

ERFASSUNG VON 3-D-SCHWINGUNGEN AN PKW-REIFEN

Der Reifen ist das wichtigste Bindeglied zwischen Fahrer, Fahrzeug und Fahrbahn. Für die Komfortoptimierung und zur Reifendruckkontrolle ist es wichtig, das genaue Schwingungsverhalten von Reifenflanken zu kennen. Fraunhofer IWU und TU Dresden haben mit einem 3-D-Laserscanner und anderen Prüfständen zahlreiche Messungen vorgenommen, um die Anregungen aus dem Straßen-Reifen-Kontakt zu bestimmen. Gegenüber herkömmlichen Prüfverfahren wurden die Vorteile des Vibrometers wie berührungslose Messung und hohe Messpunktanzahl konsequent genutzt.



AUTOREN



DIPL.-ING. JAN BRÄUNIG

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter mit den Schwerpunkten Fahrzeugtechnik, NVH und Verzahnung in der Abteilung Adaptronik und Akustik am Fraunhofer IWU in Dresden.



DIPL.-ING. ROBERT SÜNDER

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) der Technischen Universität Dresden.



DIPL.-ING. TORSTEN BAHNERT

ist Applikationsingenieur bei der ITI GmbH in Dresden.



PROF. DR.-ING. GÜNTHER PROKOP

ist Inhaber der Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik am Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) der Technischen Universität Dresden.

