

Boris Marx, Bernd Johanning und Stefan Böttinger

# Nickschwingungstilgung durch Topzylinder

Der Zielkonflikt bei der Fahrwerksentwicklung für landwirtschaftliche Gespanne hinsichtlich Straßen- und Feldfahrt nimmt mit steigenden Fahrgeschwindigkeiten zu. Herkömmliche Lösungen stoßen für die spezifischen Anforderungen, die hinsichtlich Fahrsicherheit und Fahrkomfort auf der einen Seite und Bodenschonung und Traktion auf der anderen Seite formuliert werden, zunehmend an Grenzen. Intelligente Fahrwerkssysteme können eine Lösung bieten: Der Einsatz eines passiven oder aktiv geregelten Topzylinders ermöglicht beispielsweise bei Straßenfahrt eine Nickschwingungstilgung und bei Feldfahrt eine Traktionsverstärkung.

## Schlüsselwörter

Traktorgespann, Fahrsicherheit, Fahrkomfort, Traktion, Simulation, Hydropneumatik

## Keywords

Tractor-trailer combination, driving safety, driving comfort, traction, simulation, hydro-pneumatic

## Abstract

Boris Marx, Bernd Johanning and Stefan Böttinger

## Pitch compensation by top cylinder

Landtechnik 67 (2012), no. 3, pp. 191–195, 9 figures, 3 references

Due to increasing driving speed the target conflict between on- and off-road drive for agricultural chassis development grows. Alternative solutions for specific requirements reach their limits for ride safety and comfort on the one hand and soil protection and traction power on the other hand. Intelligent suspension systems with a passive or active controlled top cylinder could be a solution. The system allows a pitch oscillation compensation for driving on roads and traction assistance while working on the field.

Wesentliche Schwerpunkte der modernen Fahrwerksentwicklung sind daher die Realisierung schneller Fahrgeschwindigkeiten von Traktorgespannen auf der Straße und das optimale Ausnutzen der möglichen Zuladung. Für den Feldbetrieb stehen eine hohe Bodenschonung und eine optimale Traktion im Vordergrund. Darüber hinaus müssen hohe Sicherheitsanforderungen erfüllt werden. Das Hauptziel des durch EFRE (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) geförderten Forschungsprojektes, das seit 2009 in Kooperation mit der Fa. Kotte Landtechnik GmbH & Co. KG und der Universität Hohenheim an der Hochschule Osnabrück durchgeführt wird, ist eine Potenzialuntersuchung des sogenannten Topzylinders als Ersatz für das Frontgewicht. Im Mittelpunkt steht dabei der Funktionsnachweis des Systems, Bauteilbeanspruchungen und Zulassungsvoraussetzungen werden zunächst nicht betrachtet.

## Systembeschreibung

**Abbildung 1** zeigt den Topzylinder bei einem landwirtschaftlichen Fahrzeuggespann mit Starrdeichselverbindung, der oberhalb der Koppelebene eingebaut ist. Ein Lösungsansatz um auf den Einsatz eines Frontgewichtes zu verzichten besteht darin, dass der Topzylinder den Traktor und den Anhänger aktiv gegeneinander verspannt. Während der Straßenfahrt kann bei Verzicht auf das Frontgewicht die zur Sicherheit nötige statische Mindestlast an der Vorderachse eingestellt werden. Zusätzlich können auftretende Nickschwingungen des Traktors durch Zug- oder Druckkräfte getilgt werden. Bei Feldfahrt kann der Topzylinder durch geregelte Druckkräfte die Radlasten des Traktors beeinflussen und z. B. schlupfabhängig so verändern, dass eine optimale Traktion des allradgetriebenen Traktors auch ohne Frontgewicht gewährleistet ist und ein Festfahren des Gespanns verhindert wird. Der vorliegende Beitrag befasst sich im Wesentlichen mit der Nickschwingungstilgung.

Der stetig voranschreitende Strukturwandel in der Landwirtschaft führt zu immer größeren Hof-Feld-Entfernungen. Die Transportzeit auf der Straße ist zu einem zentralen Kostenfaktor geworden, der die Wirtschaftlichkeit vieler landwirtschaftlicher Arbeitsprozesse maßgeblich beeinflusst [1].

