

Vergleich von Reifen-Luftschallmessungen und Schwingungsmessungen mit Hilfe von laseroptischen Verfahren*

R. Eberspächer, Dr. W. Liedl, Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart

Prof. H. Tiziani, R. Litschel, B. Pfister, A. Zeller, Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Reifenschwingungen werden als primäre Ursache für die Geräuschemission von Pkw-Reifen angesehen. Es werden drei im Labor erprobte laseroptische Meßverfahren vorgestellt, die für Schwingungsuntersuchungen an auf dem Trommelprüfstand laufenden Reifen geeignet sind: Doppelpuls-Holografie, Doppelpuls-Specklefotografie und Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV). Die Doppelpuls-Holografie liefert im Zusammenwirken mit einem Bild-Derotator das Schwingungsmuster des rotierenden Reifens. Die LDV ermöglicht die Messung der Schwingschnelle eines reifenfesten Punktes bzw. an einem raumfesten Punkt der Reifenoberfläche. Mit Hilfe der LDV kann eine gute Korrelation zwischen Lauflächenschwingungen und Reifenabrollgeräusch nachgewiesen werden.

Abstract

Tire vibrations are considered to be the primary reason for tire noise. Three laser-optical measuring methods are presented which are tested in laboratory and which enables vibration measurements of tires running on a drum test stand: Double-Pulse Holography, Double-Pulse Speckle Photography and Laser-Doppler-Vibrometry. In co-operation with an image-derotator the Double-Pulse Holography yields the vibration pattern of the rotating tire. The Laser-Doppler-Vibrometry (LDV) enables the measurement of the vibration velocity of one point of the tire (with derotator) or the vibration velocity at a stationary point (without derotator). With the aid of the LDV it is proved that there is a good correlation between tread-vibrations and tire noise.

1 Einleitung

Auf der Basis der bisher im Institut durchgeführten Untersuchungen zur Geräuschemission von Pkw-Reifen und der dabei erarbeiteten Hypothese zur Geräuschemission ([1], [2], [3], [4], [5]) werden die Reifenschwingungen als primäre Ursache für die Geräuschemission angesehen. Zur Unter-

* BMFT-Vorhaben TV 7965

suchung der beim freien Abrollen eines Reifens auftretenden Schwingungen wurden bei Messungen auf der Straße und auf der Trommel auch herkömmliche Meßmethoden eingesetzt [6].

Zeitlich parallel dazu wurden laseroptische Meßverfahren für die Ermittlung der Reifenschwingungen entwickelt. Durch Laborversuche an einem frei rotierenden Reifen wurde die Eignung der in Frage kommenden laseroptischen Meßverfahren geprüft [6]. Diese Entwicklung im Labor und die Anwendung auf dem Trommelprüfstand haben gezeigt, daß die hier vorgestellten laseroptischen Meßverfahren für die Ermittlung der beim Abrollen eines Reifens auftretenden Schwingungen geeignet sind.

2 Verwendete Meßverfahren

Die laseroptischen Meßverfahren zeichnen sich einerseits dadurch aus, daß sie die Reifenoberfläche berührungslos und damit rückwirkungsfrei antasten. Andererseits kann durch Verwendung eines Derotators ein reifenfester Punkt während der Rotation des Reifens beobachtet werden bzw. vom Reifen ein stehendes Bild erzeugt werden.

2.1 Doppelpuls-Holografie

Die Doppelpuls-Holografie (Holografische Interferometrie) ermöglicht im Zusammenwirken mit einem Derotator die flächenhafte Ermittlung der Formänderung des Reifens infolge von Schwingungen. Bild 1 zeigt

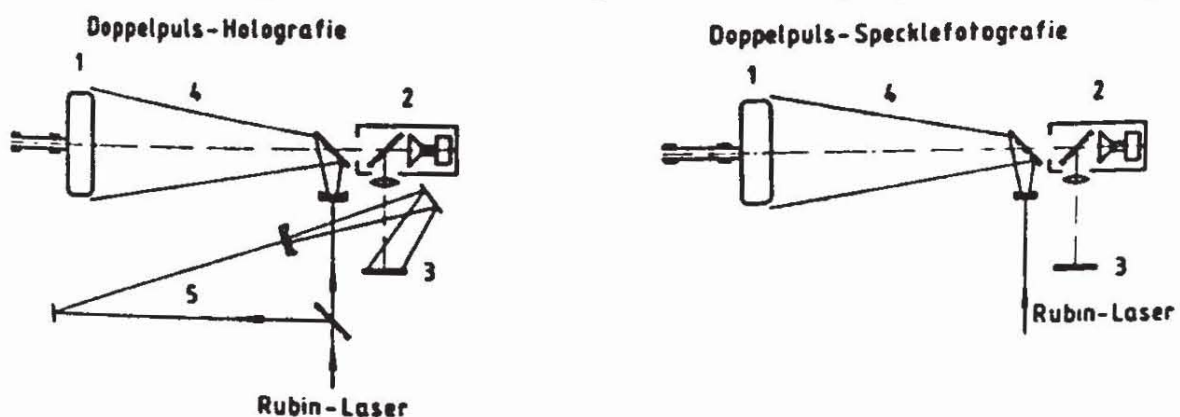


Bild 1: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Doppelpuls-Holografie und die Doppelpuls-Speckle-Fotografie

- 1 ... Reifen
- 2 ... Bild-Derotator
- 3 ... Hologramm bzw. Specklegramm
- 4 ... Objektstrahl
- 5 ... Referenzstrahl

den prinzipiellen Versuchsaufbau, mit dem von der Reifenseitenwand kurzzeitig nacheinander zwei Momentaufnahmen der augenblicklichen Verformungszustände auf einer Fotoplatte abgebildet werden.

