

Reifendynamik bei Wasserbefüllung

Die Reifen von Traktoren und selbstfahrenden Erntemaschinen beeinflussen Fahrsicherheit und Fahrkomfort nachhaltig. In der landwirtschaftlichen Praxis werden die Reifen zur Erhöhung der Radlast häufig mit Wasser befüllt, wodurch eine Veränderung der dynamischen Eigenschaften zu erwarten ist. In Hohenheim wurde das dynamische Verhalten wasserbefüllter Traktorreifen in vertikaler Richtung untersucht und eine Erhöhung der Federsteifigkeit festgestellt. Die Verringerung des federnen Luftvolumens im Reifen führt zudem zu einer Vergrößerung der Eigenfrequenz und damit zu einer Erhöhung der kritischen Geschwindigkeit.

Dipl.-Ing. sc. agr. Björn Bernhard und Dipl.-Ing. Volkmar Schlotter sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Lehrstuhl Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion mit Grundlagen der Landtechnik des Instituts für Agrartechnik (Leiter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H. D. Kutzbach), Universität Hohenheim, Garbenstr. 9, 70599 Stuttgart.
e-mail: bernhard@uni-hohenheim.de

Schlüsselwörter

Reifendynamik, Federungs- und Dämpfungseigenschaften, wasserbefüllte Reifen, Resonanzfrequenz

Keywords

Tyre dynamics, longitudinal spring and damping characteristics, water-filled tyres, resonance frequency

Literaturhinweise sind unter LT 01102 über Internet <http://www.landwirtschaftsverlag.com/landtech/local/fliteratur.htm> abrufbar.

Zur Erhöhung der Radlast werden die Traktorreifen in der Praxis häufig mit Wasser befüllt. Dadurch wird die Übertragung größerer Triebkräfte ermöglicht. Vorteile gegenüber der Ballastierung mit Gewichten sind die geringere Achslast und die Kosteneinsparung. Andererseits lässt die Wasserbefüllung veränderte Reifeneigenschaften erwarten. Das dynamische Verhalten bei Wasserbefüllung wurde bislang kaum untersucht und ist weitgehend unbekannt.

Grundlagen

Mehrfach wurde das Schwingungsverhalten von Traktorreifen in Vertikal- und Längsrichtung untersucht und die Vorhersage des zu erwartenden Federungs- und Dämpfungsverhaltens durch Modelle ermöglicht. Basierend auf den Untersuchungen von [1 und 2] wurde in Hohenheim ein nicht-lineares Reifenmodell entwickelt.

Für das Federungs- und Dämpfungsverhalten in Vertikalrichtung wird das Voigt-Kelvin-Modell verwendet:

$$F_R = F_C + F_D \quad (1)$$

Die Federkraft F_C weist ein nicht-lineares Verhalten auf, welches durch eine Potenzfunktion dargestellt werden kann:

$$F_C = c_1 \cdot s^{c_2} \quad (2)$$

Für die Dämpfungskraft F_D gilt in Abhängigkeit von der Einfederungsgeschwindigkeit:

$$F_D = d_v \cdot \dot{s} \quad (3)$$

Aus den in Versuchen gewonnenen Daten können die nicht-linearen Parameter c_1 , c_2 und d_v ermittelt werden.

Bandlaufprüfstand

Bei dem für die Untersuchungen verwendeten Bandlaufprüfstand der Universität Hohenheim (Bild 1) rollt der Reifen auf einem 60 cm breiten Stahlband, welches zur Simulation einer Fahrbahnoberfläche mit Schleifpapier von vierziger Körnung beklebt ist. Das Stahlband wird von einem Gleichstrom-

Elektromotor angetrieben, die Fahrgeschwindigkeit kann von 0 bis 62 km/h stufenlos variiert werden.

Unter der Kontaktfläche von Laufband und Reifen befindet sich eine teflonbeschichtete Stahlplatte. Unter dieser sind drei Kraftmessdosen (1, 2, 3) zur Ermittlung der vertikalen Radkraft F_V angeordnet. Das Rad selbst wird in einer Schwinde geführt, die in der Aufstandsebene in zwei Lastmessbolzen (4, 5) gelagert ist. Über diese lassen sich die auftretenden Längskräfte F_L bestimmen. Für höhere Radlasten wird die Schwinde mit Stahlgewichten ballastiert. Weiterhin werden die Bandgeschwindigkeit (6), die Radgeschwindigkeit (7), der Drehwinkel (8) und der Rollradius (9) des Rades ermittelt.

