *RVS 11.066*. Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Strassenwesen, Wien, 1997.
- [26] OBSI. *AASHTO Designation: TP 76-13*. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2013.
- [27] Deutsche Industrienorm. *DIN EN ISO 11819-1*. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2001.
- [28] 3M. *Safety-Walk Anti-Rutsch - Belag*. 3M, 2018.
- [29] P. R. Donovan. Use of the ASTM SRTT for Standardized OBSI Measurement, <http://www.adc40.org/presentations/winter2010/04PresentationTRBWinter2010.pdf>, 2018.
- [30] Avon Tyres. Avanza AV4, <http://www.avonreifen.com/van/avanza-av9av4>, 2018.

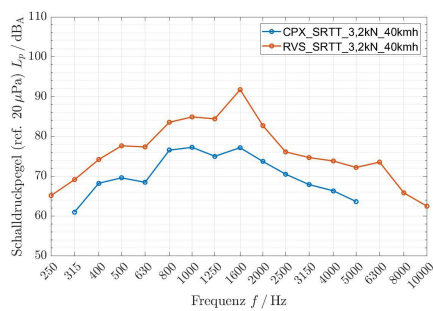
Kapitel 7

Anhang

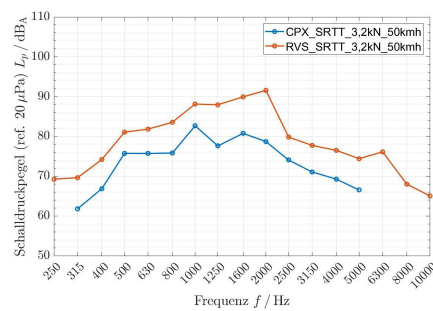
Hier finden Sie alle Abbildungen zu den Messvergleichen aus Kapitel 5.

7.1 Abbildungen: Vergleich der drei standardisierten Verfahren

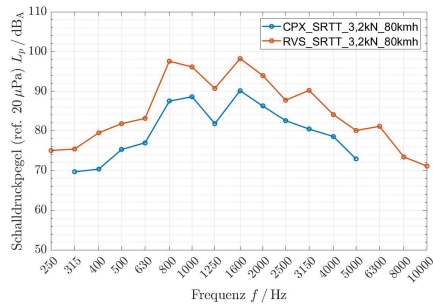
Die folgenden Abbildungen zeigen die Vergleiche der drei standardisierten Verfahren:



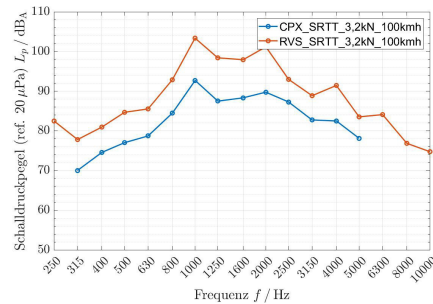
(a)



(b)

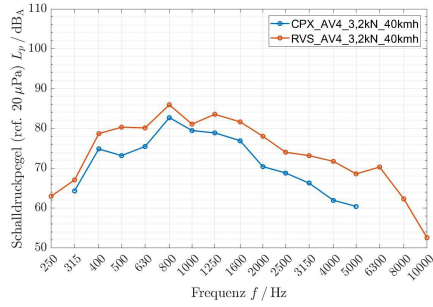


(c)

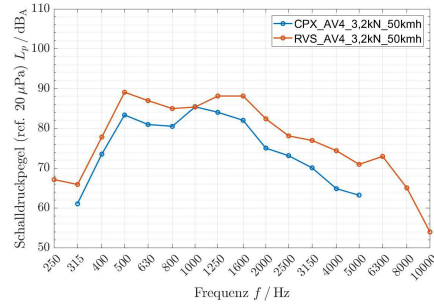


(d)

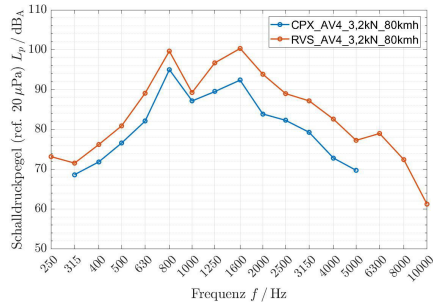
Abbildung 7.1: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX und RVS mit den Prüfparametern nach CPX und dem SRTT-Reifen bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.



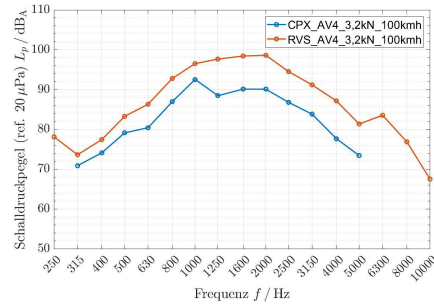
(a)



(b)

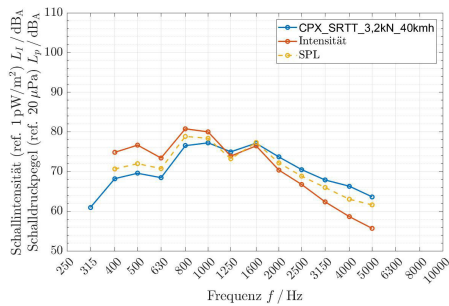


(c)

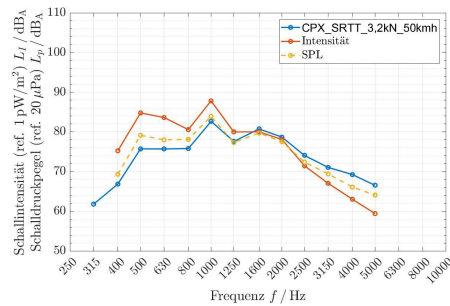


(d)

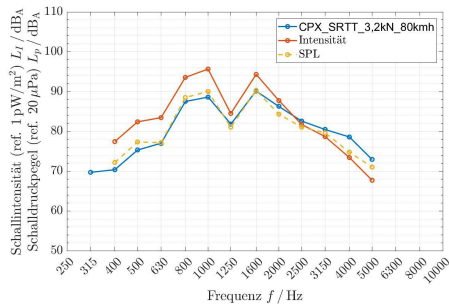
Abbildung 7.2: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX und RVS mit den Prüfparametern nach CPX und dem AV4-Reifen bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.