Auf dem so entstehenden Doppelpuls-Hologramm werden die zur Reifenseitenwand senkrechten Formänderungen als Interferenzstreifen sichtbar, die Linien gleicher Verformung darstellen. Weil die Verformung in der vom Pulsabstand vorgegebenen Zeit stattfindet, kann man die Streifen auch als Linien gleicher Schwingschnelle auffassen. Hierbei ist von besonderer Bedeutung, daß die Doppelpuls-Aufnahmen zum Zeitpunkt der maximalen Schwingschnelle getriggert werden. Diese Triggerung des DoppelpulsLasers gelingt mit Hilfe des Laser-Doppler-Vibrometers, das weiter unten beschrieben wird.

2.2 Doppelpuls-Specklefotografie

Die Doppelpuls-Specklefotografie unterscheidet sich im Versuchsaufbau dadurch, daß der Referenzstrahl hier nicht benötigt wird (vgl. Bild 1).

Diese Meßmethode ermöglicht in dieser Anordnung die flächenhafte Ermittlung der Verformungen der Reifenseitenwand parallel zur Oberfläche (vgl. auch [6]). Dieses Verfahren eignet sich besonders für große Amplituden, die jedoch an der Seitenwand nicht beobachtet werden.

2.3 Laser-Doppler-Vibrometrie

Die Laser-Doppler-Vibrometrie nutzt die Frequenzverschiebung (Dopplerverschiebung) des von einer schwingenden Oberfläche zurückgestreuten Lichts. Diese Dopplerverschiebung ist proportional zur Schwingschnelle der Oberfläche, wobei die Rauigkeit der Oberfläche dabei keinen Einfluß hat. Im Zusammenwirken mit einem Derotator wird der Laserstrahl mit der Rotation des Reifens synchronisiert. Damit kann der zeitliche Verlauf der Schwingschnelle eines Oberflächenelements des Reifens (senkrecht zur Oberfläche), z. B. der Reifenseitenwand, während eines Umlaufs ermittelt werden. Den zugehörigen Versuchsaufbau zeigt schematisch Bild 2.

Wird der Derotator in Bild 2 durch einen Umlenkspiegel ersetzt, ergibt sich ein Strahlengang, der es ermöglicht, die Schwingschnelle der Reifenoberfläche in einem raumfesten Punkt zu messen. Da hierbei der angetastete Reifenpunkt und das Mikrofon stationär sind, tritt kein Doppler-Effekt auf, womit eine direkte Korrelation zwischen Schwingschnelle und Schalldruck möglich wird. Diese Art der Messung ist nur mit dem Laser-Doppler-Vibrometer möglich, weil es berührungslos mißt und die Rauigkeit der

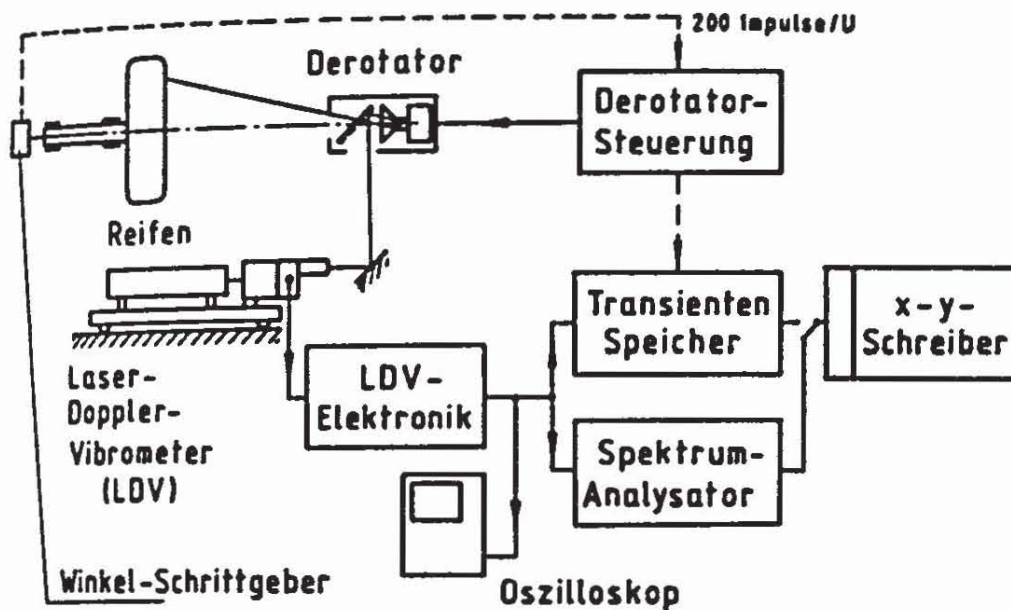


Bild 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Laser-Doppler-Vibrometrie mit Derotator.

vorbeilaufenden Oberfläche verfahrensbedingt keine Schwingungen vor-täuschen kann.