Messverfahren

Es wurden drei Versuchsreihen unter Variation von Reifeninnendruck, Radlast, Fahrgeschwindigkeit und Wasserfüllstand durchgeführt. Bei der Variation des Füllstandes wurden die Herstellerangaben zur maximalen Füllmenge beachtet und die Radlast entsprechend angepasst, so dass die Vertikalkraft in der Aufstandsfläche konstant blieb. Während der Rollversuche rollte der Reifen mit einer Geschwindigkeit von 1 km/h auf dem Laufband. In Ausschwingversuchen wurde der Reifen angehoben und fallengelassen, so dass der Reifen frei auf dem laufenden Band ausschwingen konnte. Bei den Resonanzfrequenzversuchen durchlief der Reifen das Geschwindigkeitsspektrum. Anhand der Schwankungen der Vertikalkraft und des Rollradius konnten die Resonanzfrequenz und die kritische Geschwindigkeit ermittelt werden.

Messergebnisse

Die Rollversuche dienten zur Feststellung der Unrundheit des Reifens. Sie hat erheblichen negativen Einfluss auf das Fahrverhalten vor allem bei höherer Geschwindigkeit.

Tab. 1: Resonanzfrequenzen in Abhängigkeit von Radlast und Füllstand

Table 1: Resonance frequencies depending on tyre load and filling level

Radlast in kg	ohne	Resonanzfrequenz in Hz	
		halbe Wasserbefüllung	maximale
1000	2,46	2,70	2,65
1500	2,05	2,16	2,20
2000	1,52	1,92	1,93
2500	1,52	1,60	1,72

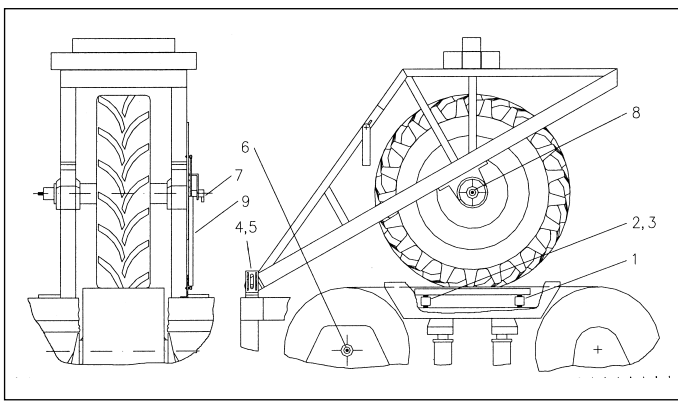


Bild 1: Bandlaufprüfstand

Fig. 1: Flat-belt tyre test stand

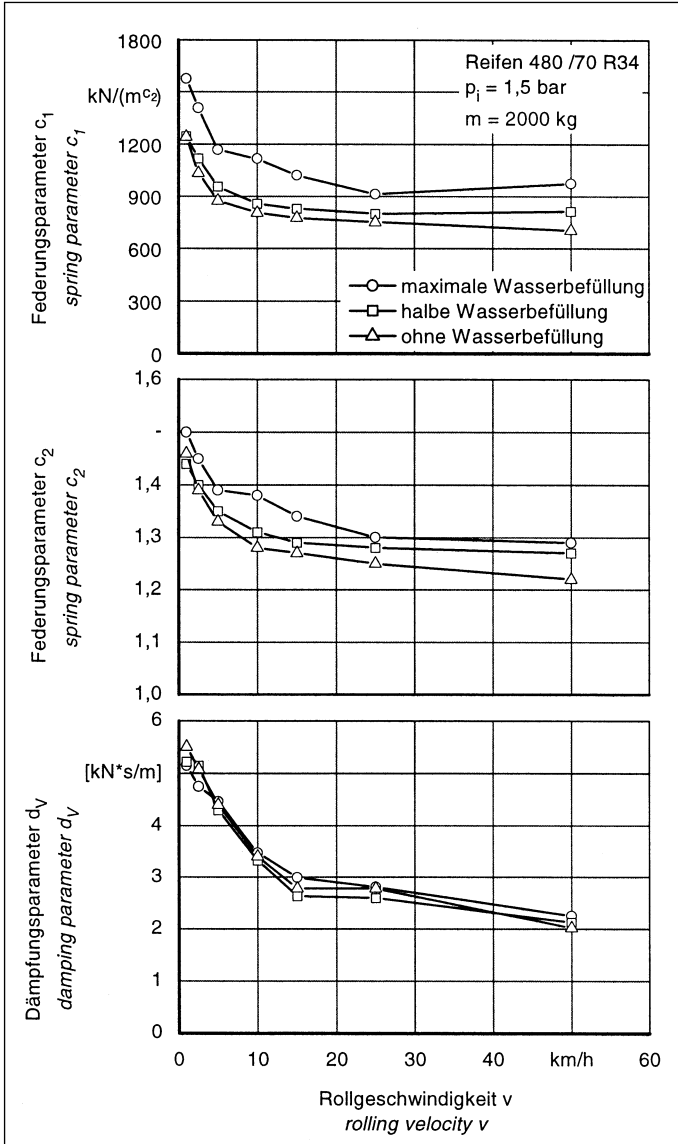


Bild 2: Auswirkungen der Wasserbefüllung auf die Reifenparameter

Fig. 2: Impact of the water ballast on the tyre parameters

Mit zunehmender Wasserfüllung ergab sich eine Abnahme der Schwankungen erster sowie zweiter Ordnung von Rollradius und Vertikalkraft. Der Rollradius erhöht sich mit steigender Befüllung bei konstanter Radlast. Beides lässt sich durch die Massenträgheit des im Reifen verdrängten Wassers erklären.

