

Joachim Brunotte, Klaus Nolting, Norbert Fröba und Berthold Ortmeier

# Bodenschutz beim Pflügen: Wie hoch ist die Radlast am Furchenrad?

Das Fahren in der Furche steht nicht erst seit dem durch Gesetze und Vorschriften geschärften Bewusstsein für den Bodenschutz im Verdacht, dauerhafte Schäden in Krumbasis und Unterboden hervorzurufen. Einerseits versucht die Industrie mit Entwicklungen wie dem „Onland-Pflügen“ Alternativen anzubieten, andererseits belegen wissenschaftliche Langzeitstudien, dass sich die verdichtete Zone im Bereich der Pflugsohle deutscher Äckern in den letzten 50 Jahren nicht vergrößert, sondern zurückentwickelt hat. Welche Belastungen treten also tatsächlich unter den Rädern eines Traktors in der Pflugfurche auf? Die Ergebnisse der hier dargestellten Untersuchungen geben darauf eine überraschende Antwort.

## Schlüsselwörter

Pflügen, Bodenschutz, Reifeneinfederung, Radlast

## Keywords

Tillage, soil protection, tire deflection, wheel load

## Abstract

Brunotte, Joachim; Nolting, Klaus; Fröba, Norbert and Ortmeier, Berthold

Soil protection and tillage: How high is the wheel load in the plough furrow?

Landtechnik 67 (2012), no. 4, pp. 265–269, 4 figures, 1 table, 7 references

Even before laws and restrictions raised the awareness of soil protection, tillage is under suspicion to cause enduring damage to the subsoil. Industry has been trying, on the one hand, to develop alternatives like on-land ploughing but, on the other hand, long-term studies show that the compaction zone at the plough pan on German fields had not increased in the past 50 years, but rather reduced. Which stresses actually occur due to the passage of tractor wheels in the plough furrows? The results presented here provide a surprising answer.

■ Bei einem Traktor in horizontaler Lage sind die Radlasten der beiden Räder einer Achse etwa gleich und auf jeder Seite des Traktors werden ca. 50 % des Gesamtgewichtes abgestützt. Wenn der Traktor um die Längsachse gekippt wird – wie beim Fahren in der Furche – ändert sich die Gewichtsverteilung (**Tabelle 1**). Die Senkrechte zeigt durch den Schwerpunkt des

Traktors in Richtung Furchenseite. Es stellt sich jedoch die Frage: Welche Auswirkung hat der angehängte Pflug auf die Lastverteilung beim Pflügen? Wissenschaftliche Veröffentlichungen [1; 2] zeigen, dass beim Pflügen eine Verschiebung zu Lasten der Furchenräder im Verhältnis von ca. 60/40 stattfindet (**Tabelle 1**, Variante a). Von Renius [2] wird die Last auf dem hinteren Furchenrad mit bis zu 45 % der Gesamtlast angegeben.

Ob dies auch bei der Bodenbearbeitung mit den heute üblichen Pflügen mit größerer Arbeitsbreite gilt, ist im Hinblick auf die Problematik der Verdichtung im Bereich der Furchenradsohle von großem Interesse.

Im Stillstand des Fahrzeuges können Radlasten durch einfaches Wiegen ermittelt werden. Dynamische Messungen während der Fahrt sind sehr aufwändig. Die im Maschinenbau üblichen Methoden der Kraftmessung mittels Mehrkomponentenmessnaben oder Dehnungsmessstreifen an Fahrwerksteilen sind an einem serienmäßigen Traktorfahrwerk schwer umsetzbar.

## Ein neues Verfahren

Neue Möglichkeiten eröffnen sich durch ein Verfahren, welches bereits in der Ausgabe 3/2011 der Landtechnik im Zusammenhang mit der Reifendruckregelung vorgestellt wurde: Aus der Reifeneinfederung, die mit einem Ultraschallsensor in der Felge gemessen wird, kann über eine reifenspezifische Kennlinie für den jeweils herrschenden Reifeninnendruck die Radlast bestimmt werden. Das Verfahren kann die im Fahrbetrieb auftretenden dynamischen Lastverläufe unmittelbar an der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Boden für jedes Rad einzeln erfassen und aufzeichnen. Die Übertragung der Messwerte aus dem drehenden Rad erfolgt per Funk.