3 Versuchsaufbau am Trommelprüfstand

Bild 3 zeigt den Versuchsaufbau der Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) am Trommelprüfstand.

Das Laser-Doppler-Vibrometer (1) ist auf einem schweren Fundament (2) aufgebaut, das vom Trommelprüfstand, der sich rechts außerhalb des Bildes befindet, mechanisch getrennt ist. Die zugehörige LDV-Elektronik (3) liefert ein analoges Signal, das der Schwingschnelle des angetasteten Reifenpunktes proportional ist. Dieses Signal wird dem zweikanaligen FFT-Analysator (Fast-Fourier-Transform) (4) zur Signalanalyse und Weiterverarbeitung zugeleitet und im Plotter (5) aufgezeichnet.

Im Nahfeld des Reifens sind drei Mikrofone zur Aufnahme der Geräusch-emission installiert (vgl. Bild 4). Je nach Antastpunkt des Laserstrahls wird das Signal des dazu benachbarten Mikrofons ebenfalls dem FFT-Analysator zugeführt

Aus Bild 4 ist weiter zu erkennen, daß die Trommel mit drei in ihrer Textur unterschiedlichen, straßenähnlichen Belägen versehen ist.

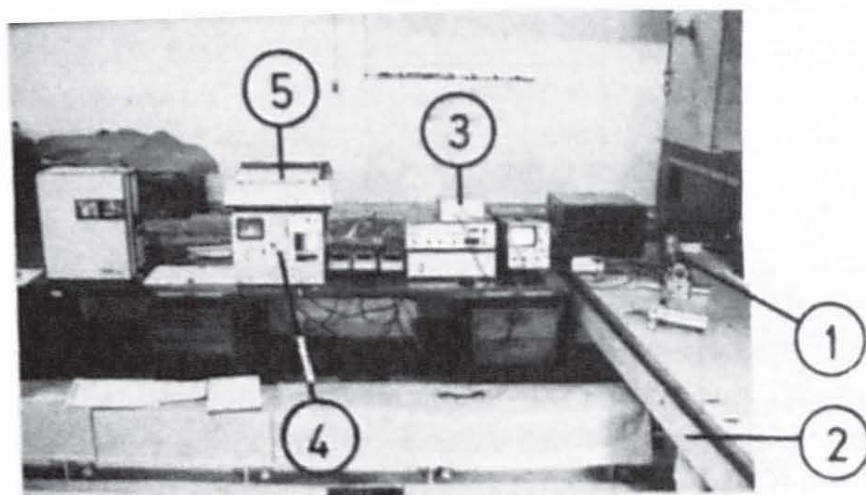


Bild 3: Aufbau der Laser-Doppler-Vibrometrie (ohne Derotator) am Trommelprüfstand

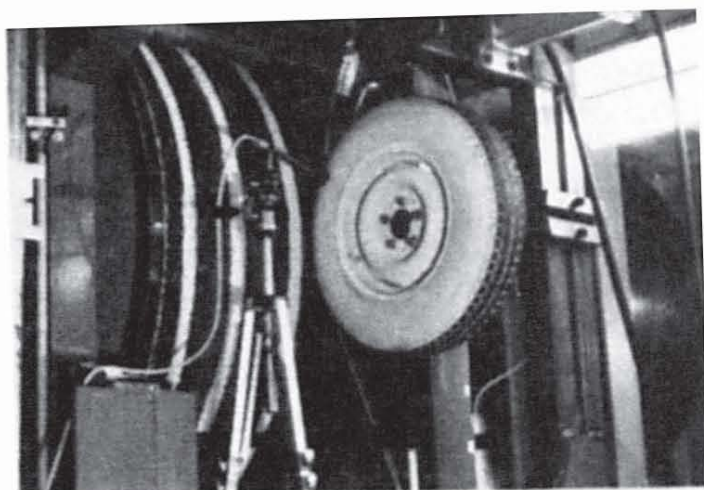


Bild 4: Meßreifen auf der Trommel mit straßenähnlichen Belägen

4 Ausgewählte Ergebnisse

4.1 Doppelpuls-Holografie

Als Beispiel zeigt Bild 5 die Rekonstruktion eines Doppelpuls-Hologramms, das an einem frei rotierenden, profillosen Reifen aufgenommen ist, der durch ein Zahnrad (rechts im Bild) zu Schwingungen angeregt wird. Die Anregungsfrequenz beträgt etwa 1,1 kHz, die Reifendrehzahl 320 min^{-1} und der Pulsabstand $100 \mu\text{s}$.

