

Christian von Holst und Horst Göhlich, Berlin

# Simulation von großvolumigen Reifen

*In der Fahrdynamiksimulation ist der Reifen das entscheidende Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn. Die Anforderungen an die Reifenmodelle sind bei Landmaschinen sehr hoch, da hier zusätzliche Effekte wie Unrundheit und grobstollige Profilierung, große Reifendehformationen und große ungefederte Masse das Schwingverhalten beeinflussen. Der Unterschied zwischen kennlinienbasierten und physikalischen Reifenmodellen wird beschrieben und die Grenzen der Reifenmodelle werden aufgezeigt. Eine Problemlösung durch Kombination verschiedener Reifenmodelle kann hier in Zukunft möglicherweise Abhilfe schaffen.*

Dipl.-Ing. Christian von Holst arbeitet seit 1995 am Institut für Landmaschinen und Ölhydraulik als wissenschaftlicher Assistent und beschäftigt sich in seiner Promotion mit der Optimierung des fahrdynamischen Verhaltens von Traktoren. em. Prof. Dr.-Ing. Horst Göhlich leitete das Institut für Landmaschinen und Ölhydraulik in der Zeit von 1966 bis 1994 und ist dort noch als Emeritus aktiv; Institut für Maschinenkonstruktion, Bereich Landmaschinen und Ölhydraulik, der TU Berlin, Zoppoter Str. 35, D - 14199 Berlin, e-mail: von\_Holst@fax-1t.kf.tu-berlin.de

## Schlüsselwörter

Mehrkörpersimulation, Fahrdynamik, AS - Reifen, Modellbildung

## Keywords

Multi-body simulation, ride dynamics, agricultural tyres, modeling

Bei der Entwicklung oder Veränderung eines Traktors sind die Reifen von entscheidender Bedeutung. Neben den Anforderungen an Traktion, Bodenschonung und Verschleißarmut sind sie bei allen Fahrvorgängen das Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn und beeinflussen das Fahrzeug in entscheidendem Maße. Man kann die Reifen als eine Art fahrdynamischen Filter betrachten, der aus den Fahrbahnregungen entsprechend seines Übertragungsverhaltens eine veränderte Anregung erzeugt und in das Fahrzeug weiterleitet. Diese Betrachtungsweise ist jedoch eine extreme Vereinfachung, die nur zur Veranschaulichung bestimmter dynamischer Effekte herangezogen werden darf. Im Gegensatz zu einem Filter, der rein passiv arbeitet, also nur Signale, die eingehen, verändern kann, führt der Reifen auch zu spezifischen Anregungen des Fahrzeugs. Er generiert also Signale, die ohne ihn nicht vorhanden wären.

Für die Berechnung und Vorhersage des Schwingverhaltens (Fahrsicherheit und -komfort), die Festigkeitsberechnung, für akustische Problemstellungen und für die Auslegung moderner Fahrzeugregelsysteme wie Schlupfregelungen und ABS ist die genaue Beschreibung des Reifenverhaltens notwendig. Dazu wurden verschiedene Reifenmodelle

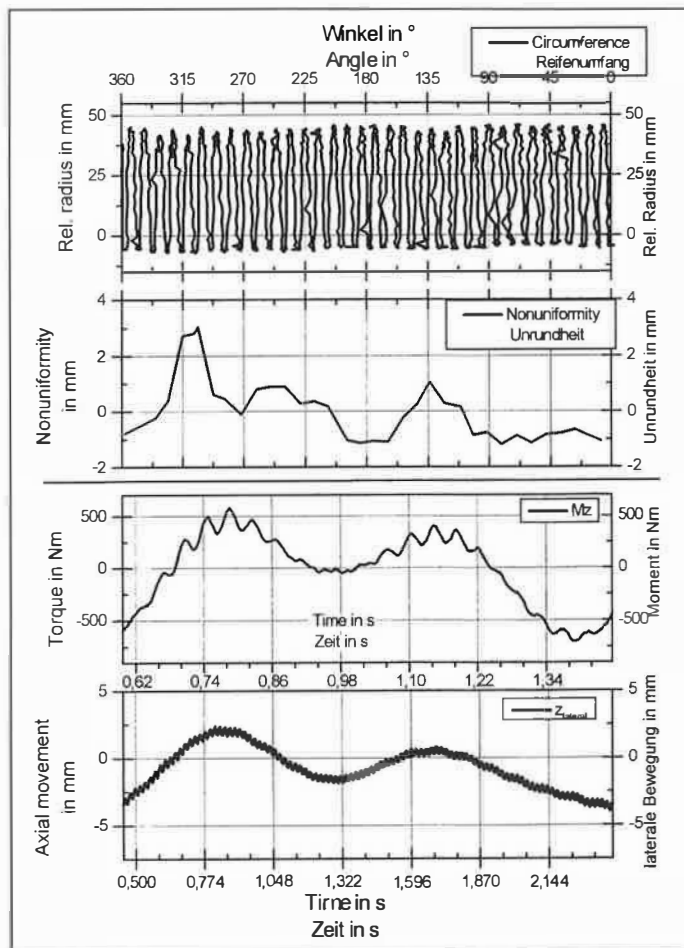
Bild 1: Zusammenhang zwischen Reifenumfang, Unrundheit, Moment um Lenkachse und seitlicher Radbewegung

Fig. 1: Coherence between circumference, non-uniformity, torque around steering axle and axial movement of the tyre

entwickelt, die verschiedene Effekte unterschiedlich gut beschreiben. Wichtige Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen sollen hier beschrieben werden und es werden Anregungen zur Modellierung von AS - Reifen gegeben.