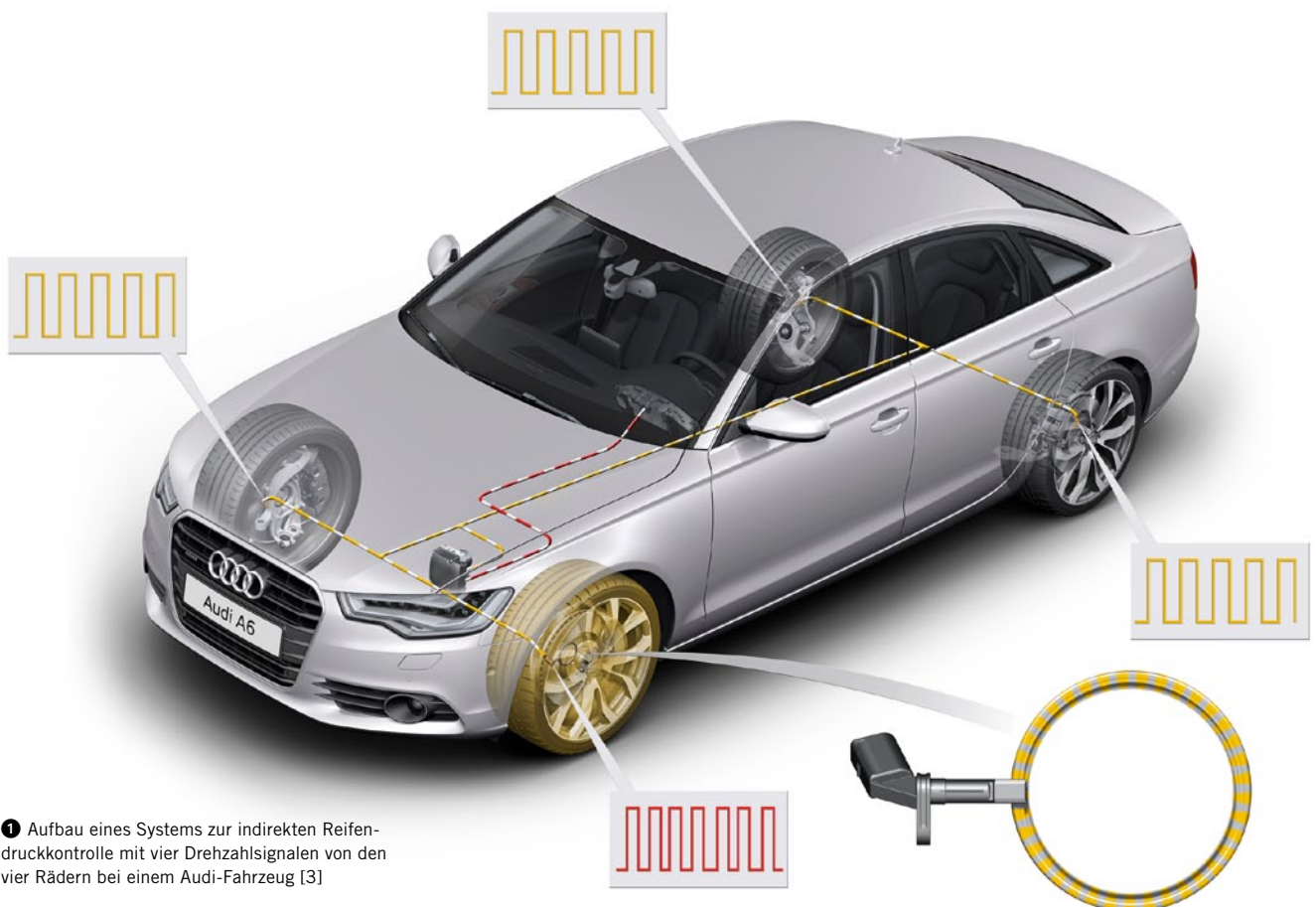
REIFEN ALS SICHERHEITSAKTOR

Das Schwingverhalten von Pkw-Reifen besitzt für Gesamtfahrzeugeigenschaften wie Sicherheit, Fahrkomfort oder Effizienz eine hohe Relevanz. Ein vertieftes Verständnis der physikalischen Zusammenhänge bildet die Grundlage, um zuverlässige sowie zeit- und kosteneffiziente Methoden zur Bewertung des Reifenschwingverhaltens in den Fahrzeugentwicklungsprozess zu integrieren.

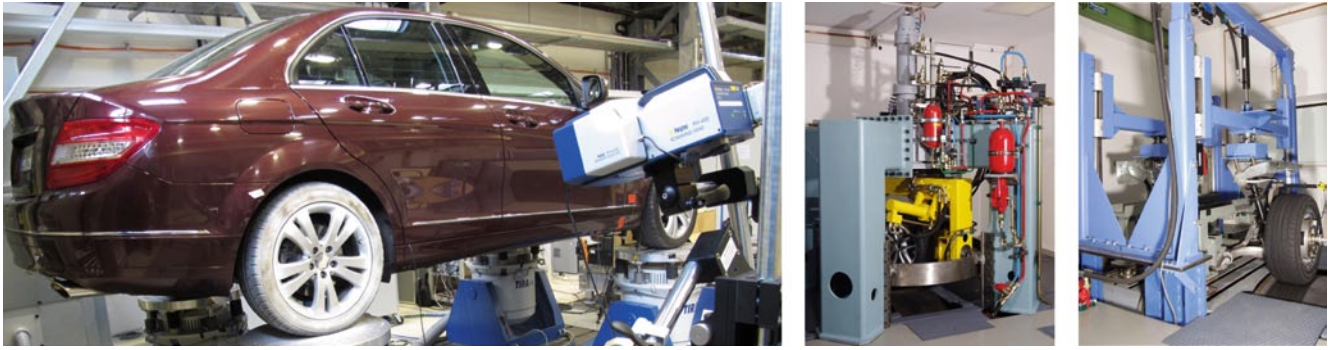
Am Institut für Automobiltechnik Dresden (IAD) der TU Dresden sowie dem Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Gruppe Fahrzeugtechnik und Akustik, stehen vielfältige Möglichkeiten bereit, um relevante Reifenschwingformen als Antwort auf bestimmte Fahrbahnanregungen experimentell und simulativ zu analysieren. Insbesondere der Abgleich von Reifenflankenschwingungen mittels berührungsloser 3-D-Laserscanner-Messung (Vibrometer) ist Inhalt dieses Artikels.