Die auf dem Hologramm sichtbaren Interferenzstreifen stellen Linien gleicher Verformung dar, die unter Beachtung des Pulsabstands auch Linien

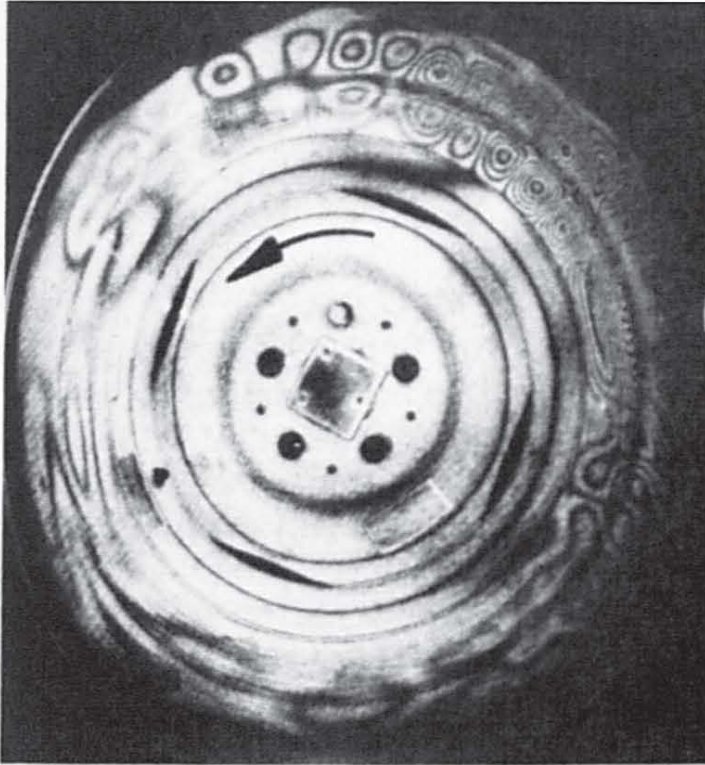


Bild 5: Doppelpuls-Hologramm eines durch ein Zahnrad angeregten profillosen Reifens

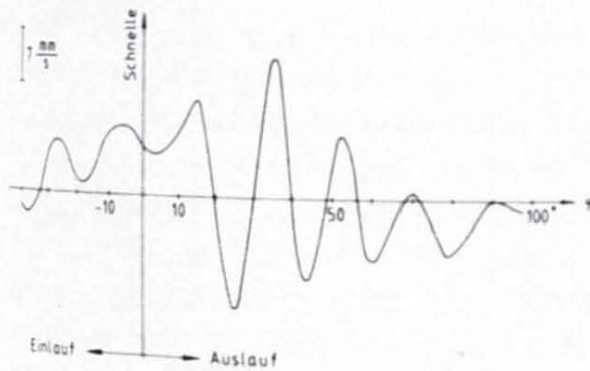


Bild 6: Schwingschnelle entlang eines Kreisbogens auf der Seitenwand eines durch ein Zahnrad angeregten profillosen Reifens

gleicher Schwingschnelle sind. Höhere Streifendichte bedeutet größere Schnelle. Das Bild zeigt, daß im Auslauf (Reifen rotiert im Gegenuhrzeigersinn) ein regelmäßiges Schwingungsmuster vorliegt, wo auch die größten Verformungen und Schnellewerte erreicht werden. Die Ausdehnung der schwingenden Teilflächen beträgt etwa 75 mm.

Die weitere Auswertung des Hologramms hinsichtlich der Schnelleverteilung entlang eines Kreisbogens (Radius etwa 30 mm größer als der der Felge) zeigt Bild 6.

Das Bild zeigt, daß bei dieser Anregung die größten Schnelleamplituden im Auslauf auftreten, die jedoch rasch abklingen und bei etwa 100° Zentriwinkel nahezu Null sind.

4.2 Laser-Doppler-Vibrometrie

4.2.1 Labormessungen

Zur Verdeutlichung der Auswirkung des Doppler-Effekts auf das Spektrum der Schwingschnelle zeigt Bild 7 den Vergleich von reifenfest (Teilbild a)) und raumfest (Teilbild b)) gemessener Schnelle, d. h. mit und ohne Verwendung des Derotators. Die Teilbilder enthalten jeweils das Anregungsspektrum der Seitenwandschwingung.

Im Fall des über den Derotator mitrotierenden, reifenfesten Laserstrahls (Teilbild a)) ergibt sich im Schnellespektrum der Seitenwand eine Frequenzverschiebung gegenüber der Anregungsfrequenz (etwa 1,1 kHz), die auf den Doppler-Effekt zurückzuführen ist. Demgegenüber liegt bei der raumfest gemessenen Schnelle (ohne Derotator) der höchste Schnellewert exakt bei der Anregungsfrequenz, so daß eine direkte Korrelation gegeben ist.

