

Bojan Ferhadbegović, Christian Brinkmann, Stefan Böttinger und Heinz Dieter Kutzbach

Einfluss des Reifeninnendrucks auf das laterale Übertragungsverhalten von landwirtschaftlichen Reifen

Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und Arbeitsbedingungen von Ackerschleppern erfordern sehr unterschiedliche Reifeninnendrücke, die zwischen 0,8 und 2 bar variieren können. Der Reifeninnendruck beeinflusst das Übertragungsverhalten der Reifen in allen drei Raumrichtungen und damit auch das Fahrverhalten. Mit dem Hohenheimer Reifenmodell ist es möglich, das dreidimensionale Übertragungsverhalten der Reifen zu simulieren, wobei der Luftdruckeinfluss in Form verschiedener Reifensteifigkeiten und Reifendämpfungen berücksichtigt wird. Im Folgenden wird der Einfluss des Reifeninnendrucks auf das stationäre und dynamische Seitenkraftverhalten der Reifen bei konstanter Radlast dargestellt und die entsprechenden Parameter für das Hohenheimer Reifenmodell bestimmt.

Schlüsselwörter

Reifen-Luftdruck, Seitenkraft, Reifenmodell, Fahrdynamik, Mehrkörpersimulation

Keywords

Tyre pressure, lateral force, tyre model, driving dynamics, multibody simulation

Abstract

Ferhadbegović, Bojan; Brinkmann, Christian; Böttinger, Stefan and Kutzbach, Heinz Dieter

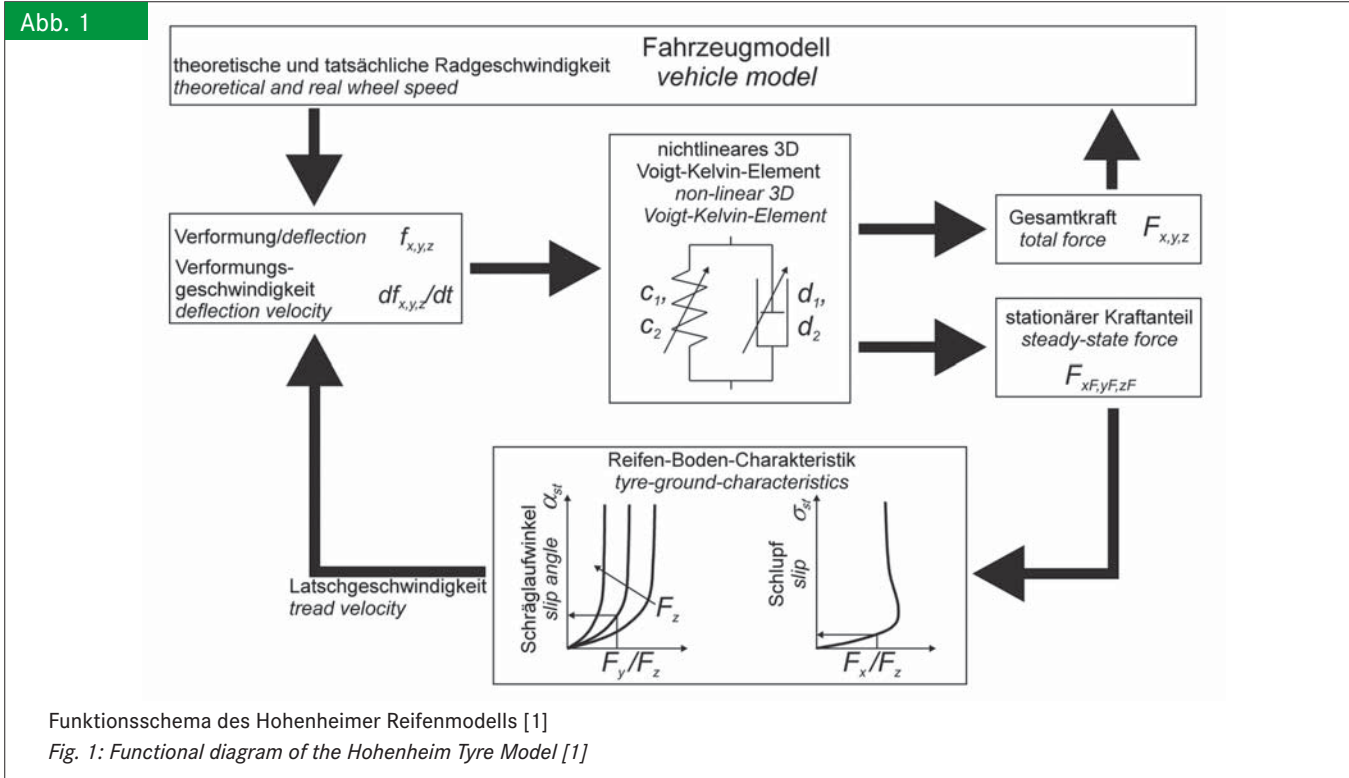
The influence of the tyre pressure on the lateral response characteristic of agricultural tyres