Untersuchungen zur Furchenradlast mit diesem neuen Verfahren wurden seit Frühjahr 2010 am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des Johann Heinrich von Thünen-Institutes (vTI) in Braunschweig durchgeführt. Für die

Abb. 1



Radlastmessung in der Pflugfurche  
 Fig. 1: Wheel load measurement in the plough furrow

Versuche stand ein Traktor zur Verfügung, der auf einer Seite an Vorder- und Hinterrad mit der neuen Technik ausgerüstet war (**Abbildung 1**). Als Pflug wurde ein 4-Schar-Drehpflug vom Typ Lemken Opal 140 verwendet. Ein Packer diente als Frontgewicht. Mit dieser Anordnung konnte bei den Messfahrten zwar nicht die Lastverteilung auf alle 4 Räder gleichzeitig erfasst werden, aber bedingt durch das Drehen des Pfluges konnte abwechselnd die Land- und die Furchenseite aufgezeichnet werden. Durch die Benutzung eines Messsystems für beide Seiten konnten systembedingte Abweichungen beim Vergleich der Messergebnisse von Land- und Furchenseite ausgeschlossen werden. Um auch sonst technisch optimale Voraussetzungen zu gewährleisten, wurden die Einstellungen des Pfluges in

der Kombination mit dem verwendeten Traktor durch einen Spezialisten der Herstellerfirma kontrolliert und optimiert. Die Messfahrten wurden auf einer Fläche ohne nennenswerte Hangneigung durchgeführt, sodass außer durch die Schräglage des Traktors in der Furche keine weiteren neigungsbedingten Einflüsse auf die Lastverteilung zu berücksichtigen waren.

### Umgekehrte Verhältnisse

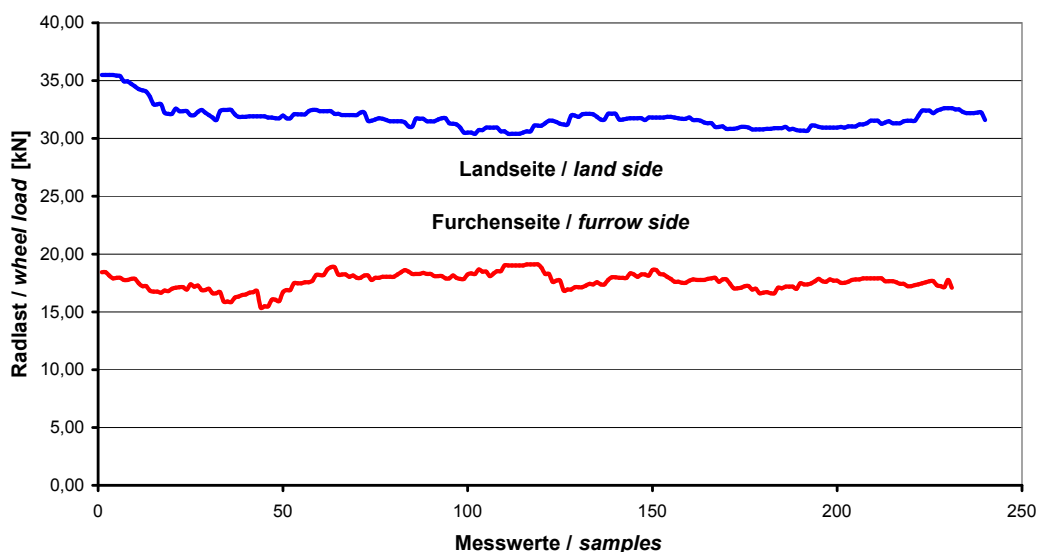
Bereits während der Messungen zeichnete sich eine überraschende Tendenz ab: Nicht am Furchenrad sondern am Landrad traten die höheren Lasten auf (**Abbildung 2**). Statt des erwarteten Verhältnisses Furchenradlast/Landradlast von 60/40 ergaben die Messungen ein Verhältnis von 40/60. Die Mittelwerte der Radlasten schwankten bei den Messungen nur um  $\pm 2,5$  kN.