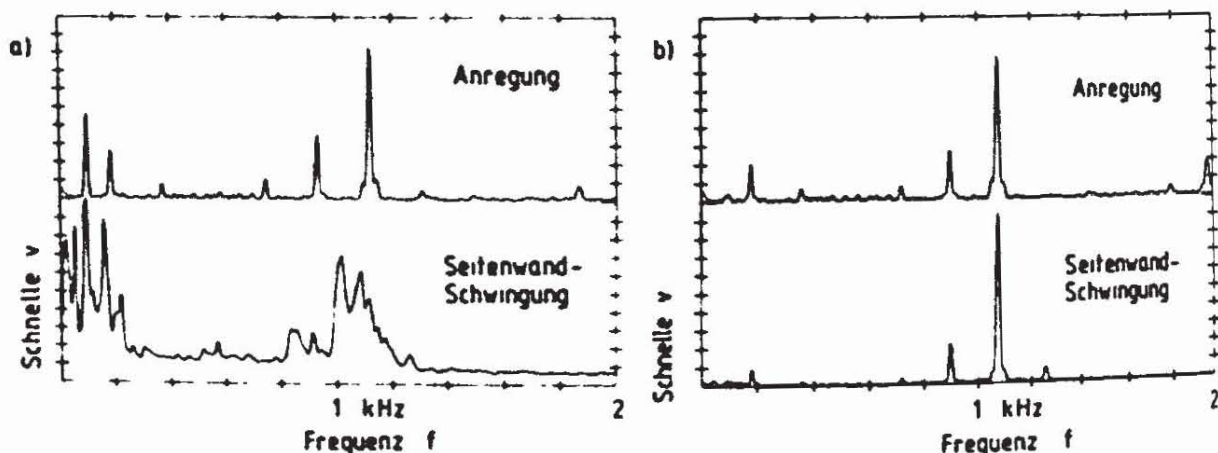


Bild 7: Vergleich von reifenfest (a) und raumfest (b) gemessener Schwingschnelle der Seitenwand eines profillosen Reifens und zugehöriges Anregungsspektrum

4.2.2 Messungen auf dem Trommelprüfstand

Es wird der profilierte (TS 771) und der profillose Conti-Reifen der Größe 175 SR 14 bei einer Radlast von 2 000 N und einem Reifendruck von 2 bar auf dem Trommelprüfstand mit Safety-Walk-Belag untersucht. Hinsichtlich des Beitrags, den die Schwingungen der Lauffläche und der Seitenwände zur Geräuschemission des Reifens liefern, ist die Kenntnis

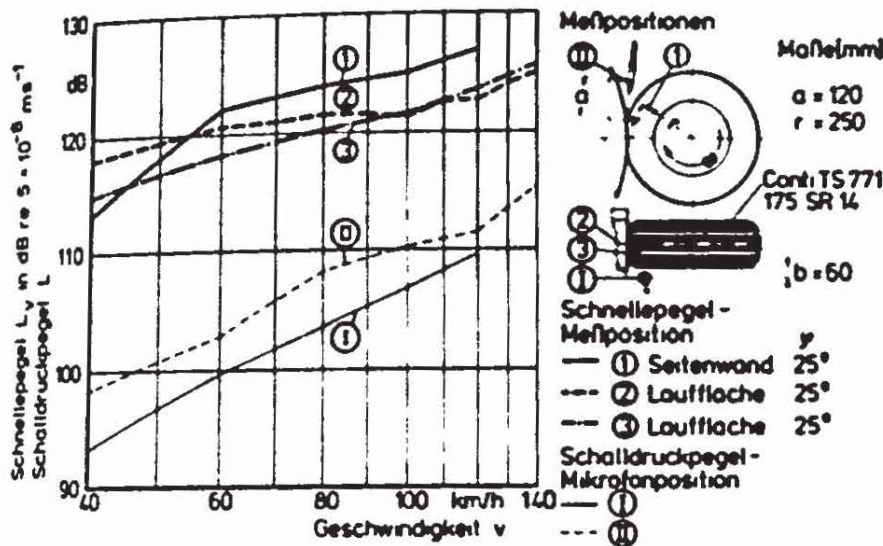


Bild 8: Schnellepegel des Profilgrundes der mittleren und äußeren Längsnille der Lauffläche sowie der Seitenwand und zugehöriger Schalldruckpegel

der Schwingschnelle senkrecht zur Reifenoberfläche zur näherungsweise Berechnung der abgestrahlten Schalleistung von besonderer Bedeutung.

Bild 8 zeigt die Pegel der Schwingschnelle der Lauffläche (Radialkomponente), gemessen im Profilgrund an zwei verschiedenen Punkten, die Schnellepegel der Seitenwand (Axialkomponente) und die zugehörigen Schalldruckpegel.