Landtechnik 65 (2010), no. 3, pp. 174-177, 5 figures, 1 table, 4 references

Due to many possible fields of application of agricultural tractors, the agricultural tyres are used with inflation pressures varying between 0.8 bar and 2 bar. However, the inflation pressure has an influence on the transfer behaviour of the tyres in all three dimensions and subsequently on driving dynamics. The Hohenheim Tyre Model enables the calculation of the three-dimensional transfer behaviour

of agricultural tyres, considering the influence of the tyre inflation pressure by using different stiffness and damping coefficients. In this article, the influence of the tyre inflation pressure on the steady state and transient lateral tyre behaviour of agricultural tyres is shown and the corresponding parameters for the Hohenheim Tyre Model are determined.

Das Hohenheimer Reifenmodell besitzt die Fähigkeit, das dynamische Verhalten der großvolumigen landwirtschaftlichen Reifen dreidimensional darzustellen. Damit ist die Grundlage für die Fahrdynamiksimulation von Ackerschleppern gegeben. In den Veröffentlichungen [1; 2] wurden die Reifen bei einem Reifeninnendruck von 1,2 bar untersucht. Der Reifeninnendruck beeinflusst das Reifenverhalten in allen drei Raumrichtungen, was von großer Bedeutung für das Fahrverhalten ist. Über Fahrzeugmessungen ist es jedoch kaum möglich, den Luftdruckeinfluss auf das Übertragungsverhalten in eine bestimmte Raumrichtung zu bestimmen, da sich die Kräfte am Rad gegenseitig stark beeinflussen. Deswegen wurde die Einzelradmesseinrichtung des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim eingesetzt [3]. Mit diesem Prüfstand ist es möglich, anders als bei Untersuchungen am Fahrzeug, die Seitenkräfte bei konstanter Radlast zu messen und damit den Einfluss von Radlastschwankungen auszuschließen.



Seitenkraftberechnung im Hohenheimer Reifenmodell

Im Hohenheimer Reifenmodell werden die Kräfte in allen drei Raumrichtung mittels nichtlinearer Voigt-Kelvin-Elemente berechnet (**Abbildung 1**).

Die entsprechende Gleichung für die Berechnung der Seitenkraft lautet:

$$F_y(t) = c_{1y} \cdot f_y(t)^{c_{2y}} + d_y \cdot \frac{d}{dt} f_y(t) \quad (\text{Gl. 1})$$

wobei gilt:

c_{1y} und c_{2y} = laterale Steifigkeitskoeffizienten

d_y = lateraler Dämpfungskoeffizient

f_y = laterale Reifenverformung

Nach [1] berechnet sich die laterale Verformung für den Zustand reiner Seitenkraft wie folgt:

$$f_y(t) = \int [-v_y(t) - |v_x(t)| \cdot \tan(\alpha_{st}(\mu_y(t)))] dt \quad (\text{Gl. 2})$$

wobei gilt:

v_y = laterale Geschwindigkeit der Radnabe

v_x = longitudinale Geschwindigkeit der Radnabe

α_{st} = stationärer Schräglaufwinkel als Funktion der Seitenkraft

μ_y = Seitenkraftbeiwert

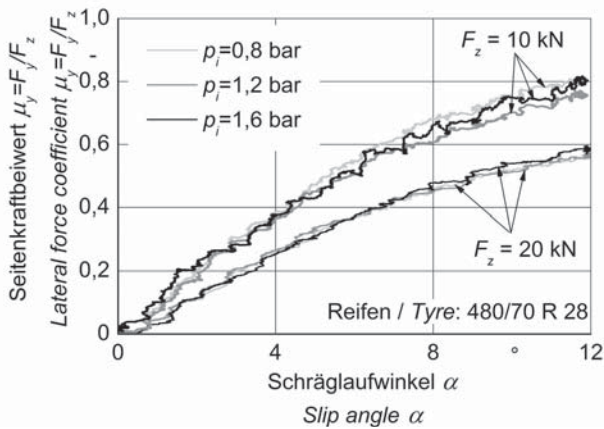
Die Steifigkeitskoeffizienten c_{1y} und c_{2y} sind abhängig vom Reifeninnendruck und können mit der Einzelradmesseinrichtung ermittelt werden. Aufgrund der prüfstandbedingt zu niedrigen

maximalen Verformungsgeschwindigkeit des Reifens kann der Dämpfungskoeffizient d_y mit der Einzelradmesseinrichtung nicht gemessen werden. Daher wurde ein geschätzter Wert von $d_y = 2700 \text{ Ns/m}$ verwendet, der sich an der vertikalen Reifendämpfung orientiert. Der Zusammenhang zwischen der Seitenkraft und dem Schräglaufwinkel ist durch α_{st} dargestellt und kann mit der Einzelradmesseinrichtung ermittelt werden.

Einfluss der Radlast und des Reifeninnendrucks auf die stationäre Seitenkraft

Die stationäre Seitenkraft, die von einem Reifen übertragen werden kann, spielt eine wichtige Rolle bei der Fahrdynamik. Sie bestimmt die Schräglaufwinkel an den jeweiligen Rädern und dadurch den Schwimmwinkel und die Gierrate des gesamten Fahrzeugs. Üblicherweise wird für die Berechnung der Seitenkräfte der stationäre Seitenkraftbeiwert eingesetzt. **Abbildung 2** und **3** zeigen die Verläufe des Seitenkraftbeiwerts μ_y aus **Gleichung 2** bei einer Schräglaufwinkelgeschwindigkeit von $0,3^\circ/\text{s}$, die als quasistationär betrachtet wird. Die Fahrgeschwindigkeit der Einzelradmesseinrichtung betrug bei allen im Folgenden gezeigten Diagrammen 2 km/h . Bei den beiden hier dargestellten Reifengrößen konnte auf fester Fahrbahn kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Reifeninnendruck und dem Verlauf der quasistationären Seitenkraftbeiwerte festgestellt werden, wie bereits von Schlotter beobachtet [4]. Der Seitenkraftbeiwert sinkt mit zunehmender stationärer Radlast. Dieser Zusammenhang ist im Hohenheimer Reifenmodell in Form eines Kennfelds berücksichtigt, wobei zwischen den beiden Kennlinien für 10 und 20 kN linear interpoliert und darüber hinaus bis 40 kN extrapoliert wird [1].

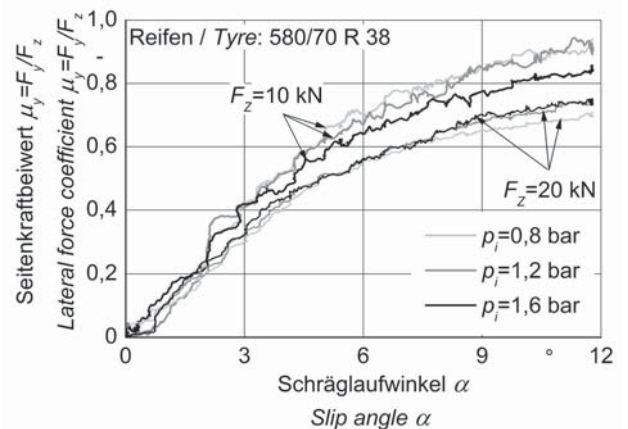
Abb. 2



Quasistationärer Verlauf des Seitenkraftbeiwerts bei verschiedenen stationären Radlasten F_z und Reifeninnendrücken p_i eines 480/70 R 28 Reifens auf Asphalt

Fig. 2: Quasi steady-state lateral force coefficient at different stationary loads and tyre pressures for a 480/70 R 28 tyre on asphalt