BEDEUTUNG DER REIFENSCHWINGUNGEN

Nach [1] beschreibt der Fahrkomfort „die Gesamtheit aller auf die Insassen einwirkenden mechanischen und akustischen Schwingungen“. Eine Verschlechterung des Fahrkomforts kann unter anderem zu einer Erhöhung der psychischen und physischen Belastung des Fahrers führen, wodurch das Unfallrisiko steigt. Somit stellt der Fahrkomfort auf Gesamtfahrzeugebene sowohl eine sicherheits-



❶ Aufbau eines Systems zur indirekten Reifendruckkontrolle mit vier Drehzahl-Signalen von den vier Rädern bei einem Audi-Fahrzeug [3]



② Übersicht zu Reifenprüfungen in der Dresdner Forschungslandschaft – Shakerprüfstand des Fraunhofer IWU (links), Außentrommelprüfstand des IAD (Mitte) und Radaufhängungsprüfstand des IAD (rechts)

als auch eine qualitätsrelevante Eigenschaft dar. Das Übertragungsverhalten des Reifens beeinflusst die Weiterleitung der fahrbahn- und raderregten Schwingungen über das Fahrwerk in den Fahrgastraum. Forschungsvorhaben wie [1, 2] beschäftigen sich mit der Objektivierung des komfortrelevanten Reifenschwingungsverhaltens und der Korrelation zu Subjektivbewertungen.

Das Reifenschwingverhalten besitzt des Weiteren große Bedeutung für die indirekte Reifendruckkontrolle. Dieses System warnt den Fahrer bei einer Verringerung des Reifeninnendrucks und zählt zu den Fahrerassistenzsystemen. Indirekte Systeme schließen aus der Analyse des Raddrehzahlsignals, ①, auf einen Druckverlust im Reifen. Neben einer Änderung des dynamischen Radhalbmessers ist im Drehzahlsignal eine druckabhängige Frequenzverschiebung charakteristischer Reifeneigenschwingformen zu beobachten. Die Auswertung der Sensorsignale erfolgt dabei im ESP-Steuergerät. Während der Fahrt ver-

gleicht das System die aktuellen Zustandsgrößen mit den Sollgrößen.

Damit stellt das Reifenschwingverhalten einen wichtigen physikalischen Effekt für Gesamtfahrzeugeigenschaften wie Fahrkomfort und sicherheits- und effizienzrelevante Fahrerassistenzsysteme dar. Im Folgenden sollen Werkzeuge zur experimentellen Untersuchung des Reifenschwingungsverhaltens am Fraunhofer IWU sowie am IAD vorgestellt werden.

MÖGLICHKEITEN DER REIFENPRÜFUNG

Hier sollen drei Prüfstände, ②, näher vorgestellt werden, mit denen eine Reifenflankenuntersuchung möglich ist. Der Shakerprüfstand des Fraunhofer IWU, ② (links), stellt eine Möglichkeit zur Analyse des stehenden, belasteten Reifens dar. Dabei wird ein Fahrzeug so auf dem Prüfstand positioniert, dass jeder der vier Shaker ein Rad trägt. Die Einsatzgebiete des Prüfstands umfassen zudem optional die Replikation von Fahrwerks-

geräuschen am Gesamtfahrzeug und Schwingfestigkeitsuntersuchungen.

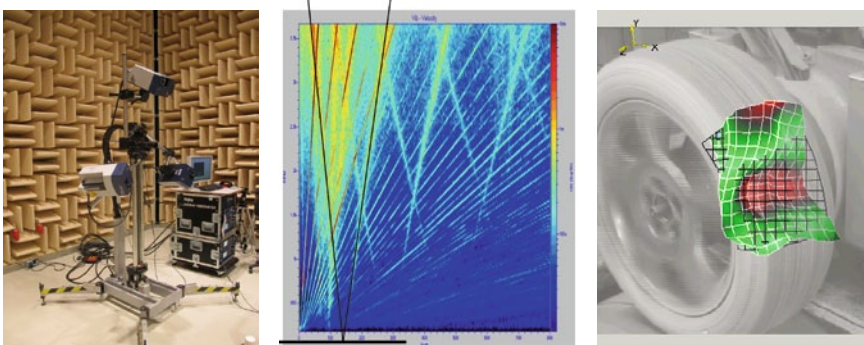
Eine zweite übliche Methode zur Analyse des Schwingungsverhaltens eines drehenden, belasteten Reifens ist die Schlagleistenüberfahrt auf einem Außentrommelprüfstand. Am Reifenprüfstand des IAD, ② (Mitte), lassen sich mit dieser Methode Reifeneigenschaften isoliert von Einflüssen aus dem Fahrwerk analysieren. Als drittes besteht die Möglichkeit, Schlagleistenmessungen am Radaufhängungsprüfstand des IAD, ② (rechts), durchzuführen, um Reifen unter dem Einfluss einer realen Radaufhängung zu untersuchen.