Man erkennt zunächst, daß ebenso wie der Schalldruckpegel auch der Schnellepegel mit wachsender Geschwindigkeit näherungsweise linear zunimmt. Betrachtet man die Schnellepegel der Lauffläche in den Punkten 2 und 3, so zeigt sich, daß bis etwa 100 km/h ein unterschiedlicher Anstieg vorliegt, was auf unterschiedliche Schwingungsverhältnisse innerhalb der Lauffläche hinweist. Bei höheren Geschwindigkeiten sind die Pegel nahezu gleich. Weiter zeigt sich, daß die Schnellepegel der Seitenwand (1) oberhalb von 50 km/h höher liegen als die der Lauffläche. Auf den ersten Blick deutet dies auf einen größeren Beitrag der Seitenwand zur Geräuschemission hin. Dabei sind jedoch die schlechteren Abstrahlbedingungen aufgrund der höheren Grenzfrequenz der Seitenwand zu beachten.

Bild 9 zeigt den Einfluß des Reifenprofils auf die Schwingschnelle der Lauffläche und den Schalldruck. Im oberen Teilbild ist das FFT-Spektrum der Schnelle des Profilgrundes der Lauffläche und im unteren Teilbild das Spektrum des Schalldrucks dargestellt.

Auffallend ist die Ähnlichkeit beider Spektren bis zur Frequenz von etwa 2 kHz, wobei sich Spitzen der Schwingschnelle eindeutig Spitzen im Schalldruck zuordnen lassen. Dominant sind hierbei die Pegel bei der Eingriffsfrequenz der Profilstollen (hier ca. 0,8 kHz) und deren Harmonische. Weiter zeigt sich, daß die Pegel bei 1,6 und 2,4 kHz im Schalldruckspektrum

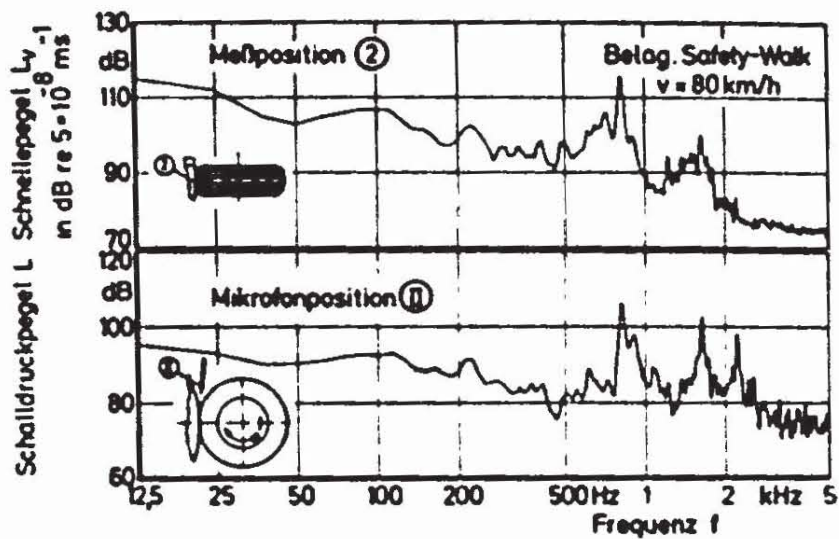


Bild 9: FFT-Spektren der Schnelle des Profilgrundes der mittleren Längsrille der Lauffläche und des Schalldrucks bei 80 km/h

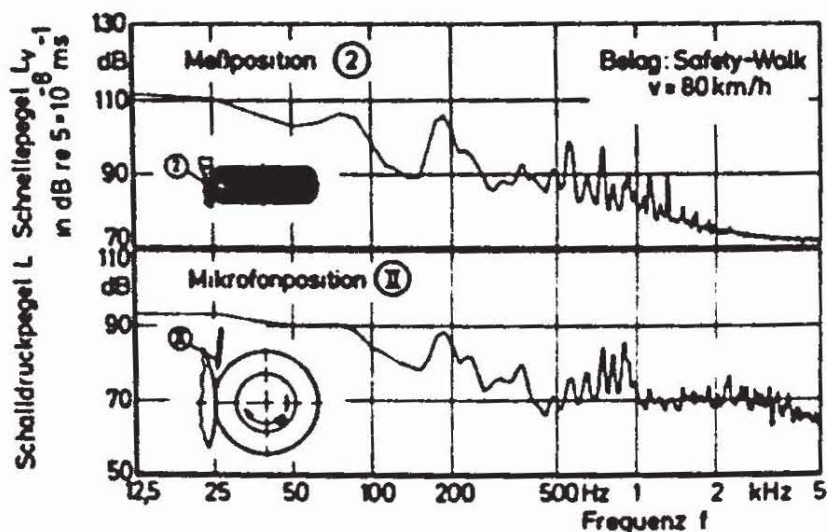


Bild 10: FFT-Spektren der Schnelle der Lauffläche des profillosen Stahlgürtelreifens und des Schalldrucks bei 80 km/h

weit ausgeprägter sind als im Schnellespektrum. Dies ist möglicherweise eine Folge des in [7] nachgewiesenen Trichtereffekts des Ein- und Auslaufzwickels.

