

Claus Sommer, Klaus Walter und Matthias Lebert, Braunschweig  
sowie Lech Jaklinski und Bogdan Jasinski, Plock/Polen

# Effiziente und bodenschonende Triebkraftübertragung vom Reifen zum Boden

*Im Ackerbau werden hohe Anforderungen an den Zugkraftbedarf gestellt, denen der leistungsstarke Traktor gerecht wird. Die hohen Triebkräfte auf den Boden zu übertragen, ist mit höherer Bodenbelastung verbunden. Diese kann je nach Bodenzustand zu Schadverdichtung führen. Ihr vorzubeugen, liegt im Interesse einer nachhaltigen Landbewirtschaftung; sie ist nach § 17 Bundesbodenschutzgesetz so weit wie möglich zu vermeiden. Teil einer Minimierungsstrategie sind Breitreifen. Mit einer Einzelradmessvorrichtung werden Reifen auf ihre Triebkraftübertragung untersucht und ein mathematisches Modell nach [7] zur Abschätzung des Bodendrucks beim Überfahren einbezogen.*

Dir. und Prof. PD Dr.-Ing. Claus Sommer ist Leiter, Dipl.-Ing. agr. Klaus Walter und Dr. Matthias Lebert sind wissenschaftliche Mitarbeiter des Instituts für Betriebstechnik und Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, e-mail: [claus.sommer@fal.de](mailto:claus.sommer@fal.de)

Dr. Lech Jaklinski ist Wissenschaftler, Dr. Bogdan Jasinski wissenschaftlicher Abteilungsleiter im Institute of Mechanical Engineering of Warsaw University of Technology, Plock/Polen

## Schlüsselwörter

Triebkraft, Bodendruck, Bodenschadverdichtung

## Keywords

Driving power, soil pressure, soil compaction

Mit steigendem Zugkraftbedarf in der pflanzlichen Produktion nimmt die Radlast von Traktoren – zwar nur degressiv – zu, erreicht jedoch in der Leistungsklasse von 200 kW bis zu 5 t [1]. Zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtung werden meist großvolumige Breit- und Terrareifen eingesetzt, die mit sehr niedrigem Reifeninnendruck gefahren werden können. Bei gleicher Radlast führen solche breiten Reifen zu geringerem mittleren Kontaktflächendruck (Quotient aus Radlast und Reifenaufstandsfläche, kPa).

Nach In-Kraft-Treten des Bundesbodenschutzgesetzes rückt auch der Bodengefügeschutz in den Mittelpunkt des Interesses [2]. Vor diesem Hintergrund wird untersucht, welche Ansätze zur Optimierung der Kraft- und Leistungsübertragung am Reifen gleichzeitig auch zur Bodenschonung beitragen können.

## Lösungsansatz und Untersuchungen

Ein von Sommer [3] vorgeschlagenes Konzept für „Bodenschonendes Befahren“ besteht aus vier Bausteinen: neben (1) der Verbesserung der Belastbarkeit des Bodens, (2) der Weiterentwicklung technischer Möglichkeiten und (3) der Anpassung von Arbeitsverfahren, schließlich (4) die Begrenzung der mechanischen Belastung insbesondere bei verdichtungsempfindlichem Bodenzustand.

Zur Realisierung von (4) gibt es derzeit Vorschläge für generelle Grenzwerte. Mit Modellen und über einen Belastungsquotienten [4] gelingt es, die potenzielle Verdichtungsgefährdung im Feuchtebereich der Feldkapazität abzuschätzen, und eine

Schwachstellenanalyse für den Betrieb durchzuführen, um dem Betriebsleiter mittel- bis langfristige Entscheidungshilfen (etwa bezüglich der Anschaffung von Breitreifen) zu geben.