## Der reale AS - Reifen

An kaum ein anderes technisches Produkt werden so komplexe und entgegengesetzte Anforderungen gestellt, wie an den AS - Reifen (geringer Rollwiderstand – gute Traktion, geringer Bodendruck – hohe Tragfähigkeit). Mit dem Trend zu höheren Fahrgeschwindigkeiten ist es jetzt auch notwendig geworden, das dynamische Verhalten solcher großvolumiger Reifen stärker zu berücksichtigen und zu verbessern. Dazu ist die Kenntnis der dynamischen Eigenschaften notwendig. Betrachtet man nur das Schwingverhalten in vertikaler Richtung, so wird schnell deutlich, dass der Reifen nicht als einfaches lineares Feder – Dämpfer System beschrieben werden kann. Federsteifigkeit und Dämpfung hängen unter anderem von Reifeninnendruck, Raddrehzahl, Radlast, Sturz- und Schräglaufwinkel, Reifenbauart und verschiedenen anderen Parametern ab.



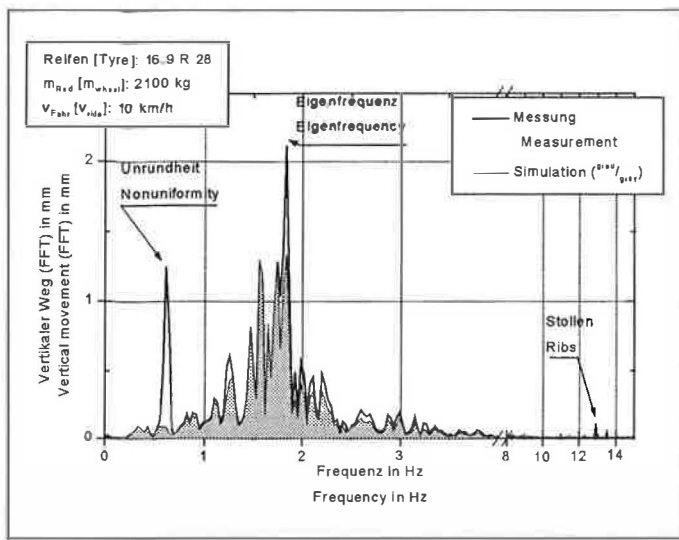


Bild 2: Messung und Simulation von Reifenversuchen (Anregung: Smooth track) zur Validierung eines Reifenmodells

Fig. 2: Measurement and simulation of tyre experiments (excitation: smooth track) for verification of a tyre model

Ein geeignetes numerisches Reifenmodell muss in der Lage sein, dieses Verhalten exakt nachzubilden. Nur dann sind Vorhersagen über das Reifenverhalten bei anderen Randbedingungen zulässig.

Ein weiteres Problem ist die Unrundheit realer Räder. Diese Unrundheiten resultieren aus Fertigungsfehlern der Felge und des Reifens und haben, wie auch die Reifenstollen, entscheidenden Einfluss auf das dynamische Verhalten des AS - Reifens (Bild 1).

Mit einem neu entwickelten Prüfstand ist es möglich, die exakte Reifengeometrie eines AS - Reifens zu vermessen und in einer 3D - CAD Software ein exaktes geometrisches Modell des Reifens zu formulieren. Mittels einfacher Wägung können dann auch die Massenträgheiten sehr einfach und exakt ermittelt werden. Dieses Reifenmodell soll in Zukunft in den Fahrzeugsimulationen Verwendung finden, um dort die Einflüsse der Stollen und der Unrundheiten zu berücksichtigen.

### Simulationsmodelle für AS - Reifen

In kommerzieller Simulationssoftware sind keine speziellen Simulationsmodelle für AS-Reifen vorhanden. Da solche Software bisher hauptsächlich in der PKW-Industrie genutzt wurde, sind die vorhandenen Reifenmodelle primär zur Beschreibung von PKW-Reifen ausgelegt. Bei den Modellen muss grundsätzlich zwischen zwei Typen unterschieden werden:

1. "Kennlinien - Modelle", die den Reifen als eine komplexe Schaltung aus Feder-, Dämpfer- und Reibelementen in verschiedenen Raumrichtungen abbilden. Steifigkeiten, Dämpfungen und Reibeinflüsse werden dann in Form von Kennlinien als Parameter eingegeben. Diese Kennlinien werden in Versuchen ermittelt.
2. "Physikalische - Modelle", die die physikalischen Vorgänge innerhalb des Reifens mit den Methoden der Mechanik beschreiben. Dabei sind vor allem Werkstoff- und Materialparameter sowie Rand- und Zwangsbedingungen entscheidend. Diese Modelle sind nicht als einfache Ersatz-

schaubilder darstellbar, sondern bestehen aus Gleichungssystemen, die das Reifenverhalten mittels der Randbedingungen berechnen.