PRÜFSTANDSUNTERSUCHUNGEN

Die Motivation zum Einsatz eines 3-D-Laser-Vibrometers, ③ (links), ergibt sich aus dem berührungslosen Messverfahren und der Möglichkeit, eine hohe Messpunktanzahl zu verwenden. Gleichfalls ist eine klassische Modalanalyse am drehenden Reifen mit geklebten Sensoren und Hammeranregung nicht praktikabel. Mithilfe der Lasermess-technik sind nun lokal begrenzte Ereignisse auf der Reifenflanke hochgenau auflösbar, ③ (rechts).

Auf der anderen Seite muss sichergestellt werden, dass die Anregung über die komplette Messzeit aller Messpunkte konstant bleibt. Aufgrund von Mittelungsrechnungen und hoher Auflösung, respektive Messpunktanzahl, ergeben sich Zeitaufwände bis zu mehreren Stunden für ein komplettes Scanning pro Betriebszustand.

Am Fraunhofer IWU, Standort Dresden, wurde bereits das Schwingungsverhalten eines belasteten, stehenden Reifens



③ Prüfstandsuntersuchungen – Messungen per 3-D-Laser-Vibrometer mit drei Laserköpfen (links), ortsfeste und drehende Schwingformen in einem (Campbell-)Frequenzdiagramm (Mitte), Erkennung lokal begrenzter Ereignisse auf der Reifenflanke (rechts)

erfolgreich analysiert [4]. Weiterführend wurde in ersten Probemessungen auf dem Außentrommelprüfstand des IAD deutlich, dass der Versuchsaufbau, die Einrichtung des Messsystems und die Versuchsdurchführung noch zu verbessern sind, um das dynamische Schwingverhalten eines drehenden, belasteten Reifens mit einem 3-D-Laser-Vibrometer (von der Firma Polytec) erfassen zu können.

Um den Zeitaufwand am Reifenprüfstand gering zu halten, wurde das Vibrometer an einem Miniaturreifenprüfstand voreingestellt, welches ein Modell des IAD-Reifenprüfstands im Maßstab 1:10 ist [5]. Dies beinhaltet neben der Scankopfpositionierung den Abgleich des Videobilds mit den Laserstrahlern sowie die eindeutige Bestimmung der Lage und Position aller Scanköpfe im Raum. Weiterhin wurde eine Laser-Entfernungsmesseinheit hinzugenommen, um eine Phasenreferenz im Bezugssystem zu erzeugen. Der Scankopfpositionierung des 3-D-Systems kommt bei der Messung auf drehenden Objekten eine besondere Rolle zu, denn die maximale Umfangsgeschwindigkeit darf die maximal zulässige Geschwindigkeitskomponente in Strahlrichtung nicht überschreiten. Anderenfalls muss der Scan-Winkel reduziert werden indem beispielsweise der Arbeitsabstand der Laser zum Messobjekt erhöht wird.

Eine weitere Herausforderung bei der Messung auf rotierenden Oberflächen ist das Speckle-Rauschen, was sich im Antwortsignal bei Vielfachen der Drehfrequenz zeigt. In der Polytec-Software ist die „Speckle Tracking“-Option implementiert, welche das damit verbundene Signalrauschen minimieren soll.

In der Ergebnisdarstellung von Schwingungen auf drehenden Oberflächen ist weiterhin zu beachten, dass es ortsfeste und drehende Schwingformen gibt. ③ (Mitte, schwarz markiert), stellt die Aufspaltung einer Schwingform mit zunehmender Drehzahl dar. Die Linien schneiden sich bei null Umdrehungen bei der Eigenfrequenz im Stillstand. Mit steigender Drehzahl kommt es zu einer annähernd linear zunehmenden Eigenfrequenzverschiebung zwischen den doppelten Moden. Dieses Verhalten ist grundsätzlich auch am drehenden Reifen zu beobachten, wird jedoch von weiteren Effekten überlagert, die aufgrund der Reifenkonstruktion und -werkstoffe auftreten.