Diese Modelle können jedoch die wechselnde aktuelle Bodenfeuchte, deren Bedeutung für das Problem Bodenschadverdichtung ganz maßgebend ist, bisher nicht berücksichtigen. Es bedarf deshalb zusätzlicher In-situ-Entscheidungshilfen für den Fahrer hinsichtlich der aktuellen Befahrbarkeit des Bodens. Ein erster Schritt war der Vorschlag für einen Laser-Sensor zur Spurtiefenmessung am Rübenroder [5]. Eine eigene Weiterentwicklung richtet sich auf die Online-Nutzbarmachung der Druckausbreitung im Boden während des Befahrens.

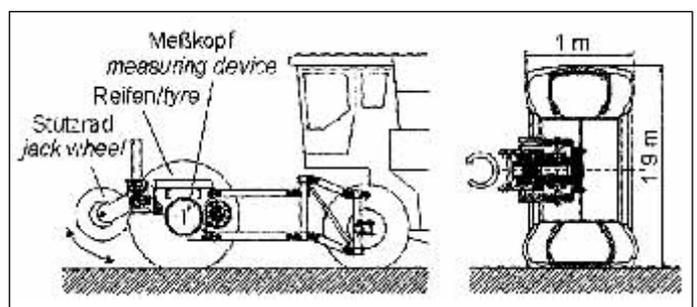
Ausgehend von der originären Aufgabe des Traktorreifens, Triebkraft zu übertragen, werden vier verschiedene Reifen mit einer neuen Einzelradmessvorrichtung nach Steinkampf [6] (Bild 1) bis 6 t Radlast hinsichtlich ihrer Traktionseigenschaften untersucht. Zur Berechnung der Druckverteilung in der Kontaktfläche Reifen-Boden und der Druckausbreitung im Boden über die Tiefe wurde ein Modell von Jaklinski [7] einbezogen.

In dieses Modell gehen als Parameter ein: die Radlast  $G$ , die Triebkraft  $T$ , die Kontaktfläche  $F$ , die Spurtiefe  $z_0$ , der Reifendurchmesser  $D$  und die Reifenabplattung  $e$  (Bild 2). Die Parameter Radlast und Triebkraft werden mit der Einzelradmessvorrichtung ermittelt.

Mit dem Modell können Normalspannung  $\sigma$  und Scherspannung  $\tau$  in der Kontaktfläche berechnet werden. Die Winkel  $\alpha_0$ ,  $\beta_0$  und  $\gamma_0$  beschreiben die Form der Kontaktfläche

Bild 1: Einzelradmessvorrichtung für Radlasten bis 6 t

Fig. 1: Single wheel testing device with wheel loads <6 t



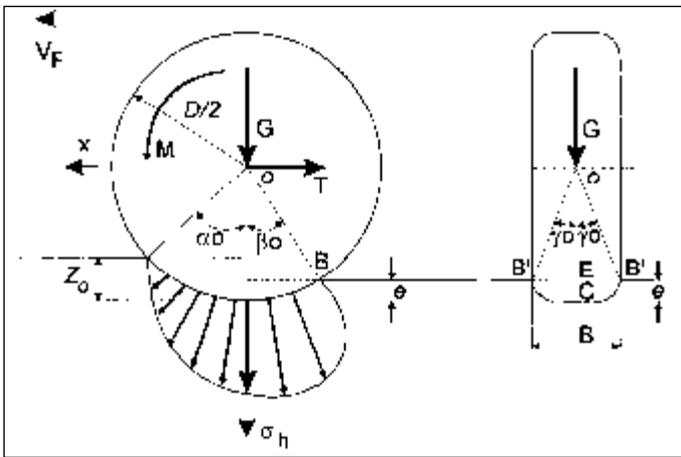


Bild 2: Schematische Darstellung der in das Modell nach Jaklinski eingehenden Parameter sowie des Verlaufs des vertikalen Bodendrucks in der z-Ebene

Fig. 2: Schematic view of the parameters in the Jaklinski model and the depth function of soil pressure  $\sigma_h$ .