Ziel der Ausschwingversuche war es, c_1 , c_2 und d_v festzustellen. Die Ausschwingversuche weisen eine starke Abhängigkeit der Fe-

derungs- und Dämpfungsparameter von der Geschwindigkeit auf (Bild 2). Sowohl die Federung als auch die Dämpfung sinken mit steigender Rollgeschwindigkeit. Sämtliche Parameter fallen bis 15 km/h stark ab und sind für größere Geschwindigkeiten nahezu konstant.

Die Abnahme der Federsteifigkeit und des Dämpfungsvermögens für Geschwindigkeiten bis 15 km/h lässt sich durch das Verhalten polymerer Werkstoffe erklären. Dieses Verhalten führt dazu, dass die in der Kontaktfläche zur Fahrbahn befindlichen Bereiche des Reifenmantels bei einem Anstieg der Fahrgeschwindigkeit immer weniger Zeit haben zu kriechen und sich dadurch zu verhärten. Dieser Einfluss der Geschwindigkeit scheint unabhängig von Radlast und Wasserbefüllung

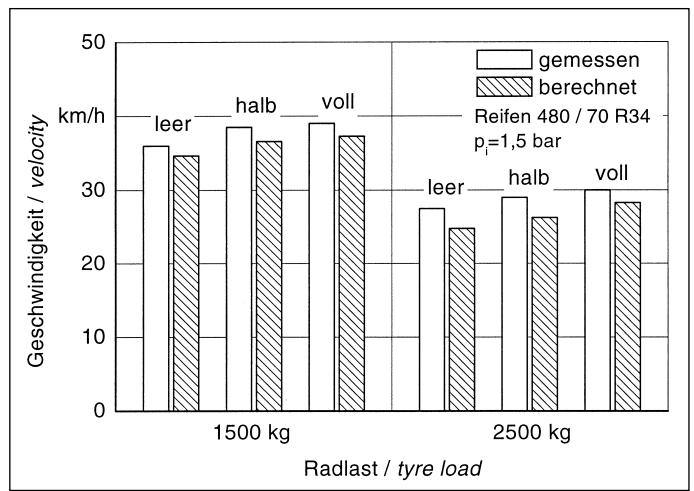


Bild 3: Veränderung bei kritischer Geschwindigkeit und Füllständen

Fig. 3: Variation of the critical velocity for different filling levels

derung stark abhängig von der Reifenfüllung. Die deutliche Verhärtung des Reifens erklärt sich auch hier durch die Masse des verdrängten Wassers im Reifen. Zusätzlich ist bei gefülltem Reifen das federungswirksame Luftvolumen kleiner, was zu einer weiteren Verhärtung führt.

Für die Resonanzfrequenzversuche wurden mit Hilfe einer Fouriertransformation die Eigenfrequenzen des Reifens berechnet (Tab. 1). Die Anregung wird durch die Unrundheit des rollenden Reifens hervorgerufen. In Tabelle 1 sind lediglich die Eigenfrequenzen erster Ordnung dargestellt, die Schwingungen höherer Ordnung und die Stollenanregung werden vernachlässigt.

Als Ergebnis zeigt sich eine Abnahme der Resonanzfrequenz mit zunehmender Radlast. Die Wasserbefüllung des Reifens erhöht die Resonanzfrequenz. Sind die Eigenfrequenz f und der momentane Rollradius r des Reifens bekannt, kann die kritische Geschwindigkeit v_{krit} berechnet werden:

$$v_{\text{krit}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r \quad (4)$$

In Bild 3 sind die gemessenen und die nach Gleichung 4 berechneten Ergebnisse für die kritische Geschwindigkeit dargestellt. Beide zeigen für die Wasserbefüllung eine Verschiebung zu höheren kritischen Geschwindigkeiten. Auffällig ist, dass die berechneten Geschwindigkeiten rund 1 bis 3 km/h unter den gemessenen liegen. Da die Geschwindigkeit während der Versuche stetig gesteigert wurde, lässt diese Differenz auf die Nacheilung der Geschwindigkeit schließen.

Ausblick

Um die Bedeutung der ermittelten Ergebnisse für die landtechnische Praxis zu erhöhen, sollte in weiteren Arbeiten auch das dynamische Verhalten bei Wasserbefüllung in Längs- und in Querrichtung bewertet werden. Durch die hohen rotatorischen Massen ist es zudem erforderlich, die dynamische Achsbelastung bei Wasserbefüllung sowie den Leistungsbedarf beim Beschleunigen und Bremsen zu ermitteln.