Durch die Abplattung des belasteten Reifens und die damit verbundene Störung der Symmetrie im Bereich des Latsches werden die doppelten Eigenmoden des unbelasteten Reifens bereits im Stillstand in zwei separate Eigenmoden mit unterschiedlicher Eigenfrequenz aufgespalten. Allgemein treten die meisten Eigenmoden mit zunehmender Rollgeschwindigkeit bei niedrigeren Eigenfrequenzen auf. Diese Verschiebung ist dabei umso größer, je höher die Ordnung der Mode (Anzahl der Schwingungsknoten) ist. Deshalb weisen die Eigenfrequenzen der Eigenmoden niedriger Ordnung, zum Beispiel der Starrgürtel-Vertikalmode, nur geringe Änderungen auf. Bei hohen Geschwindigkeiten entspricht die Frequenzreihenfolge der Eigenmoden dadurch nicht mehr der am stehenden Rad. Die durch die Abplattung und Rotation aufgesplitteten Eigenmodenpaare haben am drehenden Rad gegenläufig umlaufende, komplexe Schwingformen [6].

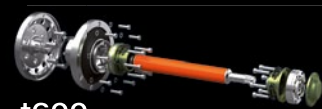
VALIDIERUNG DER MESSERGEBNISSE

Nach Abschluss der vorbereitenden Untersuchungen am Miniaturreifenprüfstand erfolgten die Messungen am Außentrommelprüfstand des IAD mit einem Reifen der Dimension 235/60 R18. Diese wurden bei konstanter Radlast und Reifeninnendruck bei den Geschwindigkeiten 20 sowie 30 km/h durchgeführt. Zusätzlich zum Abrollen auf glatter Stahltrommel wurden Messungen bei Anregung durch eine auf der Trommel montierte Schlagleiste durchgeführt.

Um die Schwingbewegungen der Reifenflanke zu detektieren, wurde das 3-D-Laser-Vibrometer seitlich zum rotierenden Reifen aufgebaut und in der Software mit einem Netz von Messpunkten versehen. Für jeden Scanpunkt wurde der Mittelwert aus mindestens 40 Einzelmessungen bei einer Einzelmesszeit von 800 ms berechnet.

Zum Abgleich der aus den Messungen am IAD-Außentrommelprüfstand gewonnenen Ergebnisse werden die ermittelten Schwingformen im Folgenden mit den Schwingformen des von Bahnert in [7] vorgestellten FEM-Reifenmodells verglichen, dass das Schwingungsverhalten des rollenden Rads im Frequenzbereich bis circa 250 Hz ausreichend genau abbilden kann. Der modulare Modell Aufbau ermöglicht es, je nach Aufgabenstel-

Ein Unternehmen, spezialisiert auf Antriebsstränge von Prüfständen, bietet optimale Lösungen zum Test von klassischen und alternativen Antrieben. Kontaktieren Sie uns!



t600

Eine optimal abgestimmte hochelastische Prüfstandswelle.



t1000

Die elastische Kupplung mit nichtlinearer Steifigkeit und sehr hoher Dämpfung. Besonders von Vorteil ist die einstellbare Steifigkeit.



tDock 800

Ein manuelles Docksystem entwickelt zum Docken von Wellen auf Prüfständen.