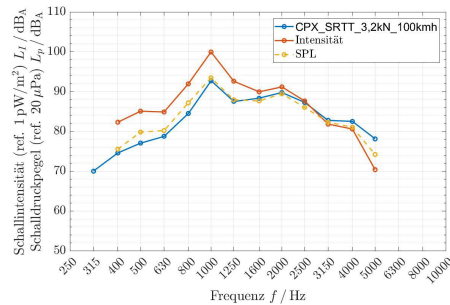
(a)



(b)

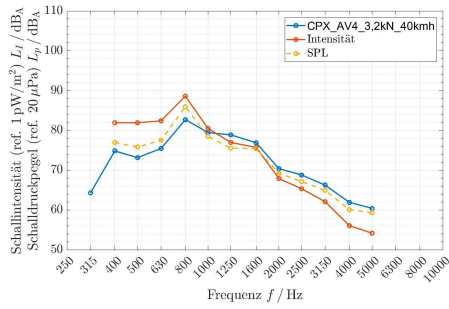


(c)

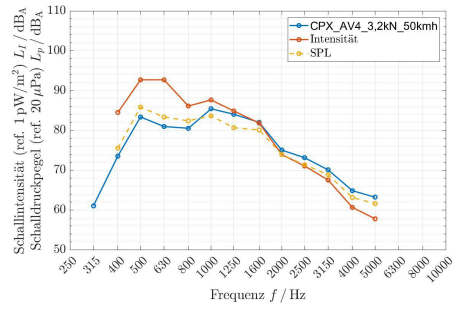


(d)

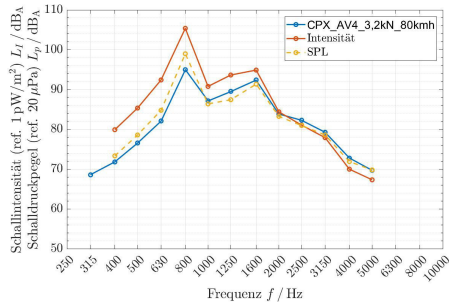
Abbildung 7.3: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und dem SRTT-Reifen bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.



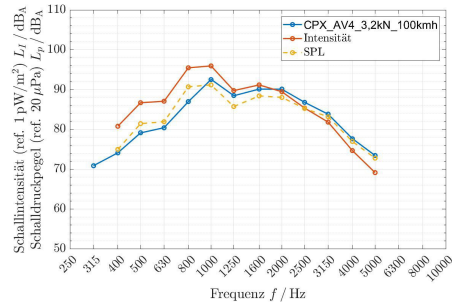
(a)



(b)

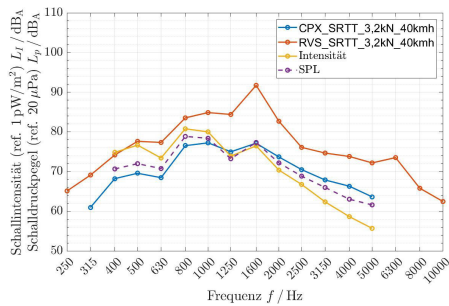


(c)

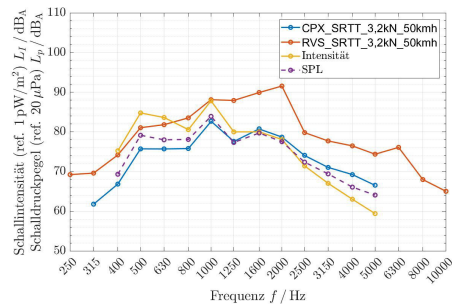


(d)

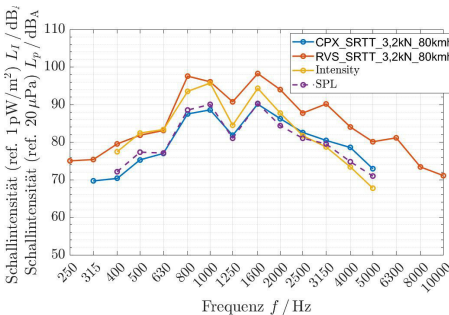
Abbildung 7.4: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und dem AV4-Reifen bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.



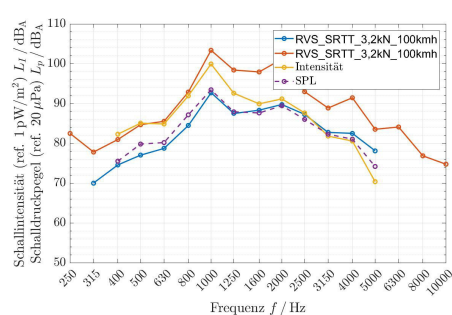
(a)



(b)

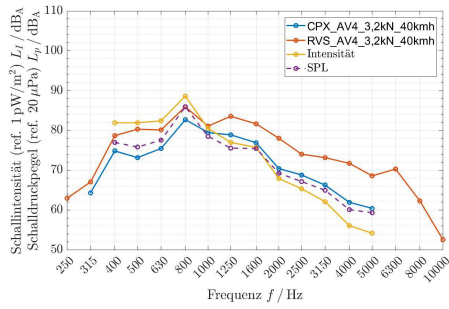


(c)

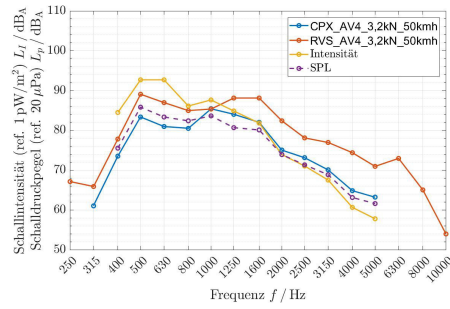


(d)

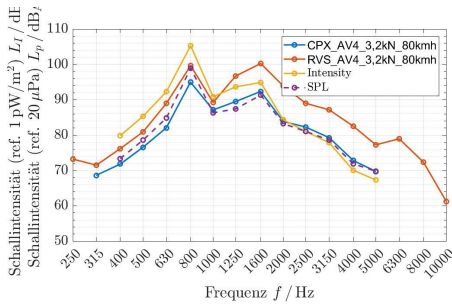
Abbildung 7.5: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX, RVS und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und dem SRTT-Reifen bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.



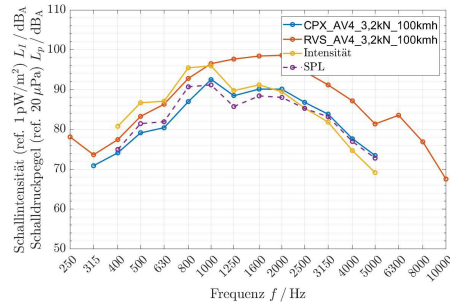
(a)



(b)

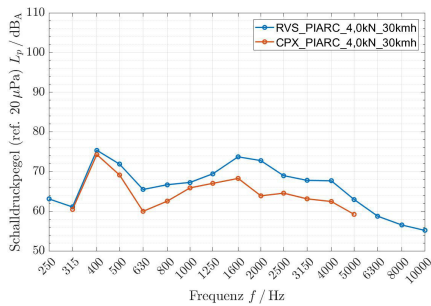


(c)

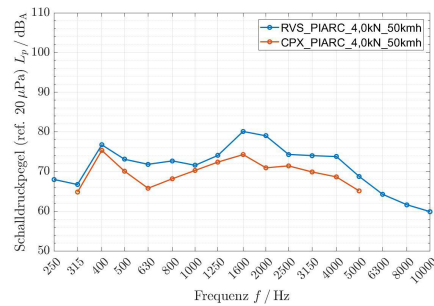


(d)

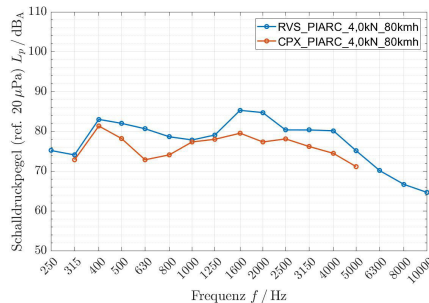
Abbildung 7.6: Vergleich der Auswertungsverfahren von CPX, RVS und OBSI mit den Prüfparametern nach CPX und dem AV4-Reifen bei (a) 40, (b) 50, (c) 80 und (d) 100 km/h.