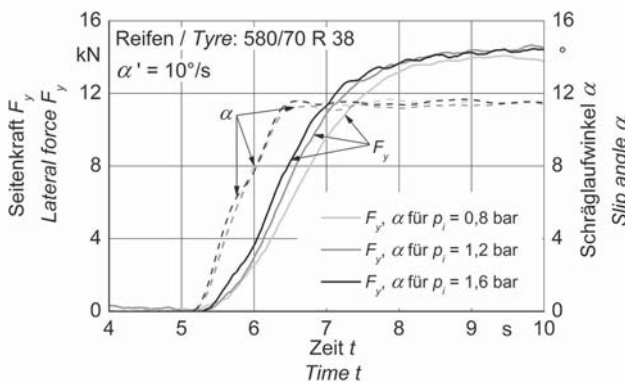
Abb. 3



Quasistationärer Verlauf des Seitenkraftbeiwerts bei verschiedenen stationären Radlasten F_z und Reifeninnendrücken p_i eines 580/70 R 38 Reifens auf Asphalt

Fig. 3: Quasi steady-state lateral force coefficient at different stationary loads and tyre pressures for a 580/70 R 38 tyre on asphalt

Abb. 4



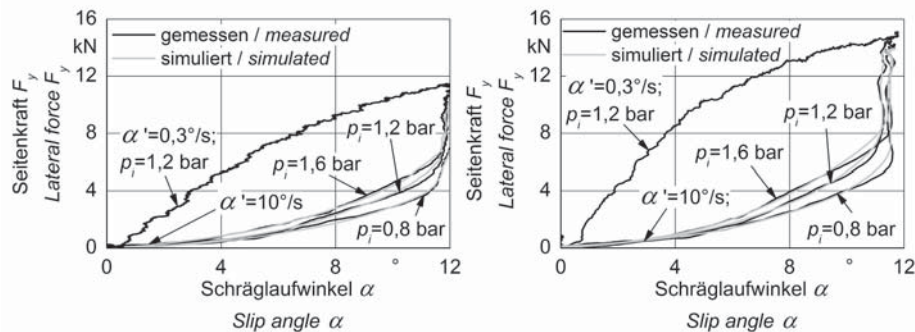
Gemessene Schräglaufwinkel und die dazugehörigen Seitenkraftverläufe für einen 580/70 R 38 Reifen bei verschiedenen Reifeninnendrücken und einer stationären Radlast von 20 kN

Fig. 4: Measured slip angle and the corresponding lateral forces for a 580/70 R 38 tyre at different tyre pressures and a stationary wheel load of 20 kN

Einfluss der dynamischen Schräglaufwinkeländerung auf die Seitenkraft bei diversen Reifeninnendrücken

Wird jedoch der Schräglaufwinkel bei konstanter Radlast dynamisch verändert, ergeben sich deutliche Unterschiede im Seitenkraftverlauf abhängig vom Reifeninnendruck (**Abbildung 4**). Dabei wurde der Schräglaufwinkel mit $10^\circ/\text{s}$ bis zu einem Maximalwert von 12° gestellt. Nach **Abbildung 1** bzw. **Gleichung 2** entstehen die Reifenkräfte durch die Verformung des Reifens, wobei der Maximalwert der dabei entstehenden Reifenkraft durch die stationäre Kennlinie gegeben ist. Mit zunehmendem Reifeninnendruck steigt die laterale Steifigkeit, was zu geringeren Verformungen und einem schnelleren Kraftaufbau führt (**Abbildung 5**). Werden die Kräfte über dem Schräglaufwinkel dargestellt, wird die Abweichung der dynamischen Kräfte von den jeweiligen stationären Kennlinien deutlich. Auch kann beobachtet werden, dass für Schräglaufwinkel bis etwa 5° die Unterschiede in den dynamischen Kräften gering sind. In **Abbil-**

Abb. 5



Gemessene und simulierte Seitenkraftverläufe eines 480/70 R 28 Reifens (links) und eines 580/70 R 38 Reifens (rechts) bei unterschiedlichen Reifeninnendrücken, Schräglaufwinkelgeschwindigkeiten ($0,3^\circ/\text{s}$ sowie $10^\circ/\text{s}$) und einer konstanten Radlast von 20 kN auf Asphalt