Der Vorteil der Kennlinien - Modelle ist die kurze Rechenzeit und die gute Anschaulichkeit der mechanischen Zusammenhänge. Ihr Nachteil ist die Abhängigkeit von Messergebnissen. So ist eine Vorhersage des Reifenverhaltens nur in Grenzen über den gemessenen Bereich hinaus möglich. Messfehler, -ungenauigkeiten und Einflüsse des Messverfahrens finden direkt Eingang in das Reifenmodell. Physikalische Reifenmodelle dagegen rechnen häufig wesentlich länger. Ihr Vorteil ist jedoch die bessere Beschreibung des Reifenverhaltens über gemessene Bereiche hinaus. Die Parameter, die zur Modellierung notwendig sind, können in weniger aufwendigen Versuchen ermittelt werden. Es ist jedoch ein komplexes Expertenwissen zur Messung und Berechnung dieser Parameter notwendig. Solche Modelle sind dann aber auch in der Lage Vorgänge zu berechnen, die nur extrem aufwendig gemessen werden können. Ein solches Modell wurde von Böhm [1] und Zachow [2] vorgestellt.

### Simulation mit einem Kennlinien - Modell

Aus den oben genannten Gründen wird im Institut für Landmaschinen und Ölhydraulik der TU-Berlin bei der Fahrdynamiksimulation von Traktoren noch ein Kennlinien - Modell des Reifens verwendet. Hier hat sich folgende Vorgehensweise als günstig erwiesen. Von dem Prüfstand, der zur Ermittlung der vertikaldynamischen Eigenschaften des Reifens verwendet wird, wurde ebenfalls ein Simulationsmodell entwickelt. Dieses wurde mit verschiedenen Versuchen mit Metall - Schraubenfedern validiert. Das Reifenmodell wird in der Simulation mit dem Prüfstand gekoppelt und mit den Kennlinien für Federsteifigkeit und Dämpfung parametrisiert, die aus Ausschwingversuchen gewonnen wurden. In der Simulation wird der Reifen in dem Prüfstand mit einer stochastischen Schwingung (Fahrbahn) angeregt. Die

Simulationsergebnisse werden mit Messergebnissen der gleichen Versuche verglichen. Federsteifigkeit und Dämpfung können jetzt in engen Grenzen variiert werden, bis eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation besteht. Hier werden jedoch die Grenzen des Reifenmodells deutlich.

In Bild 2 sieht man deutlich, dass die Schwingungseinflüsse durch die Unrundheit des Reifens nicht in der Simulation berücksichtigt werden können. Gleiches gilt auch für die Stollen. Da die Unrundheiten um den Reifenumfang nicht wie eine Exzentrizität einen harmonischen Verlauf zeigen, sondern unregelmäßig sind, sind die Impulse, die durch sie verursacht werden stärker, die Schwingungsanregung demzufolge größer. Da der Einfluss der Unrundheit und besonders der Stollen stark von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst wird, können diese in der Simulation auch nicht einfach der Fahrbahnanregung zugeschlagen werden. Bei dieser Vorgehensweise müsste vorher experimentell der Stolleneinfluss ermittelt werden.

### Schlussfolgerung und Ausblick

Nur mit einem guten Reifenmodell kann die Fahrdynamiksimulation im Bereich der Traktoren ihre Vorteile und ihren Nutzen voll zum Einsatz bringen. Die zuvor genannten Probleme können bei Verwendung eines physikalischen Modells gelöst werden. Solch ein Modell ist an der TU - Berlin vorhanden und weitestgehend verifiziert. Es muss in kommenden Arbeiten komplett validiert und verfeinert werden und wird in eine kommerzielle Simulationssoftware eingebunden werden. Neben diesem Modell besteht ein Kennlinien - Modell, das die Einflüsse der Unrundheiten und der Stollen vollständig beschreibt. Beide Modelle sind darüber hinaus in der Lage verschiedene Böden zu berücksichtigen. Um den Rechenzeitnachteil des physikalischen Modells zu kompensieren, ist es denkbar, Kennlinien der Reifendynamik mit diesem Modell mittels Simulation zu bestimmen und mit diesen Kennlinien das schnellere Kennlinien - Modell zu parametrieren. Diese Vorgehensweise stellt höchste Anforderungen an die Güte des physikalischen Modells. An der Optimierung der beiden Modelle und der Implementierung in kommerzielle Simulationssoftware wird in Zukunft an der TU - Berlin verstärkt gearbeitet werden.

### Literatur

- [1] Zachow, D.: Membrane Shell Tyre Modell, 2nd Int. Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis, Berlin, 1997
- [2] Böhm, F.: Reifenmodell für hochfrequente Rollvorgänge, VDI - Fortschrittsberichte, Reihe 12, Nr. 1088, 1993