Bild 10 zeigt bei gleichen Versuchsbedingungen das FFT-Spektrum der Schnelle der Lauffläche (oberes Teilbild) und das zugehörige Schalldruckspektrum (unteres Teilbild) des profillosen Reifens. Auch beim profillosen Reifen sind im Schnellespektrum signifikante Pegelspitzen zu erkennen, die sich bei den gleichen Frequenzen im Spektrum des Schalldrucks wiederfinden. Zurückzuführen sind diese Pegel auf fertigungstechnisch bedingte, axial verlaufende kleine Erhebungen (Höhe ca. 0,3 mm, Breite ca. 0,3–1 mm) an der Lauffläche, deren Grundfrequenzen bei der Geschwin-

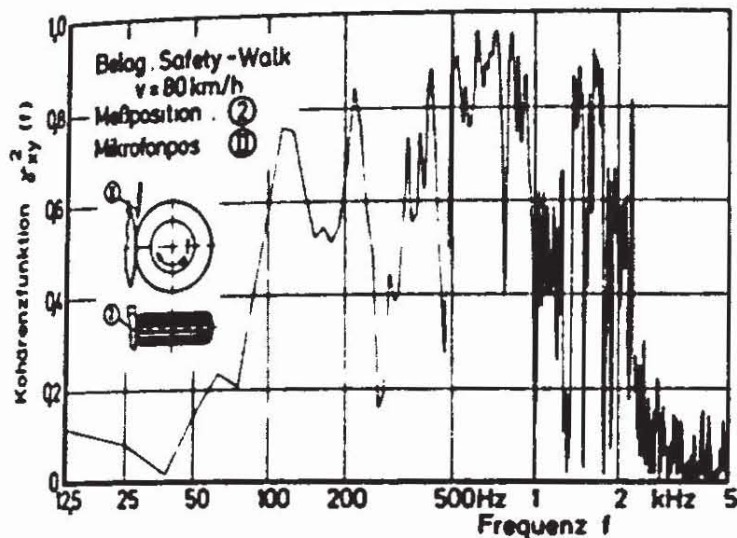


Bild 11: Kohärenzfunktion zwischen der Schnelle des Profilgrundes der mittleren Längsrille der Lauffläche und dem Schalldruck bei 80 km/h.

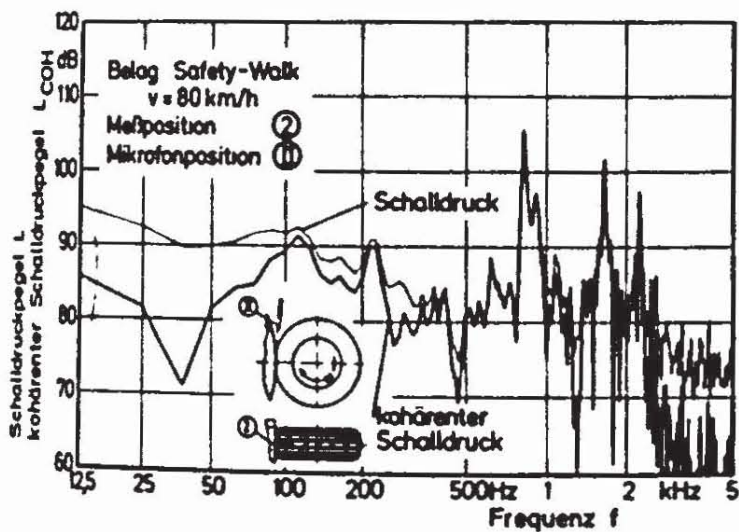


Bild 12: FFT-Spektren des Schalldrucks und des zur Schnelle der Lauffläche kohärenten Schalldrucks bei 80 km/h

digkeit 80 km/h 187,5 bzw. ca. 80 Hz betragen. Außerdem ist festzustellen, daß der Schnellepegel zu höheren Frequenzen hin stärker abfällt als der Schalldruckpegel. Ob dies auf den o. g. Trichtereffekt zurückzuführen ist oder ob dies andere Ursachen hat, ist noch ungeklärt. Beim Vergleich der Bilder 9 und 10 wird deutlich, daß – zumindest auf relativ ebenen „Fahrbahnen“ – die Profilteilung der Lauffläche maßgeblich verantwortlich ist für die Schwingungsanregung und die damit verbundene Geräuschemission des Reifens. Der profillose Reifen zeigt, daß selbst kleine Unregelmäßigkeiten auf der glatten Lauffläche zu einer relativ starken Schwingungsanregung des Reifens führen können.

Zur Beantwortung der Frage, inwieweit die Geräuschemission auf die Schwingungen des Reifens zurückzuführen sind, dient die Kohärenzfunktion $\gamma_{xy}^2(f)$ zwischen Schwingschnelle und Schalldruck. Sie ist ein Maß für die lineare Abhängigkeit des Ausgangssignals (hier Schalldruck) vom Eingangssignal (hier Schwingschnelle der Reifenoberfläche). Ist das untersuchte System linear und ist das Ausgangssignal ausschließlich auf das Eingangssignal zurückzuführen, so ist $\gamma_{xy}^2(f) = 1$ für alle Frequenzen; sind beide Signale vollkommen unkorreliert, so ist $\gamma_{xy}^2(f) = 0$ für alle Frequenzen.

