

Christian Brinkmann, Jürgen Haberland und Stefan Böttinger, Hohenheim, sowie Oliver Erne und Gunter Sanow, Braunschweig

Optisches 3D-Messsystem zur Untersuchung von Reifenverformungen

Nachdem in Hohenheim Laser-messeinrichtungen zur Vermessung der Reifeninnenkontur [1] und zur 3D-Oberflächenvermessung [2] erfolgreich entwickelt und eingesetzt wurden, zeigen dynamische Verformungsmessungen am Reifen mit dem optischen 3D-Messsystem „PONTOS“ viel versprechende Ergebnisse. Insbesondere die Gürtel-eigenfrequenzen sowie die Ausbildung der zugehörigen modalen Schwingungseigenformen des Reifengürtels können so für den rollenden Reifen untersucht werden. Im Folgenden werden Messsystem und -aufbau sowie erste Ergebnisse und weitere Einsatzmöglichkeiten dargestellt.

Dipl.-Ing. Christian Brinkmann und Dipl.-Ing. Jürgen Haberland sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger), Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart; e-mail: Christian.Brinkmann@uni-hohenheim.de.
Dipl.-Ing. Oliver Erne und Dipl.-Ing. Gunter Sanow sind Mitarbeiter der GOM mbH, Braunschweig.

Schlüsselwörter

Traktorreifen, Reifenverformung, optisches Messsystem

Keywords

Tractor tyre, tyre deformation, optical measuring system

Literatur

Literaturhinweise sind unter LT 07425 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/localliteratur.htm> abrufbar.

In den vergangenen Jahren sind die Anforderungen an Traktorreifen aufgrund größerer, schnellerer und leistungsstärkerer Maschinen stark gestiegen. Wachsende Komfortansprüche erfordern eine möglichst optimale Schwingungsabstimmung aller Komponenten des Gesamtfahrzeugs, wobei der Reifen ein wichtiges Bindeglied darstellt. Dazu ist es notwendig, die Schwingungseigenschaften des Reifens auch im komfortrelevanten Frequenzbereich bis etwa 80 Hz zu kennen, was vor allem die Kenntnis der Gürtel-eigenfrequenzen und deren modale Schwingungsformen umfasst. Am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim werden zu diesem Thema umfangreiche Untersuchungen an verschiedenen Versuchseinrichtungen durchgeführt [3, 4], die mit Hilfe des Messsystems PONTOS sehr gut vertieft werden können.

Aufbau und Funktion

Das Messsystem PONTOS nutzt das Prinzip des kalibrierten Stereokamera-Aufbaus (Bild 1), um 3D-Koordinaten und damit 3D-Verschiebungen sowie 3D-Deformationen von Objekten zu bestimmen. Dazu werden retroreflektierende, kreisförmige Marker auf die Objektoberfläche aufgebracht, die aufgrund ihres sehr geringen Gewichts (<0,05 g) und ihrer geringen Dicke keinen störenden Einfluss während der Messung ausüben. Die Anzahl der Marker ist dabei unbeschränkt und beeinflusst die Messfrequenz nicht. Der PONTOS Messkopf wird auf einem Stativ frei vor dem Messobjekt positioniert. Die Berechnung der Koordinaten und Verschiebungen sowie Objektdefor-

mationen erfolgt automatisch in einer Offline-Auswertung. In der vorliegenden Applikation wurde das PONTOS-System in Verbindung mit High-Speed-Kameras und getriggert LED-Beleuchtung eingesetzt. Hiermit können typischerweise Aufnahme-frequenzen bis zu 500 Bilder/s bei 1,3 Megapixel Kameraauflösung oder höhere Frequenzen mit reduzierter Kameraauflösung erreicht werden. Die Problematik der kurzen Belichtungszeiten bei Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, welche üblicherweise aufwändige Lichnanlagen erfordert, wurde hier mit Hilfe der integrierten Beleuchtung und der retroreflektierenden Marker gelöst. Komplexe und dynamische Bewegungen und Verformungen werden anhand einer Bildserie aufgenommen und können im Ergebnis auch als Video wiedergegeben werden. Zusätzlich steht die Ausgabe von Diagrammen in Ergebnisberichten oder der Export in Standarddatenformaten zur Verfügung.