Um das Resultat, welches auf den ersten Blick den bisherigen Aussagen zu widersprechen schien, abzusichern, und um systematische Fehler bei der Versuchsdurchführung auszuschließen, wurde die gesamte Technik überprüft und die Messung mehrfach wiederholt. Selbst beim Pflügen an Hanglagen mit zusätzlicher Längsneigung des Traktors wurde das Ergebnis bestätigt. Da zunächst keine plausible Erklärung für die unerwartete Radlastverteilung gefunden werden konnte, wurden zusätzlich Messfahrten in der Furche ohne Pflug durchgeführt. Hier war alles wie erwartet: Die Radlast am Furchenrad war mit ca. 23 kN im Vergleich zum Landrad mit ca. 18 kN um 5 kN größer. Das entspricht einer Gewichtsverteilung von 44/56 %.

### Pflug entlastet Furchenräder?

Die Ursache für die unerwartete Entlastung der Furchenräder lag in der Kombination des Traktors mit dem Pflug. Unter An-

Abb. 2



Vergleich der Radlasten Landseite/Furchenseite am Hinterrad eines Traktors beim Pflügen. Mittelwerte aus jeweils 6 aufeinander folgenden Messfahrten von ca. 200 m Länge.

Fig. 2: Comparison on wheel loads land side/furrow side of the rear wheel of a tractor while ploughing. Mean values of six subsequent measurement passages of about 200 m in length, each.

wendung der seit den 1950er-Jahren aus den „Grundlagen der Landtechnik“ [3–5] bekannten theoretischen Betrachtungen zum Wirken der Kräfte zwischen Traktor und Anbaugeräten, wurden die Radlasten für einen Traktor mit 3-Schar-Pflug und einen Traktor mit 4-Schar-Pflug (**Abbildung 3**) berechnet. Die Kombination des Pfluges mit kleiner Arbeitsbreite und dem hinsichtlich Zugkraftbedarf entsprechenden Traktor liegt den Aussagen von Renius zugrunde und der Traktor mit dem 4-Schar-Pflug simuliert das Versuchsgespann. Die Ergebnisse der Berechnungen bestätigen sowohl die Aussagen von Renius (Variante a) als auch die Versuchsergebnisse (Variante b).

In **Tabelle 1** sind die Annahmen und Kalkulationsergebnisse zusammengestellt.

In beiden Varianten verschiebt sich der Angriffspunkt der Gewichtskraft der Traktoren  $G_{TH}$  durch das Fahren in der Furche zunächst in Richtung Furchenrad. Die Radlast am Furchenrad steigt, und die Belastung des Landrades sinkt.

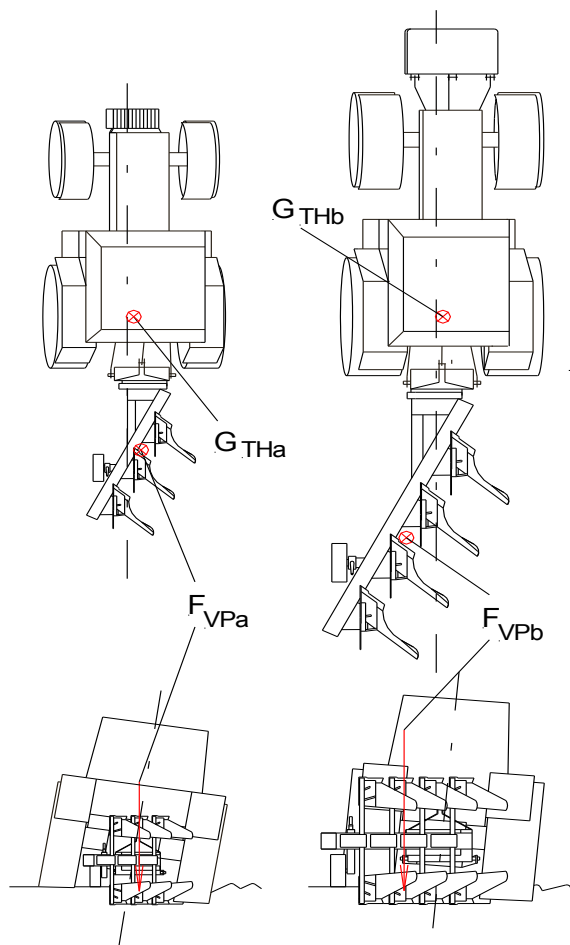
Ausschlaggebend für die Lastverteilung der Gesamtanordnung ist allerdings die Lage des Angriffspunktes der Vertikalkraft  $F_{VP}$  des Pfluges. Dieser ist nicht identisch mit dem Schwerpunkt des Pfluges, da er außer von der reinen Gewichtskraft des Pfluges auch von der vertikalen Komponente der beim