(a)

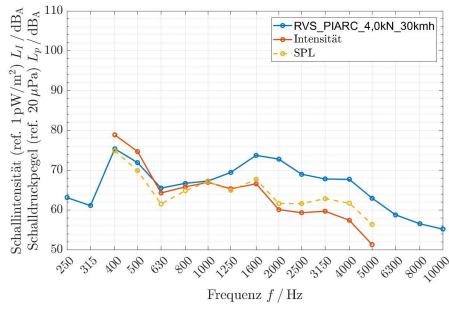


(b)

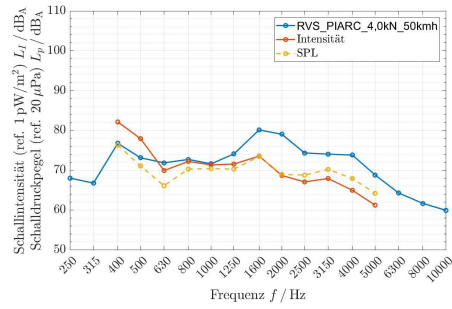


(c)

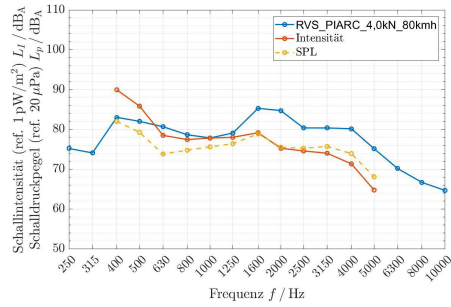
Abbildung 7.7: Vergleich der Auswertungsverfahren von RVS und CPX, mit den Prüfparametern nach RVS und dem Piarc-Reifen bei (a) 30, (b) 50 und (c) 80 km/h.



(a)

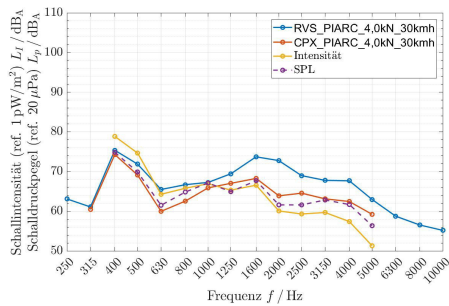


(b)

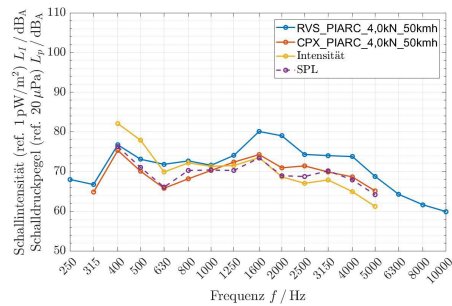


(c)

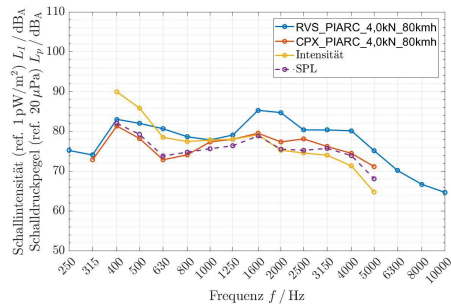
Abbildung 7.8: Vergleich der Auswertungsverfahren von RVS und OBSI, mit den Prüfparametern nach RVS und dem Piarc-Reifen bei (a) 30, (b) 50 und (c) 80 km/h.



(a)

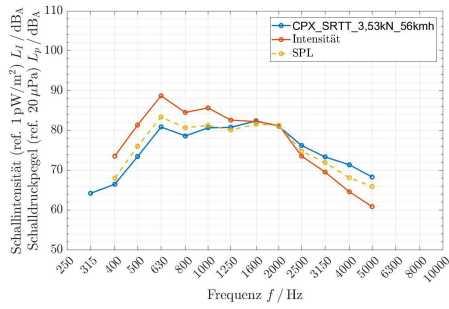


(b)

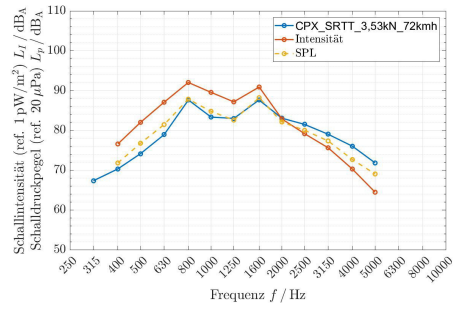


(c)

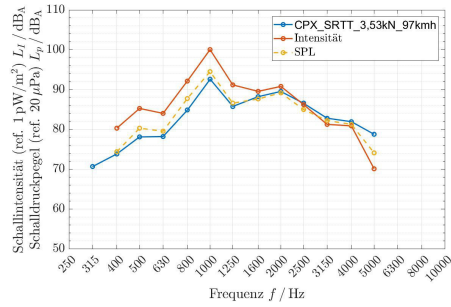
Abbildung 7.9: Vergleich der Auswertungsverfahren von RVS, CPX und OBSI, mit den Prüfparametern nach RVS und dem Piarc-Reifen bei (a) 30, (b) 50 und (c) 80 km/h.



(a)

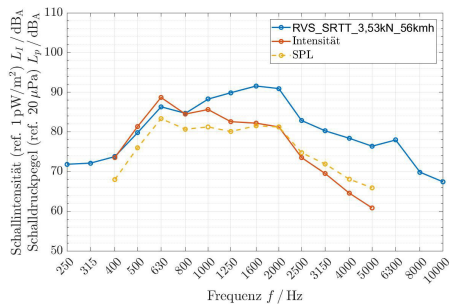


(b)

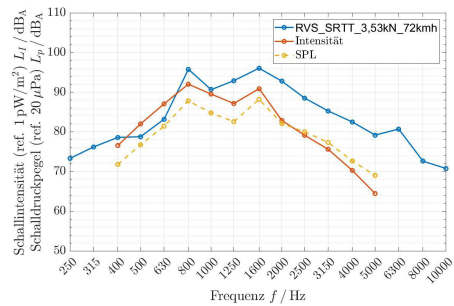


(c)

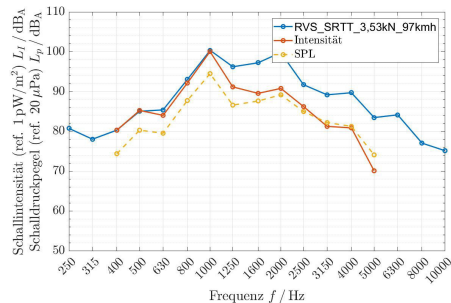
Abbildung 7.10: Vergleich der Auswertungsverfahren von OBSI und CPX mit den Prüfparametern nach OBSI und dem SRTT-Reifen bei (a) 56, (b) 72 und (c) 97 km/h.