Bild 11 zeigt die Kohärenzfunktion zwischen der raumfest gemessenen Schwingschnelle der Lauffläche und dem Schalldruck.

Man sieht, daß die Kohärenz im Frequenzbereich zwischen 0,1 und 2,3 kHz mit wenigen Ausnahmen gut ist und z. T. Werte von nahezu 1 erreicht, d. h. es liegt eine gute Korrelation zwischen der Laufflächenschwingung und dem Schalldruck vor. Allerdings ist nicht auszuschließen, daß die gute Kohärenz bei der *Stolleneingriffsfrequenz und deren Harmonischen* auch auf „Air-pumping“-Effekte zurückzuführen sein kann, da die Anzahl der Profilrillen derjenigen der Profilstollen entspricht; diese Fragestellung wird derzeit untersucht.

Multipliziert man die Kohärenzfunktion mit dem Schalldruckspektrum, so erhält man das kohärente Schalldruckspektrum. Dieses Spektrum ist der Anteil an der Geräuschemission, der auf die gemessenen Schwingungen (Radialkomponente der Lauffläche) zurückzuführen ist.

Bild 12 zeigt den Vergleich zwischen dem gemessenen Schalldruck (obere Kurve) und dem kohärenten Schalldruck (untere Kurve).

Man sieht, daß sich die Kurven im Frequenzbereich zwischen 0,1 und 2,3 kHz sehr ähnlich sind bzw. sich decken; die Differenz im Summenpegel beider Spektren beträgt nur 1,2 dB.

Diese Ergebnisse zeigen, daß bei der untersuchten Reifen-„Fahrbahn“-Kombination die Schwingungsanregung des Reifens hauptsächlich durch das Laufflächenprofil erfolgt und daß diese Schwingungen mit hoher Wahrscheinlichkeit für die Schallabstrahlung verantwortlich sind.

5 Zusammenfassung

Es werden drei laseroptische Meßverfahren zur Untersuchung von Reifenschwingungen vorgestellt, die für den Einsatz auf dem Trommelprüfstand geeignet sind: die Doppelpuls-Holografie, die Doppelpuls-Specklefotografie und die Laser-Doppler-Vibrometrie.

Die Doppelpuls-Holografie liefert im Zusammenwirken mit einem Derotator das Schwingungsmuster des rotierenden Reifens, das die Ermittlung der örtlichen Amplituden erlaubt. Mit der Laser-Doppler-Vibrometrie konnte eine gute Korrelation zwischen der radialen Komponente der Laufflächenschwingung und dem Schalldruck nachgewiesen werden.

Schrifttum

- [1] Liedl, W.: Der Einfluß der Fahrbahn auf das Geräusch profilloser Reifen und ein Beitrag zu seiner Erklärung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1978.
- [2] Liedl, W.: Der Einfluß der Fahrbahn auf das Geräusch profilloser Reifen und ein Beitrag zu seiner Erklärung. Automobil-Industrie, Heft 3, 1977.
- [3] Denker, D.: Reifenabrollgeräusche und Gleitbeiwerte von profilierten Reifen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1980
- [4] Denker, D.: Reifenprofilgeräusche und Gleitbeiwerte von Reifen-Fahrbahn-Kombinationen, Teil I und II. Automobil-Industrie, Hef 1 und 3, 1978
- [5] Liedl, W., Denker, D., Köhler, E.: Reifenabrollgeräusch und Kraftschlußbeiwert. FISITA 80. XVIII. Int. Congress, Hamburg, 1980
- [6] Essers, U., Liedl, W., Eberspächer, R., Köhler, E., Litschel, R.: Luftschall-, Körperschall- und laseroptische Messungen zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Reifenabrollgeräuschen bei Trockenheit bzw. Nässe. Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Straßenverkehr, Forschungsbilanz 1980. (8. Statusseminar), Verlag TÜV Rheinland G. m. b. H., Köln
- [7] Ronneberger, D., Flötke, H., Helmsen, F., Schaaf, K.: Schallabstrahlung von rollenden luftumströmten Reifen. Beitrag des Dritten Physikalischen Instituts der Universität Göttingen zur 5. Projektbesprechung zum BMFT-Vorhaben „Entwicklung lärmarmen Reifen“, März 1981, unveröffentlicht

Diskussion

Teilnehmer: *Dr. Bergmann*

Die gemessenen Schnellepegel sind bis zu Geschwindigkeiten von 100 km/h am Rand der Reifenlauffläche höher als in Laufflächenmitte. Oberhalb dieser Geschwindigkeit erweisen sich die Schnellepegel an beiden Stellen als etwa gleich groß. An der Reifenseitenwand treten höhere Schnellepegel auf als an der Lauffläche. Daß die von der Seitenwand abgestrahlten Schalldruckpegel trotzdem kleiner sind als diejenigen der Lauffläche, dürfte durch die höhere Grenzfrequenz der Seitenwand und den dadurch geringeren Abstrahlgrad verursacht sein sowie vor allem durch die Abstrahlcharakteristik des hinsichtlich der Lauffläche wirksamen Auslaufzwickels.