tDock 1500

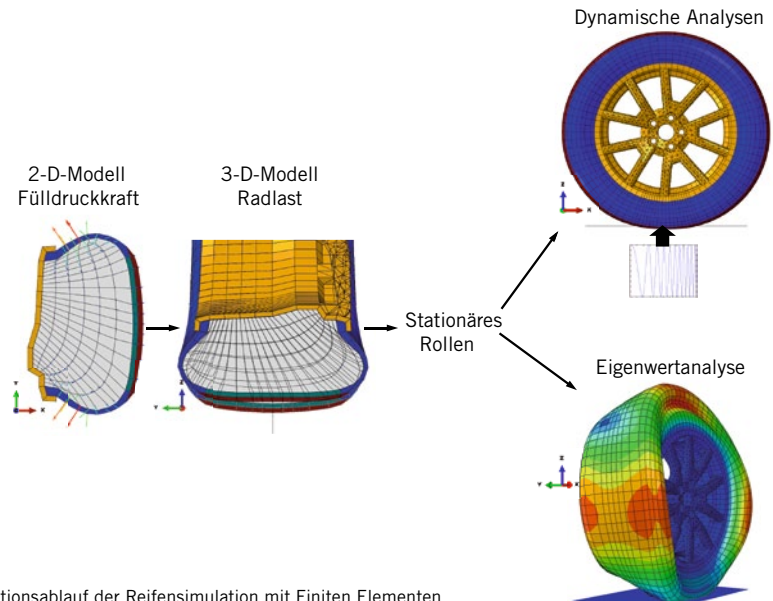
Ein automatisches Docksystem, entwickelt für den Einsatz mit Palettensystemen.

lung zusätzlich zum Reifenmodell eine flexible Felgenstruktur und ein Netz für die eingeschlossene Luftsäule einzubinden. Der Reifenquerschnitt wird in Seitenwand, Lauffläche und Gürtel unterteilt, da die Gummikomponenten in Abhängigkeit von ihrer Funktion unterschiedliche Werkstoffeigenschaften aufweisen. Untersuchungen von Kindt [6] haben gezeigt, dass die Reifenschwingungen bis 500 Hz nicht merklich durch die Profilgestaltung beeinflusst werden. Daher ist die Lauffläche im Modell als Slick abgebildet.

Der Simulationsablauf, ④, in Abaqus startet mit der Aufbringung äquivalenter Kräfte für den Fülldruck am zweidimensionalen Modell. Nach der Transformation der Ergebnisse auf ein dreidimensionales Modell wird die Radlast durch Verschiebung einer starren, ebenen Platte relativ zum Reifen und die Randbedingungen für stationäres Rollen aufgebracht. Abschließend werden die Übertragungsfunktionen für dynamische Analysen und die Eigenwerte des Reifens unter Berücksichtigung der Randbedingungen bestimmt.

⑤ stellt exemplarisch für zwei verschiedene Schwingformen den Ergebnisvergleich zwischen FE-Simulation und Messung in der x-z-Ebene dar. Der Vergleich erfolgt für eine Simulation und Messung auf der glatten Stahltrommel bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h. Die FE-berechneten Eigenschwingformen in der linken Spalte von ⑤ sind die aus der Messung identifizierten Schwingformen bei annähernd identischen Frequenzen gegenübergestellt. Die Bewegungen des Reifens bei einer bestimmten Schwingform sind in der Messung nicht so deutlich zu identifizieren wie in der Simulation, dennoch sind grundsätzliche Ähnlichkeiten in den betrachteten Schwingformen erkennbar.

Zu den Messergebnissen muss angemerkt werden, dass die Scankopfpositionierungen aufgrund des unzugänglichen Prüfstandsbaus nicht optimal waren. Des Weiteren erfolgte die FE-Berechnung der Schwingformen nicht auf Basis einer konkreten Anregung während die reale Messung eine Art Betriebsschwinganalyse aufgrund der Trommel- und Reifenoberfläche darstellte. Ein weiterer Grund für Abweichungen bei der Validierung liegt in der gekrümmten Oberfläche der Prüfstandstrommel im Gegensatz zum ebenen Untergrund im Modell.



④ Simulationsablauf der Reifensimulation mit Finiten Elementen

FAZIT UND AUSBLICK

Der Einsatz eines 3-D-Laser-Vibrometers an einem Außentrommelreifenprüfstand zur Identifizierung von Reifenschwingformen stellt eine große Herausforderung dar. Nach ausführlichen Vorüberlegungen

gen sowie vorbereitenden Messungen an einem Miniaturreifenprüfstand ist es gelungen, Betriebsschwingungen eines Pkw-Reifens zu identifizieren. Der Vergleich mit Eigenschwingformen eines FEM-Reifenmodells zeigt gute Übereinstimmungen einiger ausge-