(a)

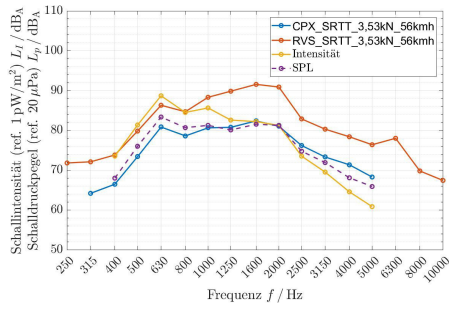


(b)

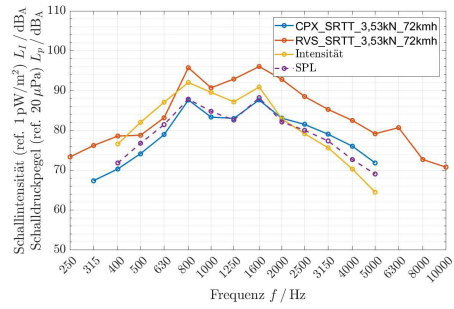


(c)

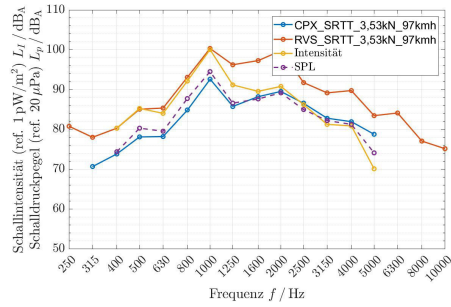
Abbildung 7.11: Vergleich der Auswertungsverfahren von OBSI und RVS mit den Prüfparametern nach OBSI und dem SRTT-Reifen bei (a) 56, (b) 72 und (c) 97 km/h.



(a)



(b)

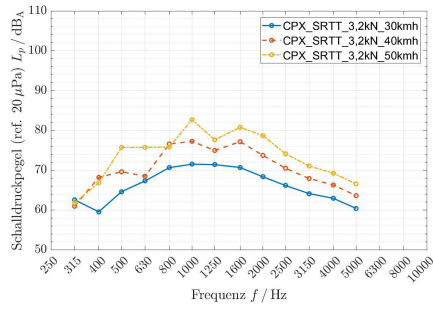


(c)

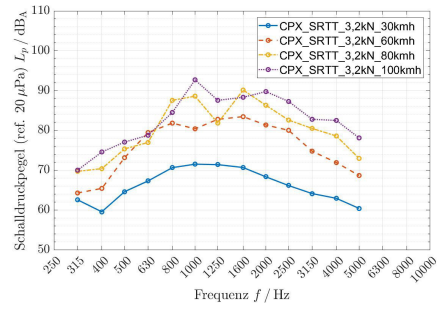
Abbildung 7.12: Vergleich der Auswertungsverfahren von OBSI, CPX und RVS mit den Prüfparametern nach OBSI und dem SRTT-Reifen bei (a) 56, (b) 72 und (c) 97 km/h.

7.2 Abbildungen: Vergleich von Geschwindigkeiten

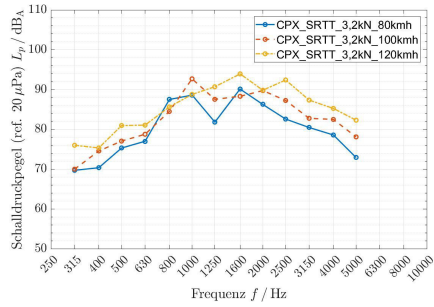
Die folgenden Abbildungen zeigen den Vergleich der Schallpegel bei verschiedenen Geschwindigkeiten bei unterschiedliche Geschwindigkeiten mit jeweils einem Prüfreifen:



(a)

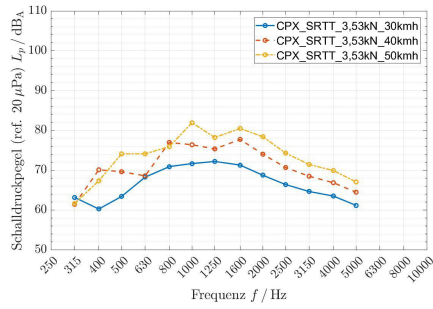


(b)

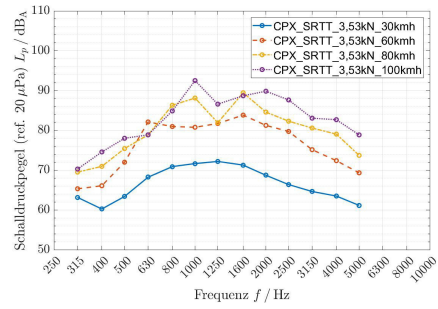


(c)

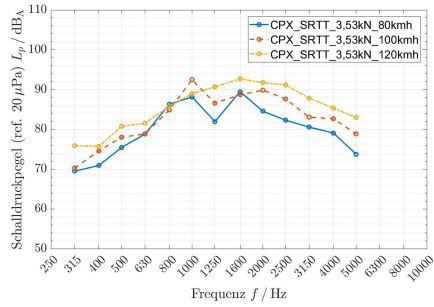
Abbildung 7.13: Vergleich des SRTT-Reifens bei 3.2kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

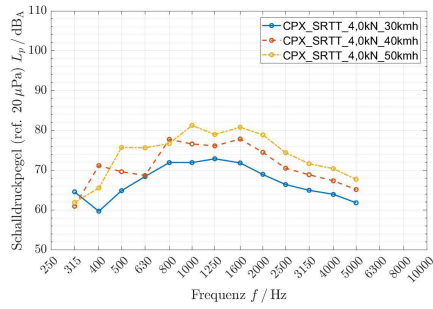


(b)

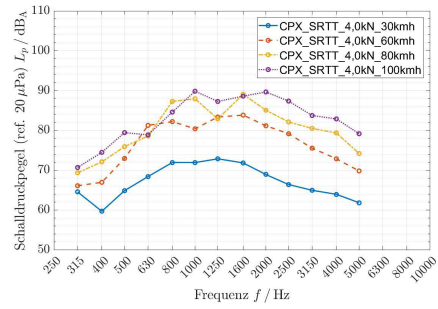


(c)

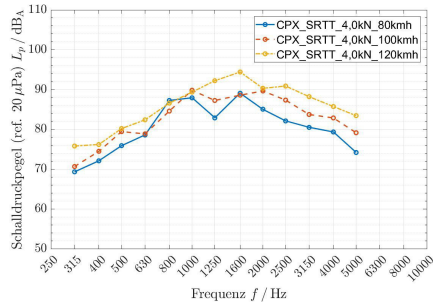
Abbildung 7.14: Vergleich des SRTT-Reifens bei 3.53 kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