Fig. 5: Measured and simulated lateral forces on a 480/70 R 28 tyre (left) and a 580/70 R 38 tyre (right) under different tyre pressures, slip angle rates ($0,3^\circ/\text{s}$ sowie $10^\circ/\text{s}$) and a constant vertical load of 20 kN on asphalt

Tab. 1

Steifigkeitskoeffizienten in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck
 Table 1: Stiffness coefficients as a function of tyre pressure

Reifen- innendruck Tyre pressure [bar]	Reifen/Tyre 580/70 R 38		Reifen/Tyre 480/70 R 28	
	c_{1y} [N/m]	c_{2y}	c_{1y} [N/m]	c_{2y}
0,8	80 000	1,15	70 000	1,17
1,2	100 000	1,11	85 000	1,12
1,6	120 000	1,11	105 000	1,12

ung 5 sind neben den gemessenen Kräften auch Berechnungsergebnisse des Hohenheimer Reifenmodells dargestellt. Dabei wurden die in **Tabelle 1** angegebenen Parameter verwendet.

Schlussfolgerungen

Der Reifeninnendruck hat einen starken Einfluss auf das Übertragungsverhalten von Reifen. Dieser Einfluss auf die lateralen Übertragungseigenschaften wurde an der Einzelradmesseinrichtung bei Vorgabe einer konstanten Radlast untersucht. Es konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Reifeinnendruck und den stationären Seitenkraftbeiwerten ermittelt werden, was bisherige Forschungsergebnisse bestätigt. Daraus lässt sich schließen: Das veränderte Fahrverhalten von Ackerschleppern bei Änderung des Reifeninnendrucks hängt

hauptsächlich mit der lateralen Reifensteifigkeit zusammen. Diese Reifensteifigkeit steigt mit zunehmendem Reifeninnendruck und kann mit dem Hohenheimer Reifenmodell quantifiziert werden. Weiterhin gibt das Hohenheimer Reifenmodell das laterale Übertragungsverhalten sehr gut wieder und ist daher gut für den Einsatz in der Fahrdynamiksimulation geeignet.

Literatur

- [1] Ferhadbegović, B.: Entwicklung und Applikation eines instationären Reifenmodells zur Fahrdynamiksimulation von Ackerschleppern. Dissertation. Universität Stuttgart, 2009. Shaker Verlag, Aachen, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG, Nr. 475
- [2] Ferhadbegović, B.; C. Brinkmann, H. D. Kutzbach und S. Böttinger: Hohenheimer Reifenmodell – ein dynamisches dreidimensionales Modell für Fahrdynamiksimulation. Agrartechnische Forschung 13 (2007), H. 1, S. 1-14
- [3] Armbruster, K.: Untersuchung der Kräfte an schrägläufigen angetriebenen Ackerschlepperrädern. Dissertation. Universität Stuttgart, 1991. VDI Verlag Düsseldorf, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 53
- [4] Schlotter, V.: Einfluss dynamischer Radlastschwankungen und Schräglaufwinkeländerungen auf die horizontale Kraftübertragung von Ackerschlepperreifen. Dissertation. Universität Stuttgart, 2006. Shaker Verlag, Aachen, Forschungsbericht Agrartechnik VDI-MEG, Nr. 437

Autoren

Dr.-Ing. Bojan Ferhadbegović ist Mitarbeiter im Zentralbereich Forschung und Voraentwicklung der Firma Robert Bosch GmbH, Postfach 30 02 40, 70442 Stuttgart, E-Mail: bojan.ferhadbegovic@de.bosch.com

Dipl.-Ing. Christian Brinkmann ist Mitarbeiter in der Entwicklung XERION der CLAAS Selbstfahrende Erntemaschinen GmbH, Münsterstraße 33, 33428 Harsewinkel, E-Mail: christian.brinkmann@claas.com

Beide Autoren waren wissenschaftliche Mitarbeiter im Fachgebiet „Grundlagen der Agrartechnik“ am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim. **Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger** ist als Nachfolger von **Prof. Dr.-Ing. Heinz Dieter Kutzbach** Leiter dieses Fachgebietes.