Reifen-Boden. Der Koeffizient  $k_4$  ist ein Parameter des Modells zur Beschreibung der Reifenverformung in Kombination mit Bodeneigenschaften.

Aufbauend auf der Druckverteilung in der Kontaktfläche Reifen-Boden wird mit dem Modell auf der Grundlage der Theorie nach Boussinesq in der Modifikation nach Olsen [8] die Tiefenausbreitung des vertikalen Druckes  $\sigma(h)$  im Boden berechnet nach

$$\sigma(z) = \frac{1}{1} \left( \frac{z}{z_0} \right)^{-1} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2}}$$

Auf gepflügtem Boden oder Stoppelacker eines lehmigen Sandbodens in Braunschweig wurden mit den Radlasten  $G_1 = 3,9$  t und  $G_2 = 5,9$  t Versuche durchgeführt, in deren Rahmen einerseits die Triebkraft-Schlupf-Kurven der vier Reifen aufgenommen sowie für den Breitreifen des nach dem Modell Jaklinski berechneten und gleichzeitig mit vier Schlauchsonden (Wiederholungen) nach Bolling gemessenen Bodendruckes verglichen wurde.

### Ergebnisse

In Bild 3 sind die Triebkraftbeiwert-Schlupf-Kurven für den Standardreifen und den Terrareifen aufgetragen.

Die insgesamt verwendeten vier Reifen unterscheiden sich hinsichtlich der mittleren Triebkraftbeiwerte bei einem Schlupf von 15% deutlich: Pflegereifen  $\kappa = 0,22$ , Standardreifen (Bild 3)  $\kappa = 0,46$ , Breitreifen  $\kappa = 0,52$  und Terrareifen (Bild 3)  $\kappa = 0,58$ . Beim Einsatz auf gepflügtem Boden ergab sich durch Reifeninnendruckabsenkung von 2,24 auf 1,08 bar eine  $\kappa$ -Verbesserung, am Beispiel des Standardreifens bei 15% Schlupf von 0,4 auf 0,5. Der mittlere Kontaktflächendruck, kPa, nahm unter den Versuchsbedingungen bei 4 t Radlast in folgender Reihenfolge ab: Pflegereifen 3,0 → Standardreifen 1,2 → Breitreifen 1,0 → Terrareifen 0,8.

Der vertikale Bodendruck in z-Ebene (Bild 2), wie er mit dem Modell Jaklinski bei einem Einsatz des Breitreifens für die Tiefe 20 cm berechnet wurde, geht aus Tabelle 1 hervor. Zum Vergleich ist der mit Bolling-

Sonden gemessene Bodendruck aufgeführt. Es ist zu erkennen, dass bei gleicher Bereifung eine Radlasterhöhung von 51% (von 3,9 auf 5,9 t) mit einer Bodendruckzunahme in 20 cm Tiefe von 55% (berechnet) und 36,4% (gemessen) verbunden ist. Beim Vergleich ist zu berücksichtigen, dass die Berechnungen nach Jaklinski einen vertikal gerichteten Druck und die Sondenmessungen einen ungerichteten Durchschnittsdruck angeben. Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung der Verwendung von Breitreifen bei entsprechender Radlasterhöhung.

### Fazit

Im Vergleich zu Standardreifen verbessern breitere Reifen moderner Bauart die Effizienz der Kraft- und Leistungsübertragung am Traktor (nach den dargestellten Ergebnissen liegen die  $\kappa$ -Werte um bis zu 25% höher) und tragen (bei gleicher Radlast!) zur Bodenschonung aufgrund ihres geringeren Kontaktflächendrucks bei. Sie können unter bestimmten Bedingungen bei sehr niedrigem Reifeninnendruck gefahren werden und lassen dadurch den Bodendruck mindern. Andererseits beanspruchen sie ein größeres Bodenvolumen, und damit reichen höhere Radlasten tiefer in den Boden hinein.