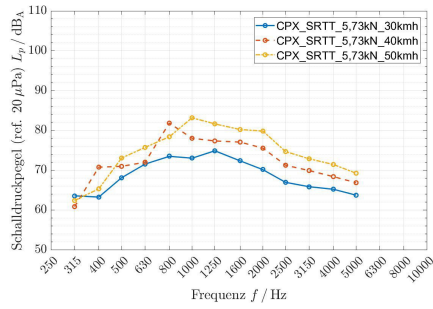


(b)

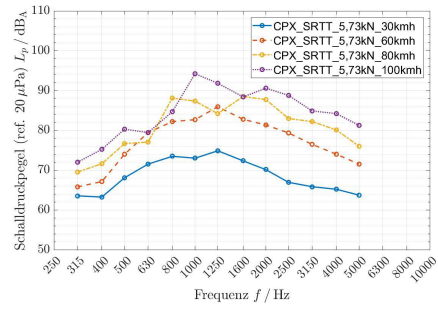


(c)

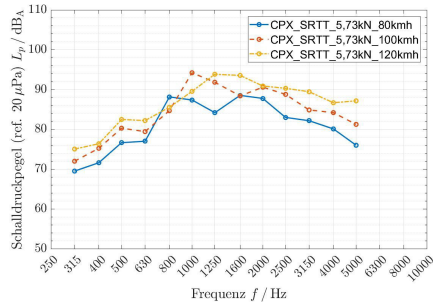
Abbildung 7.15: Vergleich des SRTT-Reifens bei 4.0kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

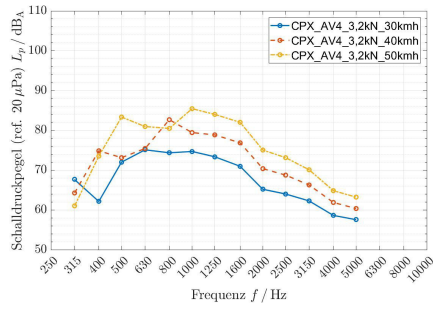


(b)

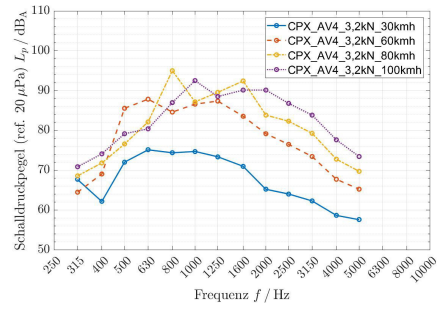


(c)

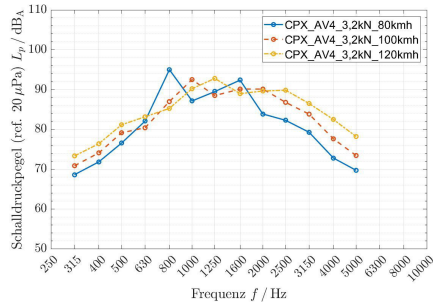
Abbildung 7.16: Vergleich des SRTT-Reifens bei 5,73 kN aufgebracht Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

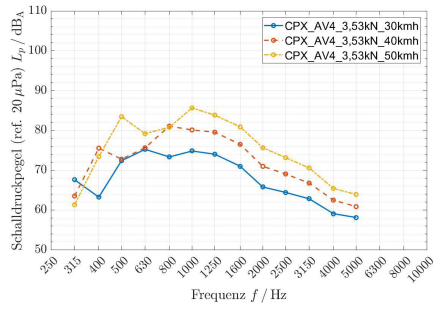


(b)

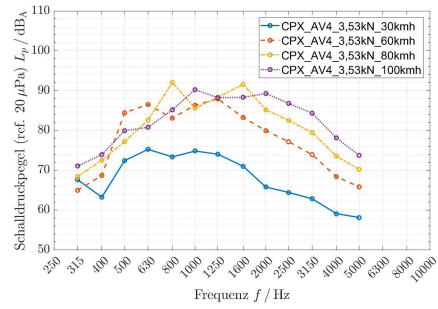


(c)

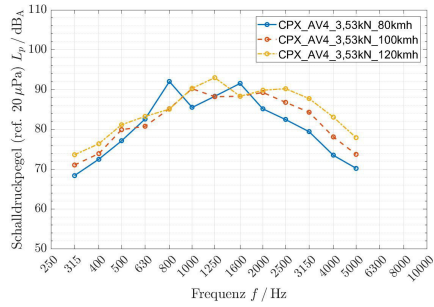
Abbildung 7.17: Vergleich des AV4-Reifens bei 3.2 kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

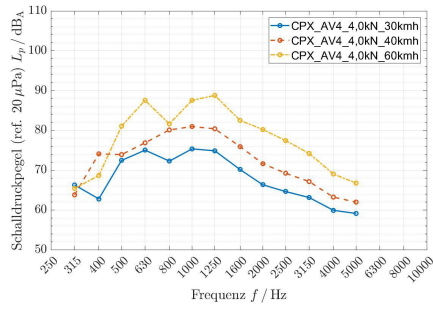


(b)

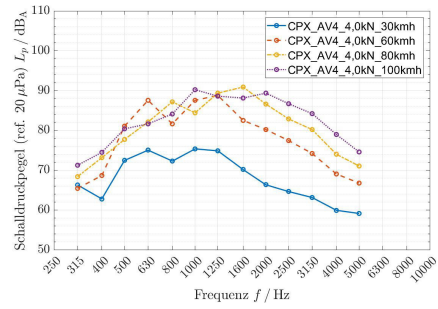


(c)

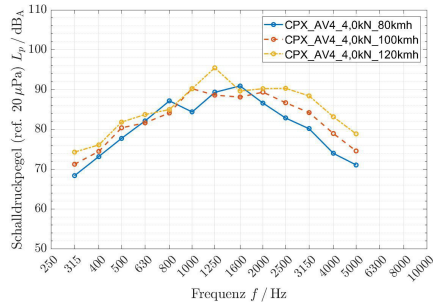
Abbildung 7.18: Vergleich des AV4-Reifens bei 3.53kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

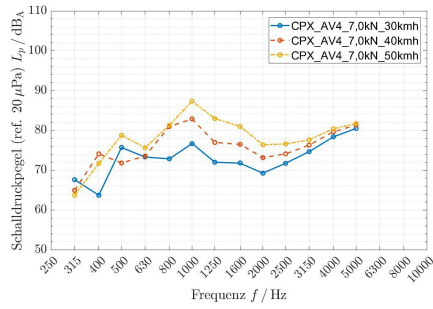


(b)

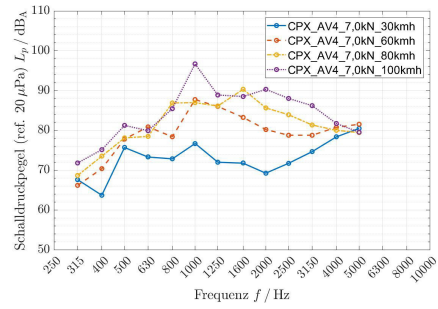


(c)