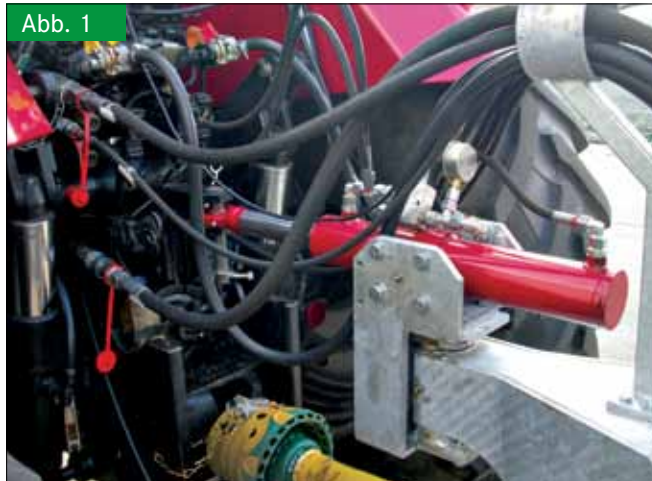


Abb. 1

Oberhalb der Koppel Ebene eingebauter Topzylinder  
 Fig. 1: Top cylinder installed above the connection between tractor and trailer

### Schwingungsersatzmodell

Die Fahrsicherheit und der Fahrkomfort stehen bei Ersatz des Frontgewichts durch den Topzylinder im Mittelpunkt (**Abbildung 1**). Zur Beurteilung dieser zwei Schwerpunkte kann vereinfacht auf zwei Fragen eingegangen werden:

- Welche dynamischen Achslastschwankungen treten insbesondere an der Vorderachse des Traktors bei hohen Fahrgeschwindigkeiten auf?
- Welche Beschleunigungen erfährt der Fahrer am gefederten Fahrersitz?

Um diese Fragen zu beantworten, wurde ein bekanntes mathematisches Fahrzeuersatzmodell eines Standardtraktors mit Vorderachs-, Kabinen- und Fahrersitzfederung [2] um ein Starrdeichselanhänger-Modell in Form eines Flüssigmisttankwagens mit Deichsel- und Achsfederung erweitert (**Abbildung 2**). Um das fahrdynamische Verhalten der Traktorreifen zu beschreiben wurde das Hohenheimer Reifenmodell verwen-

det [3], das für eine Hindernisüberfahrt um einen sogenannten Fixed Footprint erweitert wurde. Im Gegensatz zur Ein-Punkt-Anregung wird beim Fixed Footprint der Reifenlatsch berücksichtigt. Aufgrund der Symmetrie zur Fahrzeuglängsachse ist die Betrachtung der Hub- und Nickbewegungen des vertikalen Schwingungsverhaltens und somit eines ebenen, linearen Schwingungsersatzmodells ausreichend. Die Parametrisierung des Modells erfolgte nach Firmenangaben, eigenen Messungen und Einschätzungen.

Mit dem hergeleiteten Schwingungsersatzmodell können verschiedene Betriebszustände wie Ladung, Streckenprofil, Fahrgeschwindigkeit sowie deren Einfluss auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort simuliert und untersucht werden. Ebenfalls kann die Wirkung des Frontgewichts überprüft werden. Die Simulation wird in Matlab/Simulink durchgeführt. **Abbildung 2** zeigt die zwei Verwendungsmöglichkeiten des Topzylinders. Die passive Lösung beinhaltet eine Drossel sowie einen Hydrospeicher. Wird der Topzylinder aktiv verwendet, so erfolgt die Ansteuerung über ein 4/3-Wegeventil.

Zur Validierung des Simulationsmodells wurden Fahrversuche mit Einzelhindernis- und Straßenanregung durchgeführt. Dazu wurden an einem Prototyp während der Versuchsfahrten folgende Messgrößen ermittelt:

- Vorderachsbeschleunigung (Vertikal)
- Rumpfbeschleunigung (Nicken und Vertikal)
- Fahrersitzbeschleunigung
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Topzylinderweg
- Topzylinderdruck
- Deichseldruck