Um bei verdichtungsempfindlichem Bodenzustand die Gefahr von Bodenschadverdichtung insbesondere im Unterboden zu reduzieren, erscheint es nach den Testmessungen (Standardabweichung zwischen 'gemessen' und 'berechnet' zwischen 2,4 und 10,3) aussichtsreich, den aktuellen Bodendruck über den Bordcomputer online zur Anzeige zu bringen, um dem Fahrer Entscheidungshilfen für das Befahren von Ackerflächen zu geben. Weitere Forschungsarbeit ist erforderlich, um die Sensortechnik zur Ermittlung der benötigten Parameter zu verbessern. In diese laufenden Untersuchungen ist auch die Entwicklung eines Befahrbarkeitssensors einbezogen.

### Literatur

- [1] Weißbach, M. und K. Winter: Bodenbelastung und Zugkraftübertragung. RKL-Schrift 2.1.2.1, 1996

Tab. 1: Vergleich der nach dem Modell Jaklinski errechneten und mit Bolling-Sonden gemessenen Bodendruckwerten in 20 cm Bodentiefe

Table 1: Comparing calculated (Jaklinski-model) and measured soil pressure at 20 cm depth

Radlast	Bodendruck in 20 cm Tiefe Berechnung	Bodendruck in 20 cm Tiefe Messung
$G_1 = 3,9$ t	96,3 kPa	98,6 ± 9,6 kPa
$G_2 = 5,9$ t	150,0 kPa	134,5 ± 8,6 kPa

- [2] Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen: Umweltgutachten 2000. Schritte ins nächste Jahrtausend. Wiesbaden, 2000
- [3] Sommer, C.: Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Bodenschutz (1998), H. 1, S. 12-16
- [4] Eckert, H., G. Breitschuh und D. Sauerbeck: Kriterien umweltverträglicher Landwirtschaft (KUL) – ein Verfahren zur ökologischen Bewertung von Landwirtschaftsbetrieben. Agribiol. Res. 51 (1999), H. 1, S. 57-76
- [5] Brunotte, J., M. Weißbach, H. Rogasik, E. Isensee und C. Sommer: Zur guten fachlichen Praxis beim Einsatz moderner Zuckerrüben-Erntetechnik. Zuckerrübe 49 (2000), H. 1, S. 34-40
- [6] Steinkampf, H.: Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. Dissertation. Landbauforschung Völknerode (1975), Sonderheft 27
- [7] Jaklinski, L.: Modele oddzialywania kola pneumatycznego na glebe. Prace Naukowe, Mechanika (1999) z.175, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- [8] Olsen, H. J.: Calculation of subsoil stresses. Soil & Tillage Res. 29 (1994), pp. 111-123

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft, den Firmen Claas, Fendt und Michelin sowie der Bilateralen Kooperation Deutschland / Polen sei für die Unterstützung gedankt.

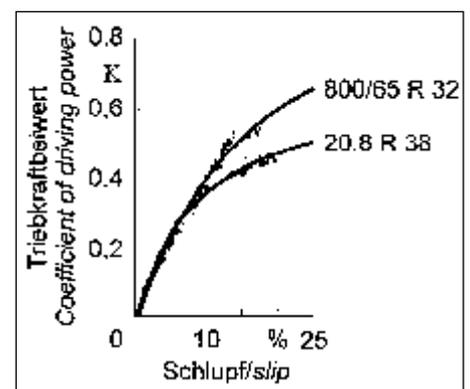


Bild 3: Triebkraftbeiwerte als Funktion des Schlupfes für die Reifen 20.8 R 38 mit 2,24 und für 800/65 R 32 mit 1,15 bar Reifeninnendruck  $p_i$  und der Radlast 5,9 t auf Stoppelacker; Messpunkte sowie Ausgleichsfunktion nach [6]

Fig. 3: Driving power coefficient as a function for wheels 20.8 R 38 with 2.24 and for 800/65 R 32 with 1.15 bar inflation pressure  $p_i$  and wheel load of 5.9 t on unploughed soil; measuring points and function according to [6]