FE-Simulationsergebnisse aus Abaqus	Messergebnisse vom 3-D-Laser-Vibrometer
Biegemode 2: 93,9 Hz	Biegemode 2: 91,3 Hz
Radialmode 2: 85,7 Hz	Radialmode 2: 83,3 Hz

⑤ Gute Übereinstimmung beim Vergleich der Schwingformen zwischen Simulation und Messung

DANKE

Die Arbeiten zur Messung des Reifenschwingverhaltens wurden in einer Gruppe durchgeführt. Die Autoren bedanken sich bei Dipl.-Ing. Holger Kunze und cand. ing. Christoph Schiller für ihren Beitrag. Kunze ist Hauptabteilungsleiter Mechatronik und Funktionsleichtbau mit den Schwerpunkten Fahrzeugtechnik, Werkzeugmaschinen und Medizintechnik am Fraunhofer IWU Dresden. Schiller ist Student mit der Vertiefungsrichtung Kraftfahrzeugtechnik im Studiengang Maschinenbau der TU Dresden.

wählter Schwingformen, sodass von einer Korrelation von Messung und Simulation ausgegangen werden kann.

Nachdem Reifenschwingformen in Messung und Simulation gleichermaßen identifiziert werden können, besteht die Möglichkeit zur Ableitung mechanischer Ersatzmodelle basierend auf validierten Reifenschwingformen. Ziel dabei ist es, das Verständnis der Wirkmechanismen des Reifenschwingverhaltens am Fahrzeug und am Prüfstand zu erhöhen, um effiziente Methoden zur funktionalen Absicherung von beispielsweise indirekten Reifendruckkontrollsystemen zu entwickeln.

LITERATURHINWEISE

- [1] Hilscher, C.: Komfortrelevante Charakterisierung des Übertragungsverhaltens von Reifen in Messung und Simulation. Dresden, TU, Dissertation, 2008
- [2] N. N.: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen – Ganzkörperschwingungen. VDI-Richtlinie 2057, Düsseldorf, 2002
- [3] Roscher, T.; Sünder, R.: Tire Classification Project – A Rig Procedure for Evaluating Tire Compatibility with Indirect TPMS. Lecture, 8th IQPC Intelligent Tire Technology, Darmstadt, 2012
- [4] Bräunig, J.; Kunze, H.; Sentpali, S.; Hübelt, J.; Klemm, M.: Einkopplung von Reifen-Fahrbahn-Anregungen in die Fahrzeugstruktur. In: ATZ 115 (2013), Nr. 1, S. 38-41
- [5] Bormann, A.: Ein komplexes Verfahren zur Ermittlung des Kraftschluss- und Abriebverhaltens sowie der Rollverluste von Protectorvulkanisationen. Dresden, TU, Dissertation, 1984
- [6] Kindt, P.: Structure-Borne Tyre/Road Noise Due to Road Surface Discontinuities. Leuven, Katholieke Universiteit, doctoral thesis, 2009
- [7] Bahnert, T.; Lienkamp, M.; Vogel, F.: Experimental and Numerical Characterisation of Tyres in Terms of Rolling Noise. Lecture, chassis tech plus, 3rd International Munich Chassis Symposium, München, 2012



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.springerprofessional.de/ATZ



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
order your test issue now:
springervieweg-service@springer.com

Ideen zum Abheben



Ein Abo von **lightweightdesign** liefert gebündelte Kompetenz zum Thema Leichtbau direkt ins Haus. In jedem 1-Jahresabo ist das wertvolle Fachbuch von Bernd Klein „Leichtbaukonstruktion“ (9. Ausgabe) enthalten.
Bestellen Sie jetzt: **Tel: +49 (0) 6221 3454303**
oder per mail: springervieweg-service@springer.com

Lesen Sie alles über: Produkte und Entwicklungen aus den Bereichen Werkstoffe, Konstruktion, Fertigungs- und Prozesstechnik sowie Qualitätssicherung für den angewandten Leichtbau aus den Branchen Automobil, Maschinenbau, Schiff / Bahn, Luft- und Raumfahrt, Windkraft.

www.lightweight-design.de

 **Springer Vieweg**