**Abbildung 3** und **Abbildung 4** enthalten simulierte und gemessene Verläufe für die Beschleunigung an der Vorderachse und am Fahrersitz bei Fahrt mit Frontgewicht und deaktiviertem Topzylinder über ein trapezförmiges Einzelhindernis. Nach 2,9 Sekunden fährt die Traktorvorderachse über das Hindernis, rund zwei Sekunden später folgt die Hinterachse, zu

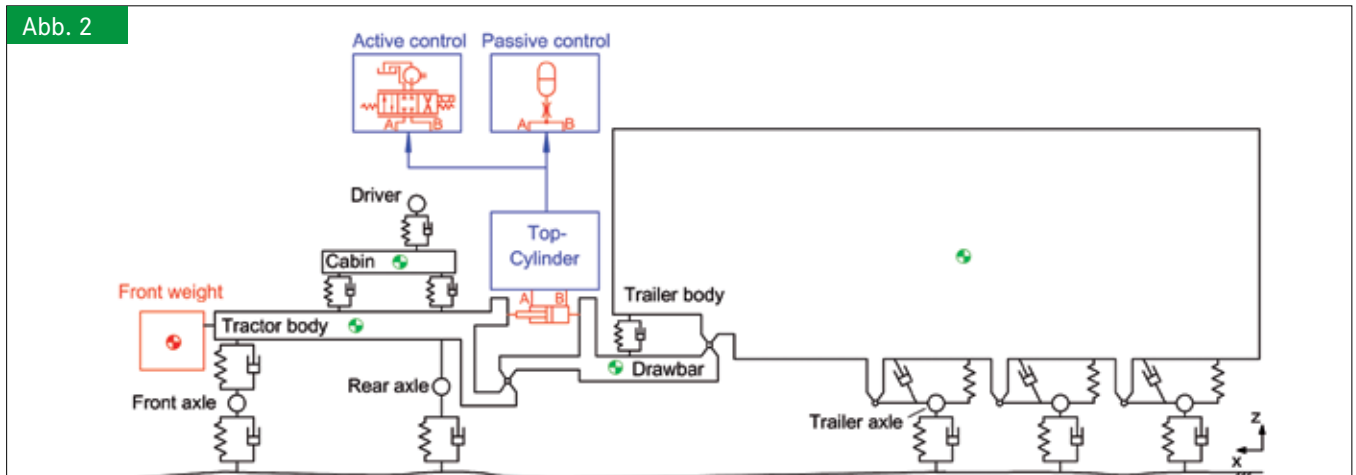
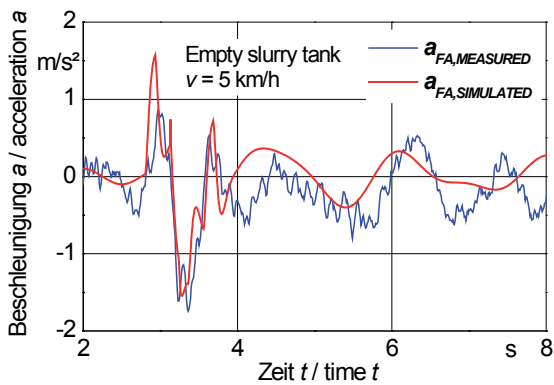


Abb. 2

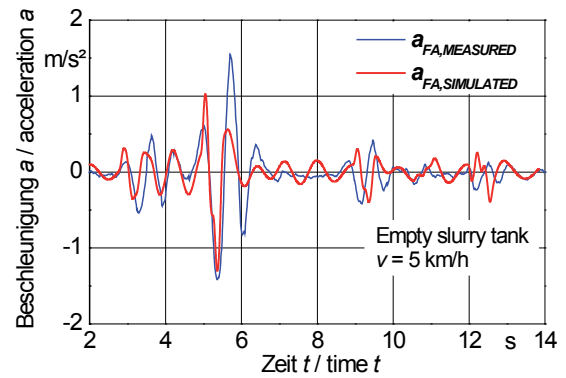
Vereinfachtes, ebenes Schwingungsersatzmodell eines Traktorgespans mit Starrdeichselverbindung und Topzylinder  
 Fig. 2: Simplified, two-dimensional vibration model of a tractor-trailer combination with fixed drawbar and top cylinder