Tab. 1

Daten der Varianten a und b der Traktor-Pflug-Kombinationen und der sich ergebenden Radlasten an der Hinterachse (HA) der Traktoren  
Table 1: Data from variants a and b of the tractor-plough combinations and the resulting wheel loads on the rear axle of the tractor

Parameter/parameter	Variante a/Variant a		Variante b/Variant b	
Anzahl Schare/Number of shares	3		4	
Arbeitsbreite pro Schar [cm]/Working width per share [cm]	28		40	
Arbeitstiefe [cm]/Working depth [cm]	30		25	
Vertikalkraft des Pfluges $F_{VP}$ – Gewichtskraft + vertikale Bodenkraft – Stützkraft am Pflug durch Sohlen und Tast-/Stützrad [daN] Vertical force of the plough $F_{VP}$ – weight force + vertical soil force – support force on the plough through the sole and feeler/support wheels [daN]	650		1 200	
Horizontaler Abstand Mitte Hinterachse – Vertikalkraft des Pfluges [mm] Horizontal distance centre rear axle – vertical force of the plough [mm]	1 700		2 500	
Leermasse des Traktors [kg]/Empty mass of the tractor [kg]	4 000		5 500	
Radstand [mm]/Wheelbase [mm]	2 450		2 750	
Lastverteilung ohne Ballast und Pflug Vorderachse: Hinterachse [%] Weight distribution without ballast and plough front axle: rear axle [%]	40 : 60		45 : 55	
Spurweite [mm]/Track width [mm]	1 800		1 800	
Frontballast [kg]/Front ballast [kg]	300		700	
Horizontaler Abstand Schwerpunkt Frontballast – Mitte Vorderachse [mm] Horizontal distance centre of gravity – centre front axle [mm]	600		1 400	
Breite der Reifen an der Hinterachse [mm]/Width of tires on the rear axle [mm]	480		700	
Schwerpunkthöhe mit Ballast [mm] Height of centre of gravity with ballast [mm]	650		900	
Hinterachslast mit Ballast ohne Pflug $G_{TH}$ [daN] Rear axle load with ballast without the plough $G_{TH}$ [daN]	2 320		3 220	
	<b>Landrad HA</b> <i>Land wheel rear axle</i>	<b>Furchenrad HA</b> <i>Furrow wheel rear axle</i>	<b>Landrad HA</b> <i>Land wheel rear axle</i>	<b>Furchenrad HA</b> <i>Furrow wheel rear axle</i>
Traktor in Ebene (mit Ballast, ohne Pflug)/Tractor on level surface (with ballast, without plough)				
Radlast [daN]/Wheel load [daN]	1 160	1 160	1 610	1 610
Anteil an Hinterachslast [%]/Percentage on rear wheel load [%]	50	50	50	50
Traktor in Furche (mit Ballast, ohne Pflug)/Tractor in furrow (with ballast, without plough)				
Radlast [daN]/Wheel load [daN]	970	1 350	1 410	1 810
Anteil an Hinterachslast [%]/Percentage on rear axle load [%]	42	58	45	55
Traktor beim Pflügen/Tractor while ploughing				
Radlast [daN]/Wheel load [daN]	1 360	2 000	3 150	2 000
Anteil an Hinterachslast [%]/Percentage on rear axle load [%]	41	59	61	39
Anteil an Gesamtadlasten [%]/Percentage on total wheel load [%]	27,4	42,9	37,5	26