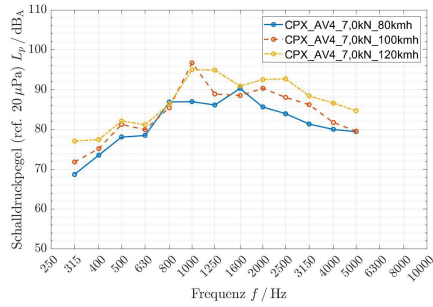
Abbildung 7.19: Vergleich des AV4-Reifens bei 4.0 kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

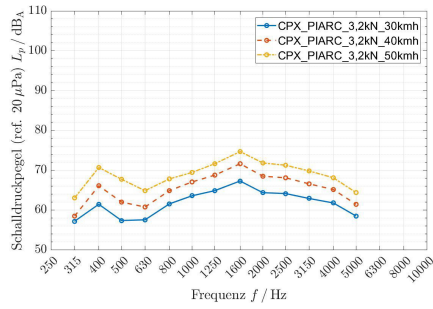


(b)

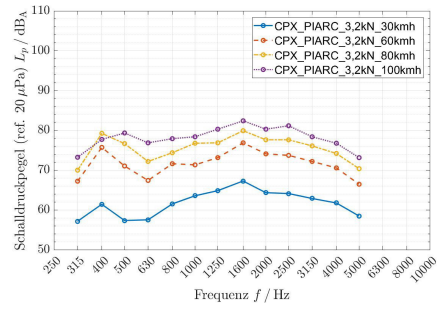


(c)

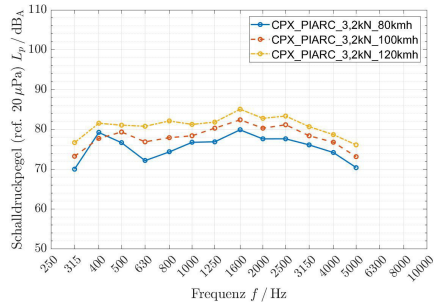
Abbildung 7.20: Vergleich des AV4-Reifens bei 7.0 kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

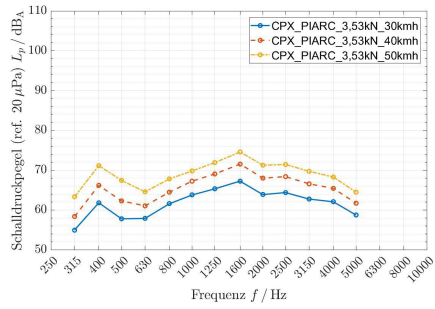


(b)

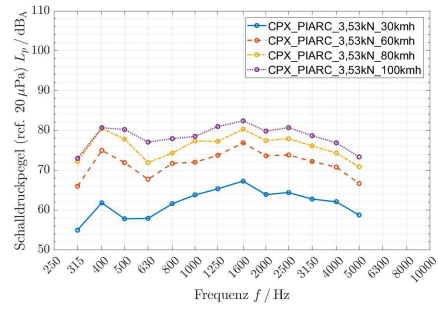


(c)

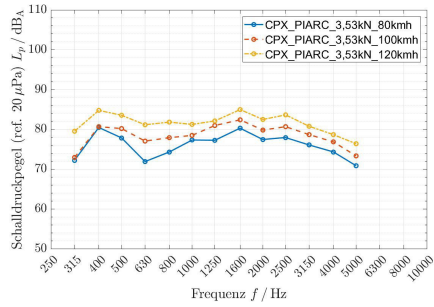
Abbildung 7.21: Vergleich des Piarc-Reifens bei 3.2kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)

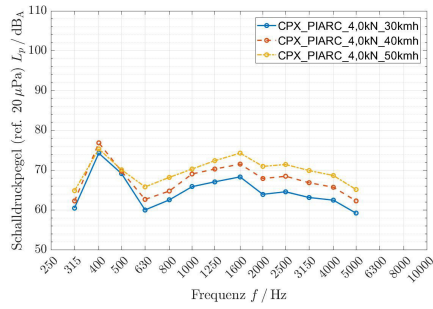


(b)

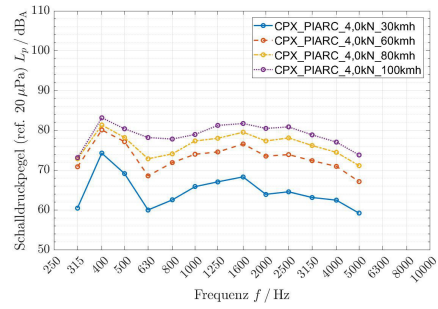


(c)

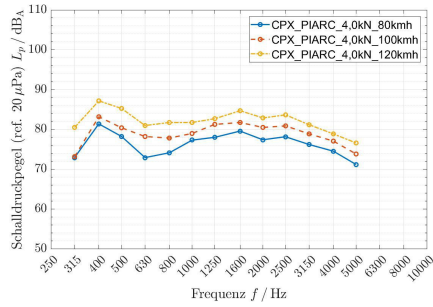
Abbildung 7.22: Vergleich des Piarc-Reifens bei 3.53 kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.



(a)



(b)

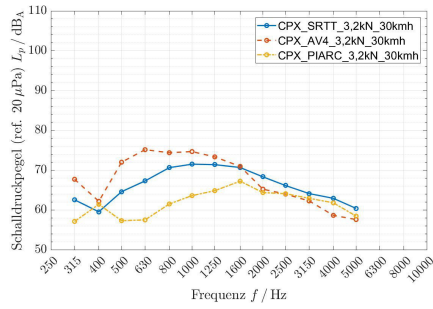


(c)

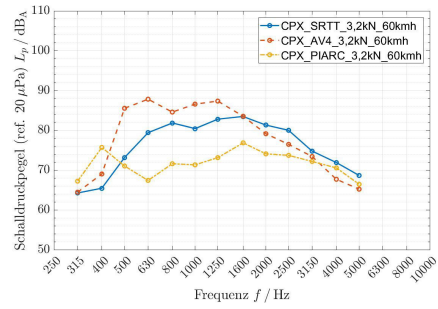
Abbildung 7.23: Vergleich des Piarc-Reifens bei 4.0kN aufgebrachtter Achslast mit (a) niedrigen 30, 40 und 50 km/h, (b) unterschiedlichen 30, 60, 80 und 100 km/h und (c) hohen 80, 100 und 120 km/h Geschwindigkeiten.