Abb. 3



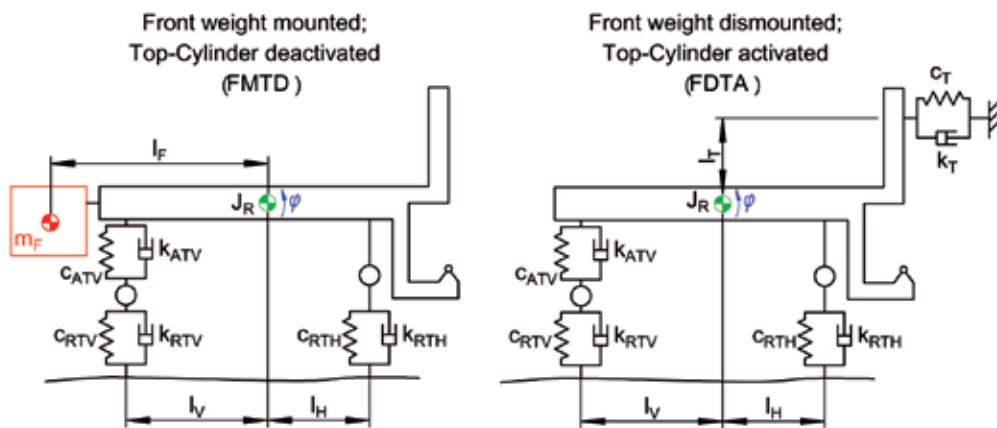
Vorderachsbeschleunigung bei Einzelhindernisüberfahrt, gemessen und simuliert  
 Fig. 3: Front axis acceleration while driving over an obstacle, measured and simulated

Abb. 4



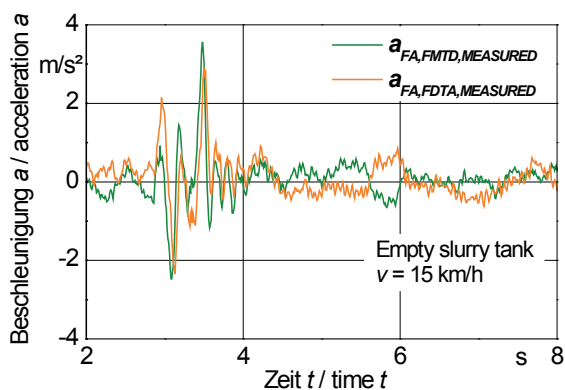
Fahrersitzbeschleunigung bei Einzelhindernisanregung, gemessen und simuliert  
 Fig. 4: Driver seat acceleration while driving over an obstacle, measured and simulated

Abb. 5



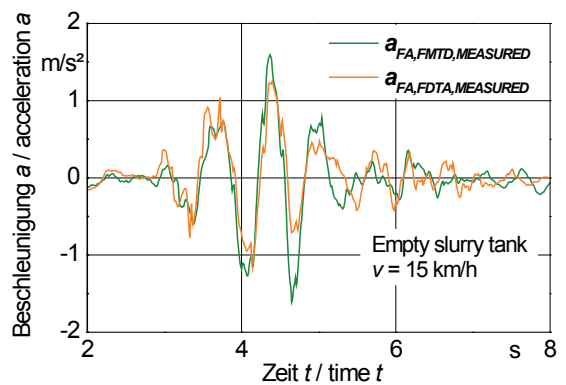
Passive Schwingungstilgung durch Topzylinder  
 Fig. 5: Passive control approach by top cylinder

Abb. 6



Vorderachsbeschleunigung mit passiver Schwingungstilgung bei Einzelhindernisanregung  
 Fig. 6: Front axis acceleration for passive control while driving over an obstacle

Abb. 7



Fahrersitzbeschleunigung mit passiver Schwingungstilgung bei Einzelhindernisanregung  
 Fig. 7: Driver seat acceleration for passive control while driving over an obstacle

erkennen am Verlauf der Fahrersitzbeschleunigung. Der Einfluss der drei Anhängerachsen ist ebenfalls an der Beschleunigung des Fahrersitzes (ab 9 Sekunden) zu erkennen. Beide Verläufe zeigen qualitativ eine Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Beschleunigungen.

Auch die Frequenzen stimmen im Bereich der Anregung gut überein. Die Schwingungen vor und nach der Einzelhinderisüberfahrt, vor allem an der Vorderachse, sind auf die Reifenunrundheit sowie den Fahrhahuntergrund zurückzuführen. Beide Parameter werden in der Simulation berücksichtigt und bedingen die Phasenverschiebung durch das regellose Fahrhahsignal [2].