Abb. 3



Draufsicht und Heckansicht eines Traktors beim Pflügen mit kleiner (a) und größerer (b) Arbeitsbreite. Der Angriffspunkt der Vertikalkraftkomponente am Pflug liegt in der Aufstandsebene der Traktoren bei Variante a auf der Furchenradseite  $F_{VPa}$  und bei Variante b auf der Landradseite  $F_{VPb}$ .  $G_{TH}$  beschreibt die Hinterachslast mit Ballast ohne Pflug.

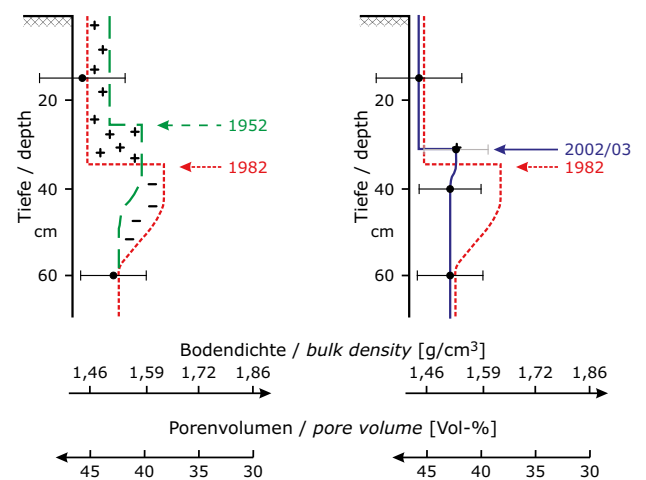
Fig. 3: Frontal and rear view of a tractor while ploughing with a small (a) and a greater working width (b). The point of contact of the vertical power components on the plough are in the contact plane (standing level) of the tractor in variant a on the furrow wheel side  $F_{VPa}$  and in variant b on the land wheel side  $F_{VPb}$ .  $G_{TH}$  describes the rear axle load with ballast without the plough.

Pflügen an den Pflugkörpern entstehenden Bodenkräfte und von den Stützkraften durch die Sohlen und das Tast-/Stützrad beeinflusst wird. Man erkennt, dass sich bei zunehmender Arbeitsbreite des Pfluges der Angriffspunkt der Vertikalkraft zur Landradseite verschiebt. Dadurch wird in Variante b das Landrad stärker belastet als das Furchenrad.

### Bedeutung für den Bodenschutz

Durch den Einsatz des neuen Verfahrens zur Messung der Radlast wurde ein Zusammenhang aufgedeckt, dem bislang keine große Aufmerksamkeit geschenkt wurde: Die Arbeitsbreite eines Pfluges hat einen erheblichen Einfluss auf die Lastverteilung an den Rädern des ziehenden Traktors. Die theoretischen

Abb. 4



Bodendichte/Porenvolumen von 144 Standorten in Südniedersachsen – tendenzieller Vergleich [6; 7]

Fig. 4: Bulk density/pore volume of 144 locations in southern Lower Saxony – a tendentious comparison [6; 7]

Grundlagen zur Berechnung sind seit Jahrzehnten bekannt, wurden aber bisher nicht entsprechend genutzt. Die im Sinne des Bodenschutzes ungünstige Radlastverteilung von 60/40 auf Furchenrad/Landrad, die in Zeiten kleiner Arbeitsbreiten mit 3 Scharen als Faustregel Gültigkeit hatte, ist unter Berücksichtigung heutiger gerätetechnischer Standards überholt. Entwicklungen wie das Onland-Pflügen müssen zumindest in ihrer Bedeutung für den Bodenschutz neu bewertet werden. Für das konventionelle Pflügen scheint sich der Trend abzuzeichnen, dass mit einer maßvollen Vergrößerung der Arbeitsbreiten der Schaden der Furchenräder hinsichtlich einer Bodenverdichtung durch eine Lastverlagerung zur Landseite kleiner wird. Geplante Versuche mit einem 5-Schar Pflug sollen diese Schlussfolgerung stützen.