7.3 Abbildungen: Vergleich der Reifen

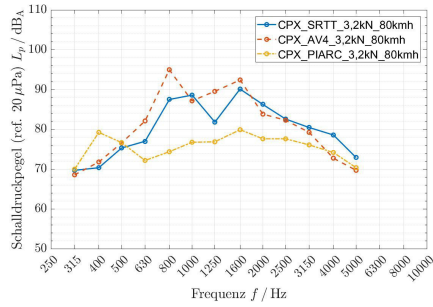
Die folgenden Abbildungen zeigen die Vergleiche der Prüfreifen mit allen Geschwindigkeiten und Lasten:



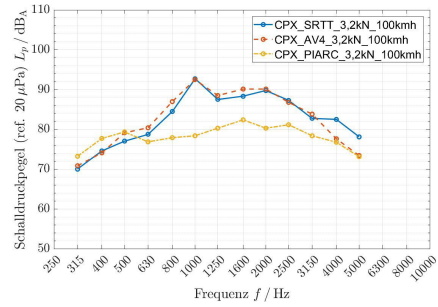
(a)



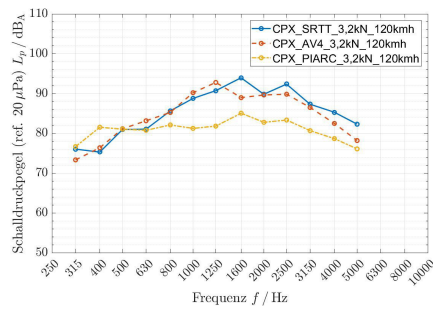
(b)



(c)

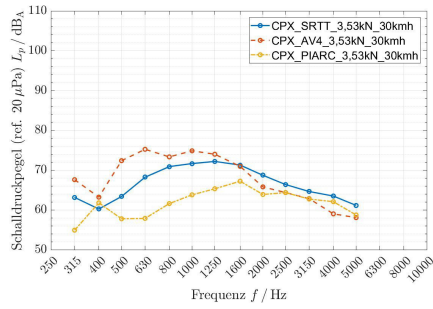


(d)

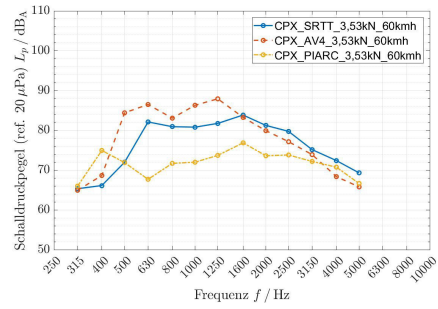


(e)

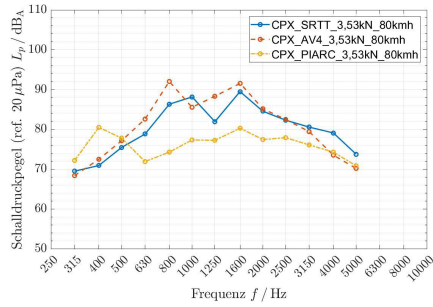
Abbildung 7.24: Vergleich der drei Prüffreifentypen mit 3.2 kN Last und jeweils bei (a) 30, (b) 60, (c) 80, (d) 100 und (e) 120 km/h.



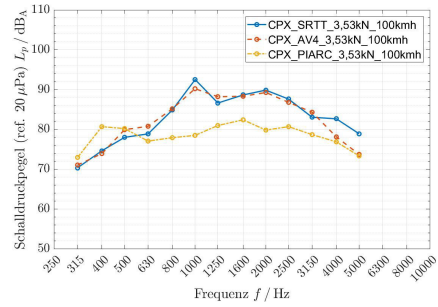
(a)



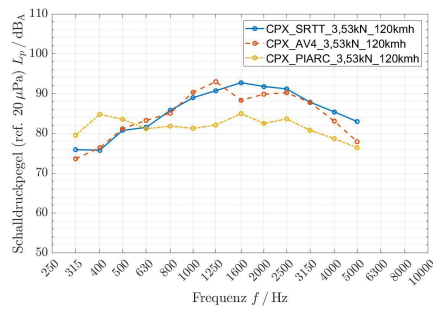
(b)



(c)

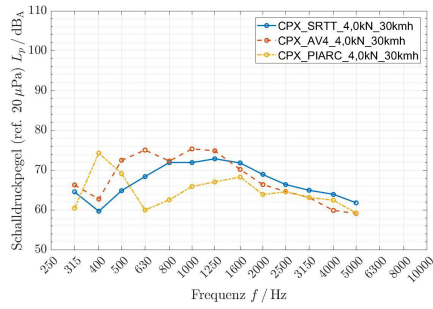


(d)

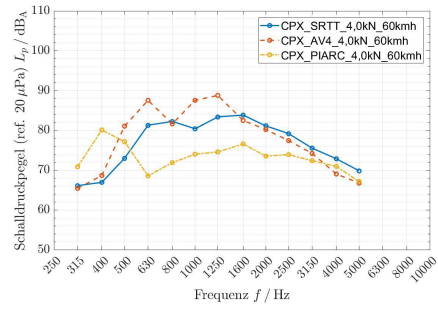


(e)

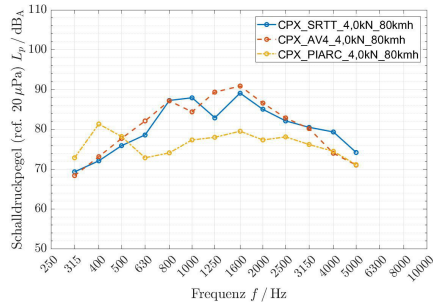
Abbildung 7.25: Vergleich der drei Prüfreifentypen mit 3.53 kN Last und jeweils bei (a) 30, (b) 60, (c) 80, (d) 100 und (e) 120 km/h.



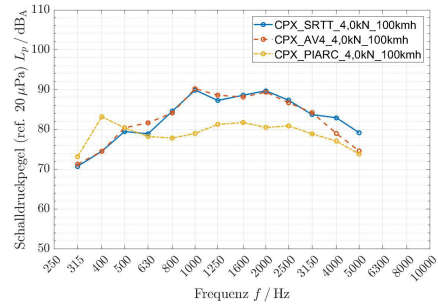
(a)



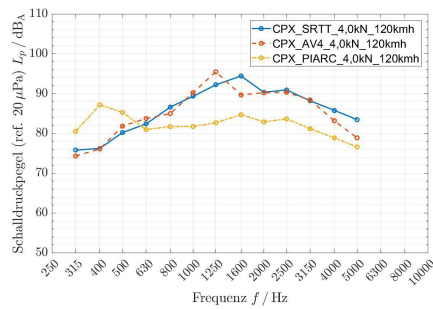
(b)



(c)



(d)

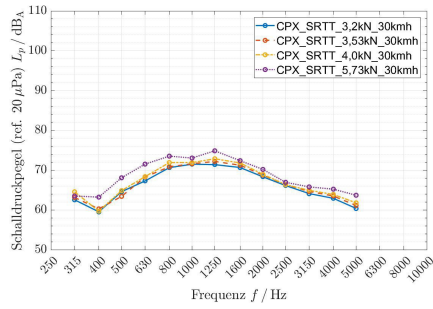


(e)

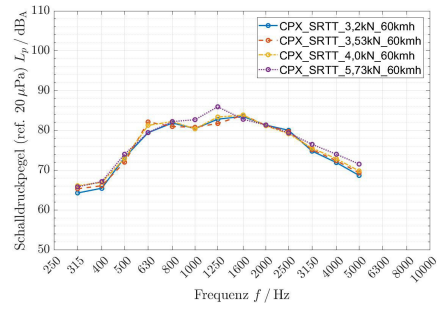
Abbildung 7.26: Vergleich der drei Prüfreifentypen mit 4.0 kN Last und jeweils bei (a) 30, (b) 60, (c) 80, (d) 100 und (e) 120 km/h.