### Passive Schwingungstilgung

Mit Blick auf die angestrebte aktive Schwingungstilgung wurde als Zwischenschritt eine passive erprobt. Eine passive Schwingungstilgung durch den Topzylinder erfolgt dadurch, dass sich dieser am Anhänger „abstützt“ und die Schwingungseigenschaft des Traktorrumpfes beeinflusst (**Abbildung 5**). Dies geschieht mit einer hydraulischen Drossel sowie einem Hydrospeicher, beide in Kombination weisen das Verhalten eines Feder-Dämpfer-Elementes auf. **Abbildung 5** zeigt links den „traditionellen“ Aufbau: Am Traktor ist ein Frontgewicht angehängt und der Topzylinder ist deaktiviert (FMTD – Front weight mounted, top cylinder deactivated). Rechts wird das Frontgewicht nicht verwendet und der Topzylinder ist aktiviert (FDTA – Front weight dismounted, topcylinder activated). Wird nur der Freiheitsgrad des Nickens betrachtet, kann die Verwendung des passiven Topzylinders bei Verzicht auf das Frontgewicht das Dämpfungsmaß  $D_\varphi$  des Traktorrumpf-Nickens derart beeinflussen, dass eine Schwingungstilgung erfolgt (Gleichung 1 und Gleichung 2). Die Parameter der Gleichungen sind **Abbildung 5** zu entnehmen.

FMTD

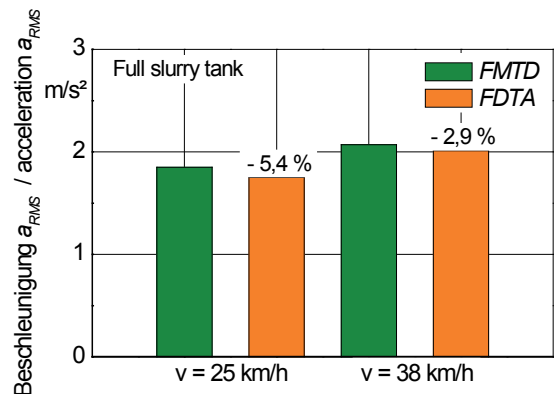
$$D_\varphi = \frac{k_{RTH}l_H^2 + k_{ATV}l_V^2}{2 \cdot \sqrt{(J_R + m_F l_F^2)(c_{RTH}l_H^2 + c_{ATV}l_V^2)}} \quad (\text{Gl. 1})$$

FDTA

$$D_\varphi = \frac{k_{RTH}l_H^2 + k_{ATV}l_V^2 + k_T l_T^2}{2 \cdot \sqrt{J_R(c_{RTH}l_H^2 + c_{ATV}l_V^2 + c_T l_T^2)}} \quad (\text{Gl. 2})$$

Anhand des Simulationsmodells wurden eine Drossel und ein Hydrospeicher dimensioniert und mittels Fahrversuchen getestet. **Abbildung 6** und **Abbildung 7** zeigen die zeitlichen Verläufe der Vorderachs- und Fahrersitzbeschleunigung bei der bereits oben erwähnten Einzelhinderisanregung. Die Topzylinderkraft beträgt 15 kN. Mit dieser ist die statische Mindestlast an der Vorderachse nach § 38 der StVZO eingestellt und das Dämpfungsmaß  $D_\varphi$  ist um 7 % größer als ohne Topzylinder. Der Verlauf an der Vorderachse zeigt bei aktiviertem Topzylinder