Die im Versuch eingesetzte Traktor-Pflug-Kombination (120-kW-Traktor und 4-Schar-Volldrehpflug) war auf mittelgroßen deutschen Betrieben in den letzten 25 Jahren weit verbreitet. Infolgedessen müssten die Auswirkungen auf die Bodenstruktur – 1985 wurden noch 80 % der Fläche, heute werden nur noch ca. 50 % der Fläche gepflügt – messbar sein; im Sinne von „der Boden schreibt die Geschichte der Landtechnik auf“ [6]. Hier kann eine Statuserhebung einer Region in Südniedersachsen, für die Messungen von 1952, 1982 und 2002 vorliegen, herangezogen werden (**Abbildung 4**). Im Sinne der Ertragssteigerung wurde von 1952–1982 eine Krümmenvertiefung und Aufkalkung empfohlen. Durch den Allradantrieb und den Einsatz von Volldrehpflügen konnte tiefer gearbeitet werden, aber auch mit viel Schlupf. Darüber hinaus wurde, aus heutiger Sicht, auch bei nicht akzeptabler Bodenfeuchte gepflügt. Die Folge war eine kritische Verdichtung der Krümmenbasis. Untersuchungen von 2002 – also 20 Jahre später – belegen, dass sich dieses Problem nicht fortgesetzt hat. Gründe hierfür sind eine aus Kostengründen gerin-

gere Bearbeitungstiefe und technische Detailverbesserungen wie Radialreifen mit geringem Reifeninnendruck von 1 bar, eine Schlupfregelung, das Pflügen nur bei akzeptabler Bodenfeuchte – ermöglicht durch eine hohe Schlagkraft – und der Verzicht auf das Fahren in der Furche durch die Ausdehnung konservierender Bodenbearbeitungsverfahren (bundesweit heute ca. 50 %). Die Messungen zur dynamischen Radlast bei der Pflugarbeit liefern eine weitere Erklärung für die Entspannung in der Krumbasis. Da bereits bei 4-scharigen Pflügen eine Gewichtsverlagerung zum Landrad erfolgt, wird dies bei 5- und 6-scharigen Pflügen noch stärker der Fall sein. Das bedeutet, eine Entlastung der Krumbasis beim Pflügen und Fahren in der Furche.

### Schlussfolgerungen

Eine entscheidende Reduzierung der Bodendichte in der Krumbasis ist für die Förderung der Durchlässigkeit für Luft, Wasser und Wurzeln außerordentlich wichtig.

Für die zukünftige Landbewirtschaftung bedeutet dies: Die Ausbreitung der konservierenden Bodenbearbeitung fördern und bei notwendigem Pflugeinsatz mindestens 4-scharig bei akzeptabler Bodenfeuchte und mit einem Reifeninnendruck von maximal 1 bar pflügen.

### Literatur

- [1] Steinkampf, H.; Bartels, J.; Olfe, G.; Zach, M. (1993): Ermittlung des Bodendrucks bei unterschiedlicher Belastung – Anlage und Durchführung des mehrjährigen Feldversuchs. In: Bodenverdichtung, Schrift 362. KTBL, Darmstadt
- [2] Renius, K. T. (1987): Traktoren. Technik und ihre Anwendung. München, BLV Verlagsgesellschaft
- [3] Getzlaff, G. (1951): Messung der Kraftkomponenten an einem Pflugkörper. Grundlagen der Landtechnik 1, S. 16–24
- [4] Skalweit, H. (1951): Kräfte zwischen Schlepper und Arbeitsgerät. Grundlagen der Landtechnik 1, S. 25–36
- [5] Skalweit, H. (1953): Die Führungskräfte von Schlepper-Arbeitsgeräten bei den genormten Anbausystemen. Grundlagen der Landtechnik 4, S. 54–64
- [6] Brunotte, J.; Lorenz, M.; Sommer, C.; Harrach, T.; Schäfer, W. (2008): Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. Berichte über Landwirtschaft, 86(2), S. 262–284
- [7] Ruhm, E. (1983): Schlechte Voraussetzungen für eine gute Ernte. Hannoversche Land- und Forstwirtschaftliche Zeitung 4, S. 3–4