In der vorliegenden Anwendung wurde das optische Messsystem PONTOS eingesetzt, um das dynamische Verformungs- und Schwingungsverhalten eines großvolumigen Traktorreifens in verschiedenen Betriebszuständen zu untersuchen. Dazu wurde das System vor dem Hohenheimer Flachbandreifenprüfstand aufgebaut und optische Referenzmarken zur Kennzeichnung von Messpunkten auf der Reifenflanke und auf

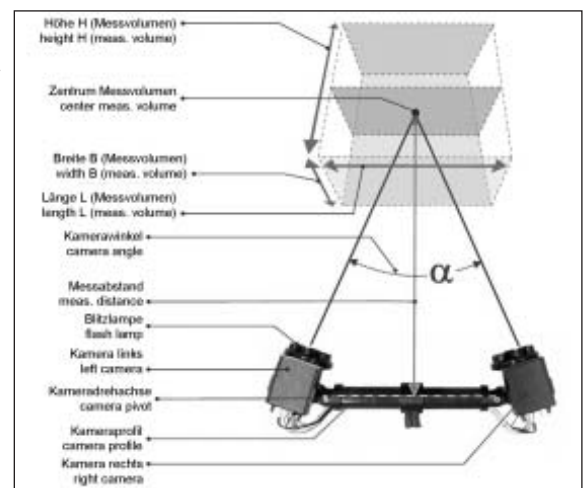


Bild 1: Messprinzip des optischen 3D-Messsystems PONTOS

Fig. 1: Measuring principle of the optical 3D measuring system PONTOS

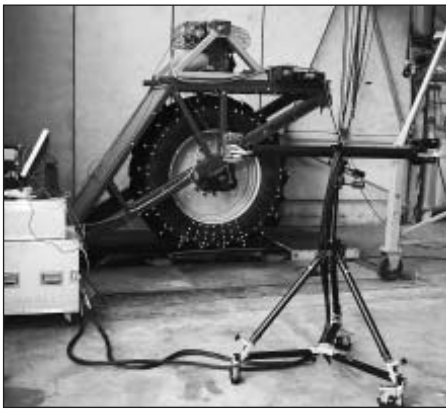


Bild 2: Messaufbau am Hohenheimer Flachbandreifenprüfstand

Fig. 2: Measuring setup at the Hohenheim flat-belt tyre test stand

der Prüfstandsschwinge angebracht (Bild 2). Der Reifen ist in die Prüfstandsschwinge eingespannt und rollt auf dem Stahlband ab. Die Fahrgeschwindigkeit kann zwischen 0 und 60 km/h stufenlos variiert werden. Auf der Schwinge ist mittig über dem Rad ein Unwuchtmassen-Schwingungserreger (Shaker) installiert, mit dem das Rad in vertikaler Richtung monofrequent angeregt werden kann. Parallel zum optischen Messsystem PONTOS wurden alle Versuche mit dem am Prüfstand installierten Messsystem aufgezeichnet, so dass auch Beschleunigungen (3D), Drehzahlen (Rad und Shaker), Reifeneinfederung und Kräfte (vertikal und longitudinal) zur Auswertung zur Verfügung stehen.

Zunächst wurden Messungen bei einer Radlast von 20 kN, einem Reifeninnendruck von 1,2 bar und mit vertikaler Anregung durch den Shaker bei stehendem Reifen und bei einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/h durchgeführt. Abschließend wurde bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten (10, 20, 30 und 40 km/h) ohne Shakeranregung gemessen, um die Reifenverformung in normalen Betriebszuständen zu ermitteln.

Ergebnisse der Vorversuche

Aufgrund der maximalen Messzeit des PONTOS Systems von 1,6 s bei einer Aufnahmezeit von 500 Hz und einer Bildauflösung von 1280 • 1024 Pixel kann kein kompletter 4-minütiger Frequenz-Sweep aufgenommen werden. Deshalb wurde dieser Hochlauf in einem Frequenzbereich zwischen 3 und 50 Hz bei einer Exzentrizität der Unwuchtmassen (4 • 6,18 kg) von 5,72 mm zunächst mit der am Prüfstand installierten Sensorik erfasst und ausgewertet. In Bild 3 ist die Transferfunktion, berechnet aus dem Verhältnis der Vertikalkraft in der Aufstandsfläche und der Anregungskraft des Shakers, im Frequenzbereich bis 50 Hz dargestellt. Deutlich zu erkennen sind die Spitzenwerte bei etwa 12,0 / 17,5 / 30,0 / 42,5 und 49,0 Hz. Hierbei handelt es sich um Reifeneigenfrequenzen, die eine jeweils typi-

Bild 3: Transferfunktion zwischen der Vertikalkraft F_z in der Aufstandsfläche und der Shakeranregungskraft F_{Sh} ($F_{z,stat} = 20 \text{ kN}$, $p_i = 1,2 \text{ bar}$, $v = 0 \text{ km/h}$, $f_{Sh} = 3 - 50 \text{ Hz}$, $A_{Sh} = 5,72 \text{ mm}$)