7.4 Abbildungen: Vergleich von Lasten

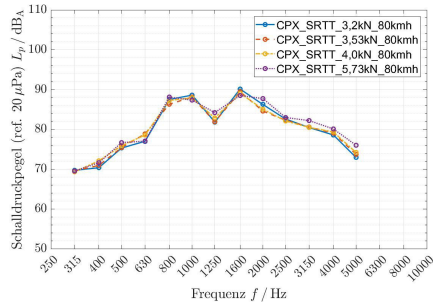
Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils die Prüfreifen mit allen aufgebracht Lasten bei allen Prüfschwindigkeiten:



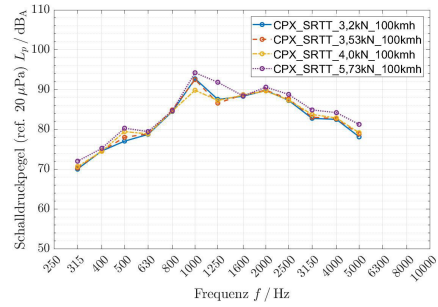
(a)



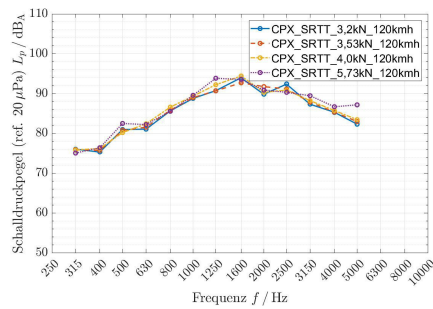
(b)



(c)

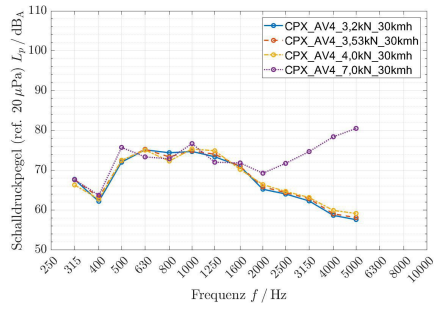


(d)

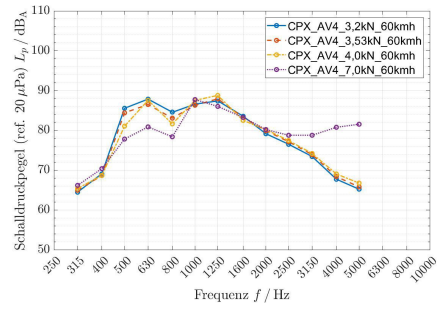


(e)

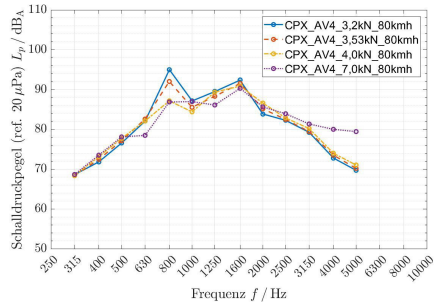
Abbildung 7.27: Vergleich des SRTT-Reifens mit allen Lastfällen und jeweils bei (a) 30, (b) 60, (c) 80, (d) 100 und (e) 120 km/h.



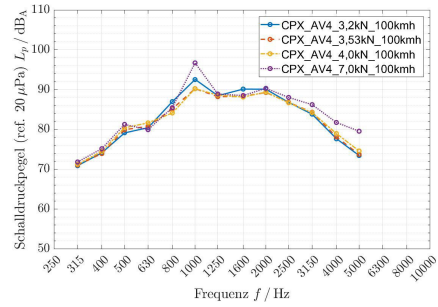
(a)



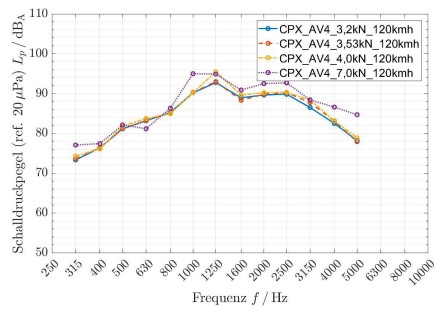
(b)



(c)

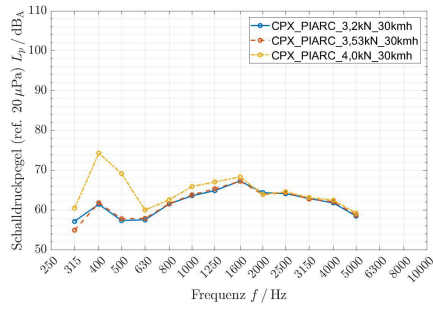


(d)

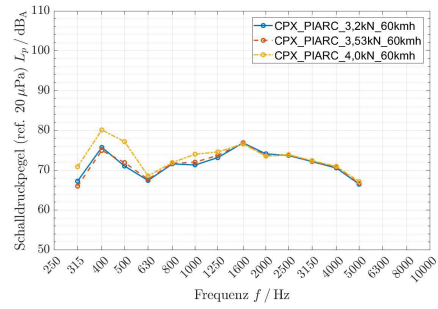


(e)

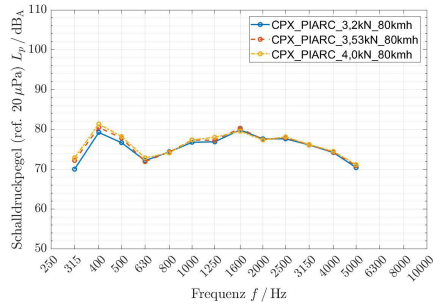
Abbildung 7.28: Vergleich des AV4-Reifens mit allen Lastfällen und jeweils bei (a) 30, (b) 60, (c) 80, (d) 100 und (e) 120 km/h.



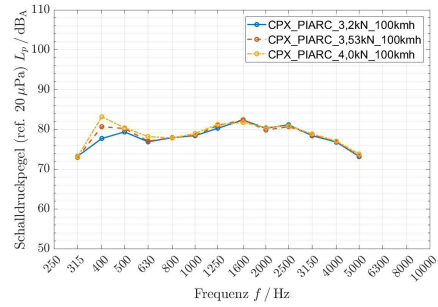
(a)



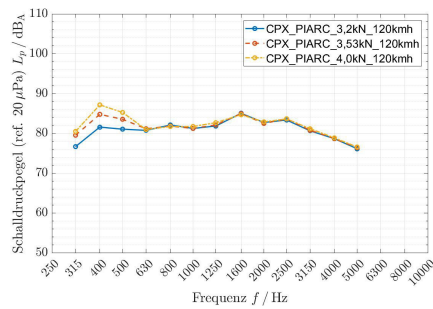
(b)



(c)



(d)



(e)

Abbildung 7.29: Vergleich des Piarc-Reifens mit allen Lastfällen und jeweils bei (a) 30, (b) 60, (c) 80, (d) 100 und (e) 120 km/h.