### Autoren

**PD Dr. habil. Joachim Brunotte, Dipl.-Ing. Klaus Nolting** und **Ing. (grad) Berthold Ortmeier** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik (Institutsleiter: **Prof. Dr. habil. Klaus-Dieter Vorlop**) am Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, E-Mail: Joachim.Brunotte@vti.bund.de

**Dr.-Ing. Norbert Fröba** ist Teamleiter Pflanzenbau/Gartenbau/Weinbau beim Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., (KTBL), Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt.

## „Hohe Spannung“ in der Landtechnik

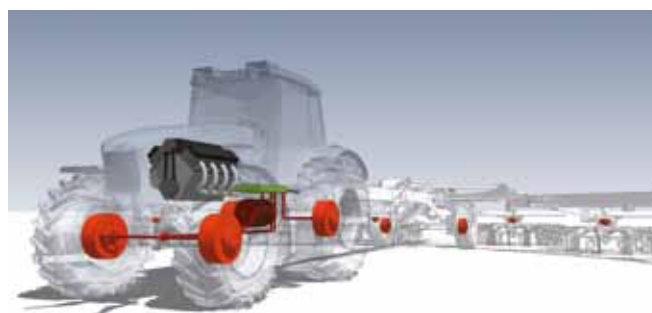
VDI-MEG KOLLOQUIUM AM 26./27. 6. 2012 IN DRESDEN BESTÄTIGT DEN TREND ZU ELEKTRISCHEN ANTRIEBEN

■ Mehr als 100 Experten aus Agrarwirtschaft und Landtechnik tauschten sich beim 3. VDI-MEG Kolloquium „Elektrische Antriebe in der Landtechnik“ am 26. und 27. Juni 2012 in Dresden über das Thema aus. Es bestand Konsens, dass elektrische Antriebe gegenüber konventionellen Konzepten viele Vorteile besitzen und zukünftig zunehmend praktische Bedeutung erlangen werden.

„Elektrische Antriebe haben einen hohen Wirkungsgrad, bieten sehr gute Steuer- und Regelungsmöglichkeiten und können damit die Funktionalität und den Prozesswirkungsgrad von Landmaschinen und -geräten deutlich verbessern“, resümiert Professor Thomas Herlitzius, Inhaber der Professur für Agrarsystemtechnik an der Fakultät Maschinenwesen der TU Dresden und Mitveranstalter des Kolloquiums. „Bei gesteigerter Effizienz und erweitertem Funktionsumfang wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß mobiler Landmaschinen gleichzeitig deutlich reduziert.“

Das Kolloquium beschäftigte sich außer mit neuen technischen Entwicklungen und Anwendungen auch mit den praktischen Herausforderungen beim Wechsel von mechanischen und hydraulischen Antrieben hin zur Hochvolt-Technik. Ähnlich wie in den Hochspannungsleitungen der Energienetze, liegen in elektrifizierten Maschinensystemen bis zu 1 000 Volt Spannung an. Dadurch rückt die Sicherheitstechnik ebenso in den Fokus wie

international einheitliche Anschlüsse für die Stromversorgung von Landmaschinen und externen Anbaugeräten. An den Herausforderungen wird gegenwärtig herstellerübergreifend gearbeitet, um der neuen Technik möglichst mit brancheneinheitlichen Schnittstellen zum Durchbruch zu verhelfen.



Der Traktor verfügt über einen vollelektrifizierten Einzelradantrieb und eine zusätzliche Schnittstelle für die elektrische Versorgung der Anbaugeräte. Den Strom dafür liefert ein am Motor angebrachter Generator. Zeichnung: TUD/IVMA