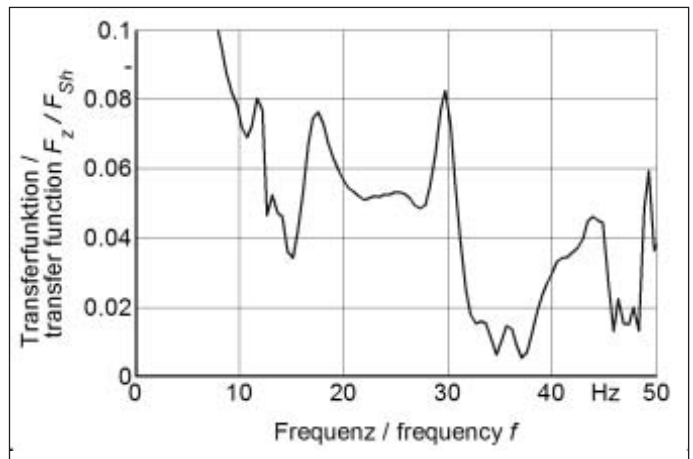


Fig. 3: Transfer function between vertical force F_z in the tread pattern and shaker excitation force F_{Sh}

sche Eigenform (Eigenmode) aufweisen. In [4] werden die Ergebnisse der experimentellen Modalanalyse desselben Reifens bei ähnlichen Randbedingungen dargestellt. Es ergeben sich gute Übereinstimmungen mit den hier ermittelten Eigenfrequenzen.

Mit dem Messsystem PONTOS sollen die zugehörigen Eigenformen aus dem Shakerversuch optisch erfasst und dargestellt und mit den in der experimentellen Modalanalyse ermittelten Moden verglichen werden. Dazu werden die in Bild 3 dargestellten Eigenfrequenzen jeweils einzeln mit dem Shaker angefahren. Bei konstanter Shakeranregungsfrequenz wird währenddessen eine Aufnahme mit dem optischen Messsystem durchgeführt. Allerdings schwingt der stehende Reifen trotz monofrequenter konstanter Anregungsfrequenz nicht nur in der jeweils angeregten Eigenmode, sondern es können auch andere Eigenformen angeregt werden. Bei rollendem Reifen ist zusätzlich die Anregung durch die Unrundheit sowie durch die Profilstellen zu berücksichtigen. Deshalb muss zur Visualisierung der jeweiligen Eigenform eine Bandpassfilterung durchgeführt werden. Beispielhaft ist die erste Vertikalmode bei $\sim 30 \text{ Hz}$ in ihrem oberen Umkehrpunkt in Bild 4 dargestellt. Die Pfeile geben Richtung und Betrag der Verschiebung des jeweiligen Messpunkts wieder. Als Globale Transformationspunkte wurden alle Punkte der Felge gewählt, Richtung und Größe der Verschiebungen sind also auf die Messpunkte der Felge bezogen. Es ist allerdings erkennbar, dass auch die Felge leichte Deformationen beschreibt. Diese sind zum einen auf die Messunsicherheit zurückzuführen, zum größeren Teil aber auf das Schwing-/Deformationsverhalten der Felge. Ein Vergleich mit der in der Modalanalyse ermittelten ersten

Vertikalmode zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Auch für die weiteren in Bild 3 dargestellten Eigenfrequenzen im Bereich bis 50 Hz lassen sich die zugehörigen Eigenformen, die in der Modalanalyse zuvor ermittelt wurden, wiederfinden.

Ausblick

Die dargestellten Auswertungen der Messungen mit dem optischen Messsystem PONTOS zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführten experimentellen Modalanalyse für den stehenden Reifen. Damit wurde die grundsätzliche Anwendbarkeit des Messsystems für die Untersuchung von Reifenschwingungen und -verformungen nachgewiesen. Im Folgenden werden nun die Versuche mit rollendem Rad intensiv ausgewertet, um Aussagen über die Schwingungseigenformen des Reifens im rollenden Zustand treffen zu können. Darüber hinaus wird das Schwingungsverhalten für reale Betriebszustände bei ausschließlicher Eigenanregung analysiert.

Aus den durchgeführten Messungen werden ferner Auswertungen zum Verformungsverhalten des frei rollenden Reifens im Latsch vorgenommen. Darüber hinaus sollen durch weitere Messungen an gelenkten und angetriebenen Rädern die in [5, 6] beschriebenen Untersuchungen zur Verschiebung der Aufstands- und Kraftangriffspunkte vertieft werden.

Bild 4: 1. Vertikale Eigenmode im oberen Umkehrpunkt bei $\sim 30 \text{ Hz}$

Fig. 4: 1st vertical mode shape in the top reversal point at $\sim 30 \text{ Hz}$