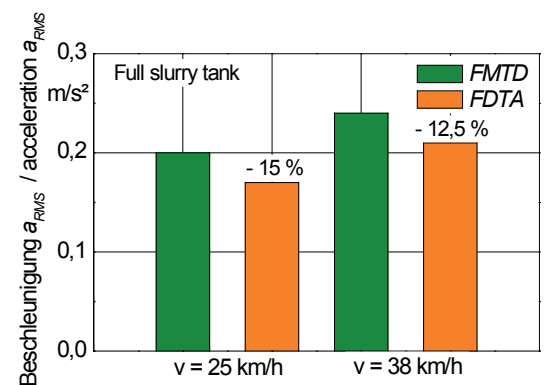
Abb. 8



Vorderachsbeschleunigung mit passiver Schwingungstilgung bei Straßenfahranregung

Fig. 8: Front axis acceleration for passive control while driving on the road

Abb. 9



Fahrersitzbeschleunigung mit passiver Schwingungstilgung bei Straßenfahranregung

Fig. 9: Driver seat acceleration for passive control while driving on the road

bei der ersten Anregung einen stärkeren Anstieg als mit Frontgewicht, im Anschluss aber sind die Verläufe ähnlich. Dadurch, dass die Beschleunigungsverläufe identisch sind, kann auch auf identische Vorderachsschwankungen geschlossen werden: Die Fahrsicherheit bleibt erhalten. Bei der Beschleunigung am Fahrersitz ist zu erkennen, dass über den gesamten Messverlauf der Topzylinder zu geringeren Schwingungen führt. Das bedeutet, dass der Fahrkomfort verbessert wird.

Ergebnisse von Fahrversuchen bei Straßenanregung sind in **Abbildung 8** und **Abbildung 9** dargestellt. Für diese Verläufe wurde aus den Beschleunigungen an Vorderachse und Fahrersitz der quadratische Mittelwert  $a_{RMS}$  berechnet. Es zeigte sich, dass durch den passiven Lösungsansatz die Beschleunigungen an der Vorderachse um bis zu 5,4 % und am Fahrersitz um bis zu 15 % reduziert werden konnten.

## Schlussfolgerungen

Die bei Straßenfahrt vorgestellten Ergebnisse zur passiven Nickschwingungstilgung zeigen, dass der Topzylinder einen positiven Einfluss auf die Fahrsicherheit und den Fahrkomfort ausübt. Im Hinblick auf das Traktionsmanagement als zweites Ziel des Forschungsvorhabens konnten ebenfalls positive Ergebnisse in Feldversuchen erzielt werden. Hier besteht außerdem ein Potenzial, ohne Frontgewicht auszukommen. Dies hätte einen Gewichtverlust von 500 bis 100 kg des Fahrzeuggespanns zur Folge. Die eingesparte Masse könnte beispielsweise zur Nutzlasterhöhung verwendet werden. Folgende kritische Aspekte sind noch zu untersuchen:

- Festigkeiten,
- Zulassung nach StVO und
- durch Kurvenfahrt eingeleitete Kippmomente.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes wird der Übergang von der passiven zu einer aktiven Steuerung des Topzylinders untersucht. Der Topzylinder soll dann aktiv während der Straßenfahrt zur Schwingungstilgung eingesetzt werden. Eine Regelung verschiedener Zustandsgrößen, u. a. Vorderachs- und Nickbeschleunigung sowie Lastdruck, ist geplant. Hinsichtlich

der Traktion wird eine aktive Beeinflussung der Achslasten in Abhängigkeit von drei verschiedenen Größen angestrebt: der Zugkraft, der Stützlast und der Fahrbahnneigung.

## Literatur

- [1] Bernhard, H. (2003): Transportaufkommen in der Landwirtschaft. Informationsschrift zur Landmaschinenvorführung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft Dresden, S. 3–8
- [2] Pickel, P. (1993): Simulation fahrdynamischer Eigenschaften von Traktoren, Dissertation Technische Universität Berlin, VDI-Verlag Düsseldorf, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 65
- [3] Ferhadbegovic, B.; Brinkmann, C.; Kutzbach, H.D.; Böttinger S. (2007): Hohenheimer Reifenmodell – ein dynamisches dreidimensionales Modell für Fahrdynamiksimulation, Agricultural Engineering Research 13, S. 1–14

## Autoren

**M. Sc. Boris Marx** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Landtechnik und mobile Arbeitsmaschinen der Hochschule Osnabrück, Albrechtstraße 30, 49009 Osnabrück, E-Mail: B.Marx@hs-osnabrueck.de.

**Prof. Dr.-Ing. B. Johanning** ist Leiter des Labors für Landtechnik und mobile Arbeitsmaschinen der Hochschule Osnabrück.

**Prof. Dr.-Ing. S. Böttinger** ist Leiter des Fachgebiets Grundlagen der Agrartechnik des Instituts für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart.