

Integrierte Radlastmessung für Traktoren

Michael Peeters, Viktor Kloster, Thomas Fedde, Ludger Frerichs

Bei der Entwicklung moderner Traktoren kommen den Faktoren Bodenschonung und die Steigerung der Schlagkraft bei reduziertem Kraftstoffverbrauch eine große Bedeutung zu. Während zur Vermeidung von Bodenverdichtungen geringe Achslasten erforderlich sind, wird zur Erzeugung höherer Zugkräfte ein entsprechendes Maschinengewicht benötigt. Daher sollte die Achslast über möglichst große Kontaktflächen auf den Boden übertragen werden. Dies wird durch eine gezielte Verteilung des Fahrzeuggewichts auf die angetriebenen Achsen im Verhältnis zu den verwendeten Reifengrößen sowie durch eine gezielte Absenkung des Reifeninnendrucks bis an die Auslastungsgrenze des Reifens erreicht.

Im Folgenden wird ein umfassendes Messkonzept vorgestellt, welches die Erfassung von Rad- und Achslasten des Fahrzeugs auch während des Arbeitsprozesses ermöglicht. Die dazu notwendige Sensorik ist an starren Achsen in die Gehäusestrukturen integriert. An hydropneumatisch gefederten Achsen werden die Drücke der Hydraulikzylinder ausgewertet. Die ermittelten Achslasten können dem Bediener angezeigt und zusätzlichen Assistenzsystemen zur Traktoroptimierung zur Verfügung gestellt werden.

Schlüsselwörter

Achslastbestimmung, Sensorsystem, Bodenschonung, Magnetostriktion

Um die Schlagkraft in landwirtschaftlichen Verfahrensketten zu erhöhen, werden immer größere, i. d. R. vor allem breitere Arbeitsgeräte verwendet, welche ein höheres Zugkraftpotenzial von Traktoren einfordern. Dies treibt die Entwicklung zunehmender installierter Antriebsleistungen in Traktoren und Landmaschinen an (RENIUS und KNECHTGES 2009; HERLITZIUS et al. 2013), welche auch eine Zunahme der Fahrzeugmassen bedingt. Der überwiegende Einsatz von Allradantrieb konnte zwar das Leistungsgewicht reduzieren, Antriebsleistung kann jedoch nur durch eine entsprechende Maschinenmasse in effektive Zugleistung umgewandelt werden. Dieser Entwicklung, vor allem zunehmender Fahrzeugmassen, sind durch die Belastbarkeit des landwirtschaftlichen Bodens Grenzen gesetzt, nicht zuletzt, weil der Boden in seiner Zusammensetzung und Struktur einen entscheidenden Einfluss auf den Ernteertrag hat. Beim Überfahren von landwirtschaftlichen Flächen kommt es zu Verdichtungen des Bodens unterhalb der Reifen und somit zu einer Veränderung der Struktur.

Die Beanspruchung von Böden wird unter anderem mit sogenannten Druckzwiebeln beschrieben. Diese verdeutlichen als Isobaren die Druckverteilung im Boden (Bodendruck). Das Druckniveau kann sowohl über die wirksame Fläche unter dem Reifen als auch über die wirkende Gewichtskraft beeinflusst werden. In Abbildung 1 sind die entstehenden Druckzwiebeln in einem Braunerde-Boden beispielhaft für den Reifen Michelin Multibib 650/65 R38 für trockene Bedingungen dargestellt. Mit steigenden Radlasten sowie steigenden Reifeninnendrücken, welche die Aufstandsfläche des Reifens reduzieren, erhöht sich die Tiefenwirkung des Bodendrucks erheblich und die Gefahr von Bodenschadverdichtungen steigt.

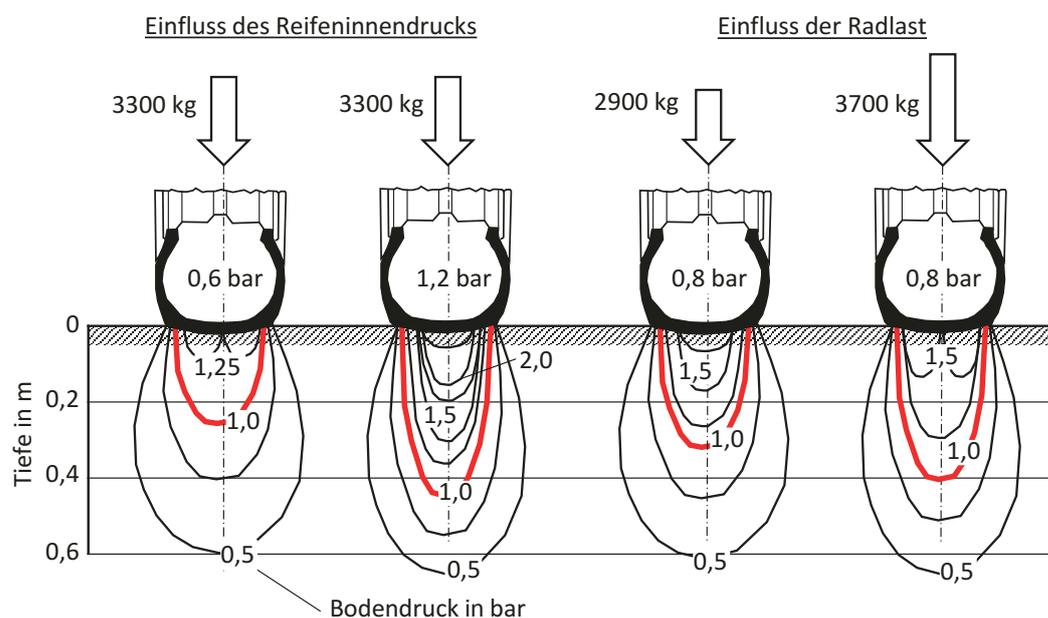


Abbildung 1: Druckzwiebeln unter dem Reifen Michelin Multibib 650/65R38 auf trockenem Braunerde-Boden (CH7) für variierende Radlasten (links) und variierende Aufstandsflächen (rechts), berechnet mit dem Modell Terranimo (STETTLER et al. 2014)

Von Bodenschadverdichtung wird gesprochen, wenn der Bodendruck die Bodenfestigkeit übersteigt. Dabei ist der Vergleich dieser beiden Größen für Bodenschichten unterhalb der Krumbasis (in ca. 30 cm Tiefe) besonders entscheidend, da eine Verdichtung des Bodengefüges in dieser Tiefe nicht durch heute standardisierte Bodenkultivierungsmaßnahmen wie Grubbern oder Pflügen rückgängig gemacht werden kann. Der Bodendruck im Oberboden wird vor allem durch die Kontaktfläche und somit den Reifeninnendruck verursacht, der Bodendruck im Unterboden wird maßgeblich durch die Größe der vertikalen Radlast beeinflusst (STETTLER et al. 2014).

Sowohl der Reifeninnendruck als auch die vertikale Radlast können bis zu einem gewissen Grad vom Traktorfahrer eingestellt werden, die Werte sind jedoch über die Reifentragfähigkeit miteinander gekoppelt. Die Reifentragfähigkeit beschreibt den für jede Reifengröße individuellen Zusammenhang zwischen zulässiger vertikaler Radkraft und dem minimalen Reifeninnendruck. Um im Hinblick auf Bodenschonung die größte Aufstandsfläche bei der wirkenden vertikalen Radkraft zu erhalten, wird die Absenkung des Reifeninnendrucks auf den minimal möglichen Wert empfohlen (BMVEL 2002, VDI 2014). Gleichzeitig soll die Fahrzeugmasse bei einem mehrachsigen Fahrzeug mit Allradantrieb auf alle Triebachsen verteilt werden, um die Masse bestmöglich zur Zugkraftherzeugung nutzen zu können. Die Achslastverteilung kann in erster Näherung nach dem Verhältnis der projizierten Reifenaufstandsflächen (Durchmesser \times Breite) zueinander eingestellt werden, um an allen Achsen den gleichen minimalen Reifeninnendruck zu erreichen.

Am Beispiel einer typischen Reifenkombination, 650/65R38 hinten und 540/65R28 vorne, für einen Mittelklasse-Standardtraktor (140 kW) zeigt sich die sensible Abhängigkeit von Achslastverteilung und minimalen Reifeninnendrücken. In Abbildung 2 sind die erlaubten Achslasten über den notwendigen Reifeninnendruck für Reifen der Michelin Multibib Serie (MICHELIN 2018) beim Einsatz in der schweren Bodenbearbeitung (7 km/h) dargestellt. Um die installierte Antriebsleistung in Zugleistung wandeln zu können, wird eine Fahrzeugmasse von 11.000 kg angesetzt. Entsprechend dem

Verhältnis der projizierten Aufstandsflächen der genannten Reifenkombination ergibt sich eine ideale prozentuale Achslastverteilung von vorne/hinten = 39%/61%. Für drei verschiedene prozentuale Achslastverteilungen (vorne/hinten = 50%/50%; 40%/60%; 30%/70%) sind die resultierenden Achslasten und zugehörigen minimalen Reifeninnendrücken gekennzeichnet. Für die nahezu optimale Ballastierung von 40%/60% dürfen an beiden Achsen gleiche minimale Reifeninnendrücke von ca. 0,9 bar eingestellt werden. Bei Verlassen des Bereichs der empfohlenen Ballastierung nehmen die Reifeninnendrücke einer Achse stark zu, während die andere Achse so stark entlastet wird, dass der theoretische Reifeninnendruck an die Grenze oder sogar unterhalb des minimal zulässigen Reifeninnendrucks sinkt. Um den Reifen an der Grenze seiner maximalen Tragfähigkeit betreiben zu können, also den Druck auf den minimal zulässigen Wert abzulassen, ist die Kenntnis der aktuellen vertikal wirkenden Reifenkraft notwendig.

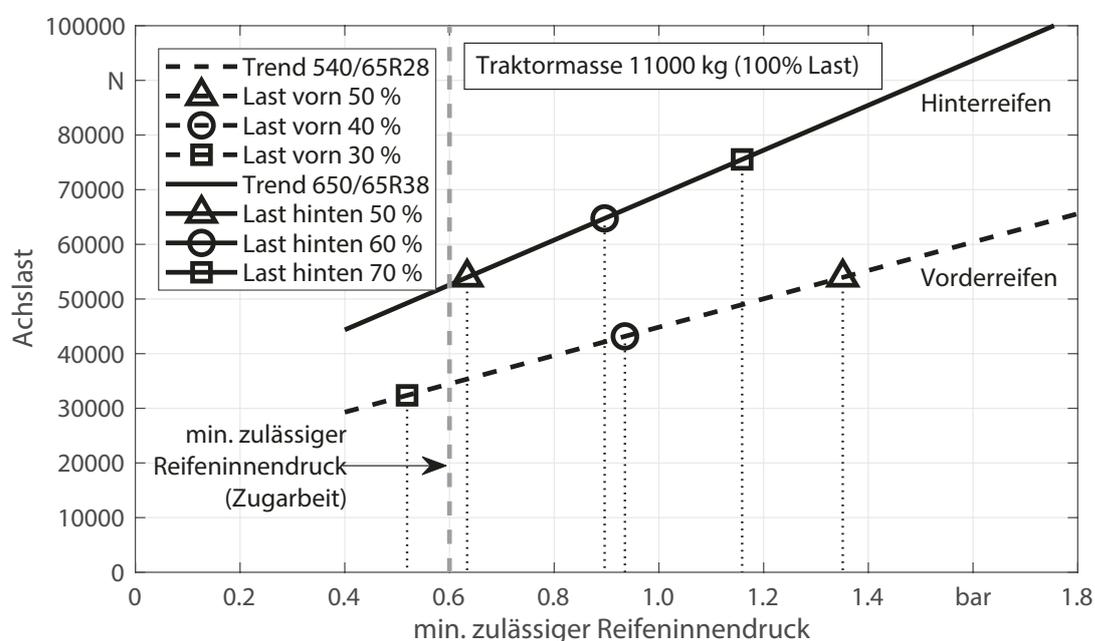


Abbildung 2: Entwicklung der Achslasten (Addition von 2 Reifen) und zugehörigen minimalen Reifeninnendrücke für unterschiedliche Achslastverhältnisse am Beispiel eines Mittelklasse-Standardtraktors mit den Reifen Michelin Multibib

Zur Ermittlung von Achslasten sind ortsgebundene, stationäre Reifen- oder Achslastwiegesysteme bekannt. Die im Stand ermittelten Achslasten werden jedoch im Arbeitsprozess durch dynamische Zug- und Stützkkräfte, die von einem Anbaugerät auf den Traktor übertragen werden, verändert. Es kann sowohl durch Zugkräfte die Achslastverteilung variiert als auch durch Stützkkräfte die wirksame Fahrzeugmasse erhöht werden. Weiterhin bewirken Einflüsse aus Steigungen in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs eine Änderung der Kraftverteilung auf die Räder. Zur permanenten Erfassung der dynamischen vertikalen Reifenkräfte wird eine in den Traktoraufbau integrierte Messvorrichtung benötigt (PICHLMAIER 2012, WIECKHORST et al. 2015). Aus den Echtzeitmessdaten werden während des Arbeitsprozesses Strategien für die Fahrzeugballastierung und Reifeninnendruckein-

stellung abgeleitet, um jederzeit eine optimale Bodenschonung zu erreichen und gleichzeitig eine Überlastsicherung für die Fahrzeugreifen zu gewährleisten.

Stand der Technik und Systembetrachtung

Die vertikalen Reifenkräfte können mithilfe des Maschinenschwerpunktes und der angreifenden Kräfte durch Ballastierungen und Anbaugeräte ermittelt werden. Durch die Vielfalt der möglichen Anbauräume und Schnittstellen für Geräte und Gewichte am Traktor wären bei dieser Ermittlungsmethode jedoch auch entsprechend viele Messstellen zur Erfassung der Einzelkräfte notwendig. Sämtliche am Traktor angreifenden Kräfte werden über die Kontaktflächen der Reifen oder Laufwerke auf dem Boden abgestützt. Um die Fahrzeugmasse und das Achslastverhältnis zu bestimmen, ist die sensorische Ermittlung der wirkenden vertikalen Aufstandskräfte aufgrund der reduzierten Anzahl notwendiger Messstellen zu bevorzugen. Bei Land- und Baumaschinen wurde die Erfassung der vertikalen Radkräfte in den letzten 10 Jahren besonders untersucht. Es sind bereits mehrere in die Fahrzeugstruktur integrierte Messsysteme aus Patentschriften und in der Anwendung bekannt. Die Verwendung eines solchen Messaufbaus in Serientraktoren ist aber bislang nicht bekannt.

Für gefederte Achsen sind Verfahren bekannt, welche den Belastungszustand des hydraulischen, pneumatischen oder hydropneumatischen Federungssystems erfassen. Durch Ermittlung von anliegenden Drücken auf der Kolben- und Ringseite des Federungszyinders können über die aktiven Kolben- und Ringflächen Kräfte berechnet und zueinander ins Verhältnis gesetzt werden. In DE10029332B4 (CONTINENTAL AG 2000) wurde das System für pneumatische Federbälge von Lastkraftwagen und Anhängern vorgestellt. PICHLMAIER (2012) und DE102015206369A1 (DEERE & COMPANY 2015) zeigen die Achslastermittlung durch Druckmessung am Federungszyinder für gefederte Traktorachsen. Für pendelnd gelagerte, ungefederte Achsen kann der Pendelbolzen oder die achsseitige Pendelbolzenaufnahme als Scherkraft- oder Normkraftaufnehmer gestaltet werden. Beide Bauteile liegen im Kraftfluss der wirkenden Achslast und eignen sich somit besonders gut zur Anordnung einer Achslastsensorik. Diese Systeme sind aus Gegengewichtsgabelstaplern bekannt, (z. B. in DE102006028551A1 (LINDE MATERIAL HANDLING GMBH 2006).

Abbildung 3 zeigt die Einbaulagen von Sensoren zur Erfassung von Radlasten an starren Achsen. In DE 102009025494 A1 (GRASDORF WENNEKAMP GMBH 2009) wurde ein Verfahren zur Abstandsmessung zwischen Reifenfelge und Reifenlatsch mit Ultraschalltechnologie vorgestellt (Abbildung 3, Pos. 1). Über spezielle Tabellenwerke vom Reifenhersteller und mit bekannten Reifeninnendrücken sowie der Temperatur kann aus der Distanz zwischen Felge und Reifenlatsch eine Radlast ermittelt werden. SPÄTH (2004) hat im Rahmen seiner Dissertation Messfelgen entwickelt und aufgebaut, welche die auf das Rad wirkenden Kräfte in allen 3 Raumrichtungen erfassen (Abbildung 3, Pos. 2). Kistler Instrumente GmbH bietet Messfelgen an, die zur Erfassung von Kräften und Drehmomenten für alle 3 Raumrichtungen direkt am Rad geeignet sind (SCHULZE ZUMKLEY und BÖTTINGER 2009) (Abbildung 3, Pos. 2). In WO2017/042265A1 (AGCO INT. GMBH 2016) wird mithilfe von Abstandssensorik die Distanz zwischen dem Achsgehäuse und dem Radflansch gemessen, um daraus auf die Radlast zu schließen (Abbildung 3, Pos. 3). In WO 2013/104981 A1 (AGCO INT. GMBH 2013a) und REMPFER (2003) werden Erfassungsmethoden für starre Achsen mithilfe von Dehnungsmessstreifen beschrieben, die die resultierenden Bauteilverformungen aus vertikalen Radbelastungen im Achsgehäuse erfassen (Abbildung 3, Pos. 4). In Teleskopladern wird für eine Umsturzwarnung die Verformung eines Achsgehäuses durch die wirkende Radlast mithilfe von kapazitiven Abstandssensoren gemessen (EBE

ELEKTRO-BAU-ELEMENTE GMBH 2018). In DE102013110311A1 (CLAAS TRACTOR SAS 2013) und WIECKHORST et al. (2015) wird ein Sensor zur Messung von Kräften und Drehmomenten vorgestellt, welcher zur Erfassung von Traktionsparametern am Rad genutzt wird (Abbildung 3, Pos. 5). Das Messprinzip beruht auf der passiven Magnetostriktion. Der Sensor wird im oder vor dem Achsgehäuse eingebaut und auf die Antriebswelle zum Rad ausgerichtet.

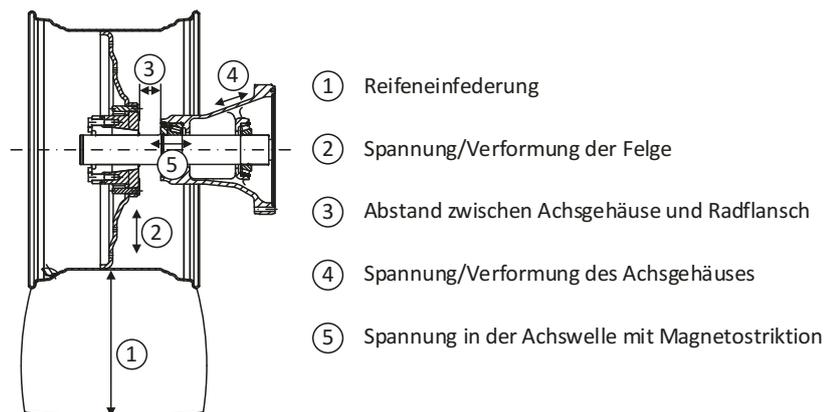


Abbildung 3: Mögliche Einbaulagen und Prinzipien von Sensoren zur vertikalen Radlast erfassung an Starrachsen

Allen aufgeführten Messprinzipien für Starrachsen ist gemein, dass der Spannungseintrag in ein Bauteil über eine Verformungsmessung oder Magnetfeldänderungen erfasst wird. Die Messgröße ist proportional zur Änderung der Aufstandskraft, muss aber durch eine Kalibrierfunktion umgerechnet werden. Abhängig von der Lage der Messstelle gegenüber der Krafteinleitungsstelle in der Kontaktfläche Reifen/Boden gibt es mehrere Stör- und Einflussgrößen, welche die Anwendung einer Kalibrierfunktion erschweren. In WO2014/000932A1 (AGCO INT. GMBH 2013b) werden die Herausforderungen bei der Kalibrierung von Achs- und Radlastsensoren speziell für die Lage der Messstelle am Achstrichter beschrieben (Abbildung 3, Pos. 4), die Problemstellung kann jedoch auf die anderen Messstellen an Starrachsen direkt übertragen werden. Dabei wird von einem linearen Zusammenhang zwischen der Änderung der Aufstandskraft und der Messgröße ausgegangen. Die Massen aller Bauteile zwischen der Messstelle und der Krafteinleitungsstelle müssen zudem als Konstante aufaddiert werden. Abbildung 4 zeigt die Auswirkungen auf die Kalibrierfunktion aus unterschiedlichen Störeinflüssen. Durch die Variation der Reifen-Felgen-Kombination, die Anbringung von Radgewichten (Befestigung an Radbolzen) oder die Nutzung von Wasserballast in den Reifen wird der konstante Lastanteil in der Kalibrierfunktion beeinflusst. Für die Messstellen an Pos. 3–5 (Abbildung 3) entsteht durch den Hebelarm zwischen Krafteinleitungsstelle und Messstelle durch die mögliche Spurbreitenverstellung ein Einflussfaktor, der die Steigung der Kalibrierfunktion verändert. Die Verwendung von Zwillingsbereifung erfordert für die Messprinzipien 1 und 2 (Abbildung 3) zusätzliche Messtechnik an den zusätzlichen Rädern, für die Messprinzipien 3–5 ändern sich sowohl der konstante als auch der lineare Anteil der Kalibrierfunktion.

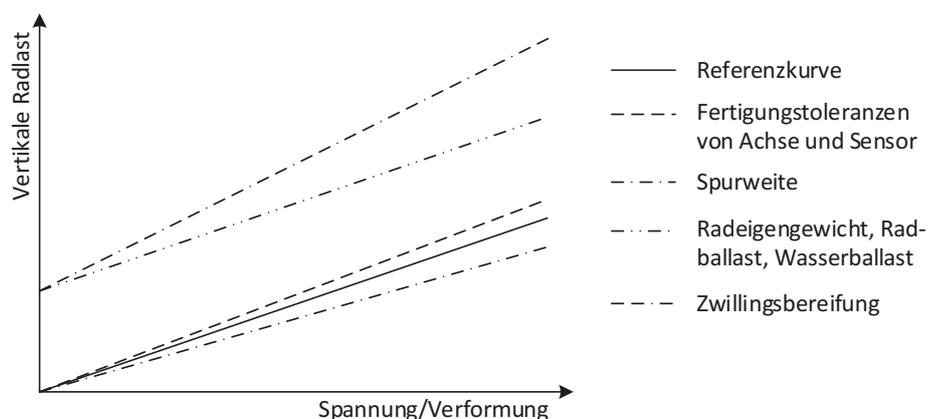


Abbildung 4: Auswirkungen von Störeinflüssen zwischen Kräfteinleitungsstelle und Radlastsensor auf die Kalibrierfunktion, nach AGCO INT. GMBH (2013b)

Verwendete Messprinzipien zur dynamischen Achslasterfassung

Wie bereits erwähnt, können zur Achslastermittlung an gefederten Achsen die Drücke im Federungs-system in Kombination mit den bekannten Abmessungen des Federungszyinders genutzt werden. Die Anzahl von notwendigen Drucksensoren richtet sich nach der Anzahl der verwendeten Federungs-zyinder, somit auch nach dem kinematischen Aufbau der Achse sowie der hydraulischen oder pneumatischen Verschaltung der Zylinder. Die möglichen hydraulischen Schaltungen für Federungs-systeme beschreibt BAUER (2008). Für hydraulisch oder hydropneumatisch vorgespannte Systeme werden für jede Kammer eines Federungszyinders unabhängige Drucksensoren verwendet. Abbil-dung 5 zeigt den Aufbau einer gefederten Achse mit einem vorgespannten, zentral angeordneten Federungszyinder.



Abbildung 5: Aufbau einer hydropneumatisch gefederten Achse mit einem Federungszyinder mit Druckmesstechnik

Nach Gleichung 1 und 2 können zwei entgegengerichtete Kräfte für die Zylinderkammern berech-net werden und aus der Differenz der beiden Kräfte die resultierende Zylinderkraft ermittelt werden (Gleichung 3).

$$F_{RC} = p_{RC} \cdot A_{RC} \quad (\text{Gl. 1})$$

$$F_{PC} = p_{PC} \cdot A_{PC} \quad (\text{Gl. 2})$$

$$F_{Cyl} = F_{PC} - F_{RC} \quad (\text{Gl. 3})$$

Um aus der Zylinderkraft auf die wirkende Achslast schließen zu können, müssen die ungefederten Massen auf die berechnete Zylinderkraft aufaddiert werden. Da der Federungszyylinder in der Achse aus Abbildung 5 direkt zwischen dem Achskörper und dem Traktorrahmen angeordnet ist und die gesamte Vertikalkraft über den Zylinder übertragen wird, ist die Zylinderkraft direkt proportional zur Radkraftsumme.

$$F_{Cons} = (m_{axle} + m_{tires}) \cdot g \quad (\text{Gl. 4})$$

$$F_{Axle} = F_{Cyl} + F_{Const} \quad (\text{Gl. 5})$$

Zur Erfassung von Bauteilspannungen an starren Achsen kann neben Dehnungsmessstreifen auch das Prinzip der Magnetostraktion genutzt werden. In ferromagnetischen Bauteilen kommt es durch die Kristallgitterstruktur zur Ausbildung von zusammenhängenden Bereichen mit einer gemeinsamen magnetischen Vorzugsrichtung, bezeichnet als weißsche Bezirke. Die Orientierung der weißschen Bezirke in einem unbelasteten Bauteil, an dem kein Magnetfeld anliegt, ist idealerweise chaotisch. Infolge von Bearbeitungsprozessen des Bauteils kann sich jedoch auch eine Mehrzahl der Bezirke in gleiche oder ähnliche Richtungen orientieren, das Bauteil besitzt dann eine Eigenmagnetisierung. Beim Anlegen eines Magnetfeldes richten sich die weißschen Bezirke in dem ferromagnetischen Bauteil neu aus, vorzugsweise in Richtung des anliegenden Magnetflusses. Es stellt sich eine Längenänderung des Bauteils in Richtung des magnetischen Flusses ein (Abbildung 6). Dies wird durch den Joule-Effekt beschrieben. Umgekehrt führt auch die Längenänderung eines Bauteils infolge einer Belastung zu einer bedingten Neuausrichtung der weißschen Bezirke entlang der Hauptspannungsrichtung. Dies wird durch den Villari-Effekt beschrieben. Die Neuausrichtung der weißschen Bezirke führt zu einer Änderung der Magnetfeldstärke eines von außen ans Bauteil angelegten Magnetfeldes. Der Villari-Effekt wird ausgenutzt, um die Bauteilspannung zu bewerten und eine anliegende Belastung zu quantifizieren (HERING 2012).

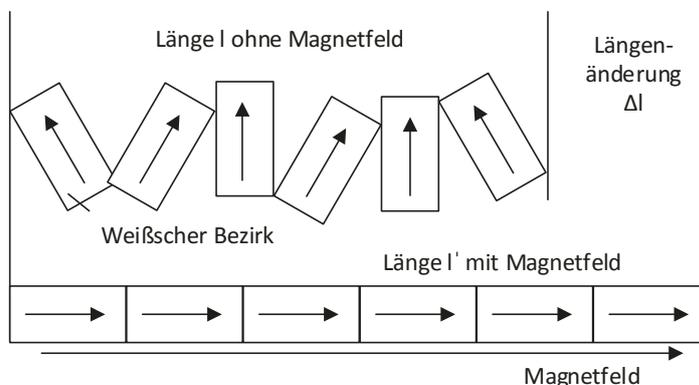


Abbildung 6: Joule-Effekt: Längenänderung eines ferromagnetischen Bauteils in Folge eines anliegenden Magnetfeldes (HERING 2012)

Ein magnetostriktiver Sensor besteht aus 2 Elementen. Das primäre Sensorelement ist das Bauteil, von welchem die Bauteilspannung bestimmt werden soll, das sekundäre Sensorelement ist der Sensorkopf. Das benötigte magnetische Feld kann entweder in das Bauteil eingeprägt werden, dann wird von passiver Magnetostriktion gesprochen, oder von außen mithilfe einer in den Sensorkopf integrierten Feldspule erzeugt werden, dies wird als aktive Magnetostriktion bezeichnet. Die Intensität des Magnetfeldes wird durch mehrere Spulen im Sensorkopf erfasst.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft den Aufbau eines aktiven magnetostriktiven Sensorkopfes in der Draufsicht, der orthogonal zu einer ferromagnetischen Welle ausgerichtet ist. Im Sensorkopf befindet sich mittig die Feldspule zur Erzeugung eines magnetischen Feldes. Am Umfang des Sensorkopfes sind um 90° versetzt vier Sensorspulen angeordnet, die das magnetische Feld zurückkoppeln, sodass eine Jochwirkung zwischen Feldspule und Sensorspule erzeugt wird. Um eine Magnetfeldänderung infolge einer Bauteilspannung messen und quantifizieren zu können, werden die Signale, hier H_1 und H_2 , zweier benachbarter Messspulen miteinander verglichen.

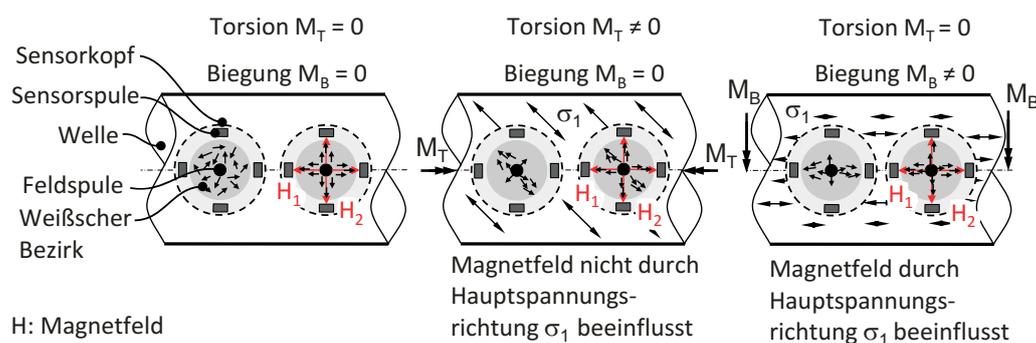


Abbildung 7: Funktion eines magnetostriktiven Sensors für Biegespannungen

Je nach Ausrichtung des Sensorkopfes können Biege- oder Torsionsbeanspruchungen gemessen werden. Dazu wird der Sensorkopf so um seine Längsachse gedreht, dass zwei gegenüberliegende Messspulen entlang der Hauptspannungsrichtung σ_1 der gewünschten Beanspruchung angeordnet sind. Abbildung 7 zeigt die Ausrichtung des Sensorkopfes zur Messung von Biegebeanspruchungen. Mithilfe von drei verschiedenen Belastungssituationen für die Welle wird gezeigt, dass der Sensor die eindeutige Messung der Biegebeanspruchung ermöglicht, während die Torsionsbeanspruchung automatisch kompensiert wird. Links ist eine unbelastete Welle dargestellt, mittig eine tordierte Welle und rechts eine biegebeanspruchte Welle. Für jede Situation sind am linken Sensorkopf die Ausrichtungen von weißchen Bezirken in der Welle in Folge der Beanspruchung dargestellt, am rechten Sensorkopf wird die Beanspruchung mit einem Magnetfeld der Sensorfeldspule überlagert.

Für den Fall der unbelasteten Welle (Abbildung 7, links) richten sich die weißchen Bezirke entlang des durch die Feldspule eingekoppelten Magnetfeldes aus. Da sich gleichmäßig viele Bezirke zwischen der Feldspule und jeder Sensorspule ausrichten, sind die Feldstärken an jeder Sensorspule gleich, das Potenzial zwischen den benachbarten Spulen ist somit Null. Im Fall einer rein tordierten Welle (Abbildung 7, Mitte) richten sich die weißchen Bezirke zunächst entlang der Hauptspannungsrichtung σ_1 aus, um 45° gegenüber der Längsachse des Bauteils verdreht. Wird ein zusätzliches

Magnetfeld über die Feldspule eingekoppelt, richten sich wenige Bezirke neu in Richtung der Magnetfelder H_1 und H_2 aus. Da die Hauptspannungsrichtung genau zwischen den Sensorspulen verläuft, kommt es wieder zu einer gleichmäßigen Neuausrichtung für die Magnetfeldrichtungen H_1 und H_2 . Es kann auch für diesen Fall kein Potenzial zwischen den Sensorspulen gemessen werden. Für die biegebeanspruchte Welle (Abbildung 7, rechts) richten sich die weißschen Bezirke wie im vorherigen Fall zunächst entsprechend der Hauptspannungsrichtung aus, in diesem Fall in Längsrichtung des Bauteils. Wird nun das zusätzliche Magnetfeld durch die Feldspule eingekoppelt, stabilisiert sich die Ausrichtung der weißschen Bezirke entlang der Achse H_1 , nur wenige Bezirke richten sich neu in die orthogonale Richtung H_2 aus. Es kann nun für diesen Fall ein Potenzial zwischen den beiden Sensorspulen gemessen werden.

Messaufbau

Um die tatsächliche Aufstandskraft einer gefederten Achse aus der Zylinderkraft abzuleiten, die über Zylinderdrücke ermittelt wurde, müssen die ungefederten Massen des Achskörpers und der Reifen nach Gleichung 4 und 5 aufaddiert werden. Die Ermittlung der Zylinderkraft wird durch Reibungseinflüsse von Dichtringen zwischen Zylinderstange und Zylindergehäuse sowie dem Zylinderkolben und Zylindergehäuse gestört. Für die statische Achslastermittlung kann der Messwert durch den Stick-Slip-Effekt dieser Dichtungen beeinflusst werden, der durch eine ausreichende Schmierung jedoch minimal gehalten werden kann. Zusätzlich zur Reibung am Zylinder kommt es je nach Achskonstruktion zu Reibung in mehreren Gelenken, welche die gewünschte Federungskinematik erlauben. Im vorliegenden Achskonzept nach Abbildung 5 spielen die Gelenkreibungen gegenüber den Zylinderreibungen nur eine untergeordnete Rolle, da der Zylinder die Gewichtskraft des Vorderbaus des Traktors trägt und die Schwingen der Achskinematik nur das Eigengewicht der Bauteile tragen. Ein weiterer Fehlereinfluss auf die ermittelte Achslast tritt während der Fahrt mit eingeschaltetem Allradantrieb auf, da die Achse dann auch Zugkräfte aufnehmen muss und es eine Verspannung in der Achskinematik gibt, welche die Gelenkreibung erhöht. PICHLMAYER (2012) beziffert den Fehlereinfluss von Reibungseffekten für ein in seinem Aufbau verwendetes Einzelrad-Federungssystem auf die gemessene Rad-/Achslast auf 0,25%. Durch stetige Anregung des Zylinders während der Fahrt wird für den dynamischen Fall von noch geringeren Einflüssen ausgegangen.

Als Weiterentwicklung der von WIECKHORST et al. (2015) präsentierten passiven magnetostriktiven Sensoren werden im integrierten Radlastwiegesystem aktive magnetostriktive Sensoren in den starren Hinterachsen verwendet. Bei der aktiven Sensortechnologie entfällt die magnetische Codierung des primären Sensorelements, in diesem Fall der Achswelle, weil das Magnetfeld von außen eingekoppelt wird. Dies stellt einen entscheidenden Vorteil für den industrialisierten Einsatz des Messkonzepts dar. Das als primäres Sensorelement genutzte Bauteil muss aus ferromagnetischem Material sein, eine bestimmte Oberflächenhärtung aufweisen und sollte über den gesamten Umfang entmagnetisiert werden. Eigenmagnetisierungen im Bauteil beeinflussen die Ausbildung des von außen eingekoppelten Magnetfeldes und verschlechtern somit das Messsignal. Mithilfe eines Absolutwinkelsensors können ungleichmäßig auftretende Restmagnetisierungen über den Umfang winkelbasiert kompensiert werden und es wird eine genaue Radlastmessung im Stillstand möglich. Ein im Sensorkopf integrierter Abstandssensor ermöglicht die Kompensation von Unrundheiten sowie der lastabhängigen Durchbiegung der Achswelle. Abbildung 8 zeigt die Einbaulage vor dem Achstrichter direkt oberhalb des Scheitelpunktes der Welle, welche für eine automatische Kompensation

der ebenfalls an der Achswelle auftretenden Biegebeanspruchungen infolge von Zugkräften sorgt, da der Sensor in der neutralen Phase für diese Spannungen liegt. Das intelligente Sensordesign kompensiert – prinzipbedingt wie zuvor beschrieben – die durch das anliegende Antriebsmoment zum Rad auftretenden Torsionsbeanspruchungen.

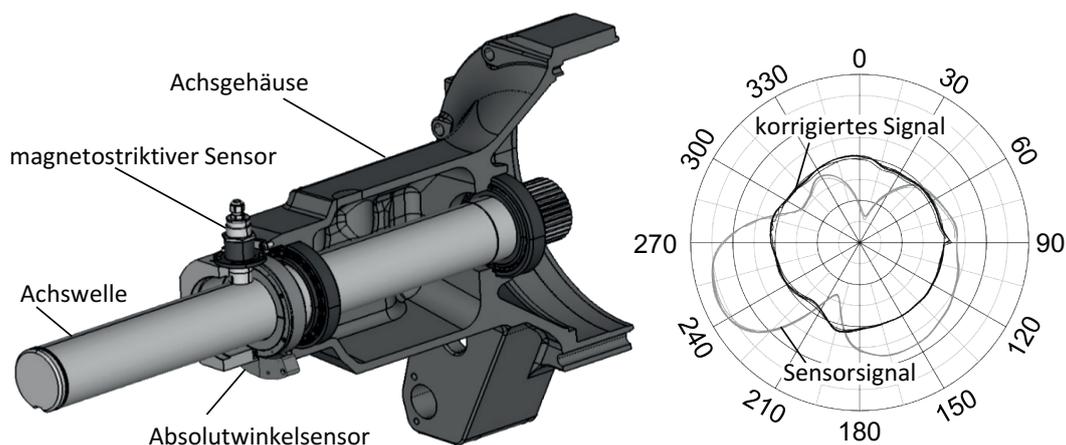


Abbildung 8: Sensoranordnung an der Hinterachse und Signalkorrektur mittels Absolutwinkelsensor

Für die integrierte Achslastmessung wird der aktive magnetostriktive Sensor an der starren Hinterachse in das Achsgehäuse oder als Nachrüstlösung in eine Aufnahme vor dem Achsgehäuse eingesetzt, sodass er von oben auf die Achswelle ausgerichtet ist. Ein Absolutwinkelsensor wird auf beiden Seiten auf die Achswellen aufgeschraubt. Die Drucksensoren zur Ermittlung der Vorderachslast können in den Rohrleitungen zum Federungszyylinder oder am Hydraulikventilblock angebracht werden. Das Messsystem wird durch Neigungssensoren auf dem Traktorrumpf vervollständigt, welche die Neigung der Maschine in Längs- und Querrichtung bestimmen.

Validierung

Im Messsystem für gefederte Achsen wird zwischen der realen Achslast und der berechneten Zylinderkraft nach Gleichung 5 eine Abweichung erwartet, die aus den ungefederten Massen von Reifen und Achskörper resultiert, sowie ein weiterer Anteil, der aus Reibungseinflüssen entsteht. Zur Validierung des Messsystems wurde ein CLAAS Axion 840 mit Messfelgen der Firma Kistler ausgestattet, welche u. a. die Messung von Vertikalkräften während der Fahrt ermöglichen. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Radlastsumme des linken und rechten Vorderrades sowie der mittels Gleichung 3 berechneten Zylinderkraft im Federungszyylinder der Vorderachse für mehrere aufeinanderfolgende Arbeitsfahrten mit einem 6-Schar-Anbaupflug. Die einzelnen Arbeitsfahrten werden durch Wendemanöver unterteilt, je zwei entgegengesetzte Arbeitsfahrten werden mit den beiden davor ablaufenden Wendemanövern zu einem Zyklus zusammengefasst. Für jeden Zyklus ist erkennbar, dass die Vorderachslast für die entgegengesetzten Arbeitsfahrten unterschiedlich ist, bedingt durch eine Neigung des Feldes in Fahrzeuggängsrichtung. Über alle Zyklen hinweg stellt sich eine näherungsweise konstante Abweichung zwischen dem Zylinderkraftsignal und den tatsächlichen Aufstandskräften ein, womit die Theorie entsprechend der Gleichungen 4 und 5 bestätigt wird. Zur Achslastermittlung an der Vorderachse im Stillstand haben Versuche gezeigt, dass eine Anregung des Federungszylin-

ders, durch Deaktivieren und erneutes Aktivieren der Niveauregulierung, den Fehlereinfluss des Stick-Slip-Effekts auf die ermittelte Achslast minimiert.

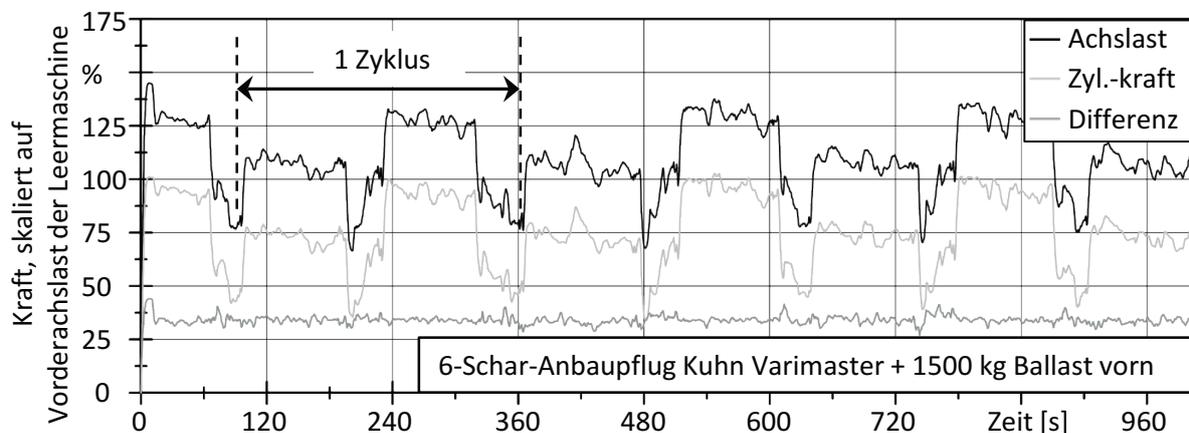


Abbildung 9: Differenz der Vorderachslast und der berechneten Zylinderkraft, gemessen an einem Claas Axion

Um die Radlastsensorik an der Hinterachse zu validieren, wurde zunächst ein vereinfachter Aufbau auf einem CLAAS Arion 550 ohne Absolutwinkelsensorik nur auf der rechten Maschinenseite installiert. Zur Kalibrierung des Sensorsignals wurden unterschiedliche Radlastzustände durch Ballastierung erzeugt und mithilfe einer Radlastwaage bestimmt. Anschließend wurde für jeden Radlastzustand der Mittelwert der Sensorwerte bei sehr langsamer, konstanter Geradeausfahrt (ca. 2 km/h) über mehrere Radumdrehungen auf einer ebenen Fahrbahn aufgenommen und mit dem statischen Gewicht der Radlastwaage abgeglichen. So wurden dynamische Einflüsse aus der Wellenrotation für längere Messungen gefiltert.

In Feldtests konnte das Verhalten des Sensors bei der Bodenbearbeitung mit einem aufgesattelten Grubber untersucht werden. Wegen fehlender Referenzmesstechnik am Rad konnten die sensorisch ermittelten Radlastverläufe zunächst nur qualitativ überprüft werden. Abbildung 10 zeigt den Messschrieb der Radlast für mehrere Arbeitsfahrten. Die einzelnen Arbeitsfahrten wurden durch Wendemanöver unterbrochen, im Wendemanöver fiel die Geschwindigkeit auf Werte kleiner 5 km/h. Zum Wenden wurde der Grubber ausgehoben, vor allem die dadurch wegfallenden Zugkräfte sorgten für eine Verlagerung der Achslasten, wobei die Hinterachse dadurch entlastet und die Vorderachse belastet wurde. Die Entlastung der Hinterachse ist für die Wendemanöver deutlich im Messschrieb zu erkennen. Die Zunahme der Hinterradlast um 30–40% während der Arbeitsfahrt gegenüber dem Wendevorgang sind durch die entstehende Achslastverlagerung und die Übertragung von vertikalen Stützkraften des Grubbers auf den Traktor als realistisch anzunehmen.

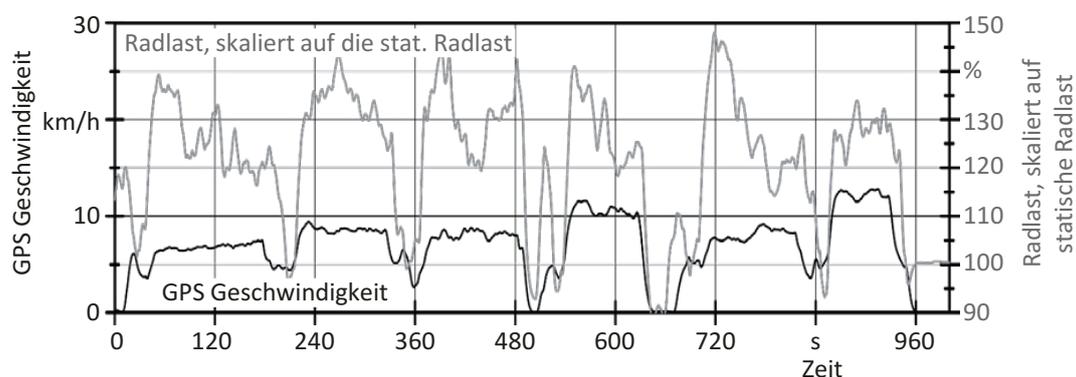


Abbildung 10: Radlast an der Hinterachse rechtsseitig am Claas Arion 550 bei einer Arbeitsfahrt mit aufgesatteltem Grubber und 900 kg Frontgewicht

Schlussfolgerungen

Um einen bodenschonenden Einsatz von Traktoren auf landwirtschaftlichen Böden zu ermöglichen, müssen die Fahrzeugmasse und Reifeninnendrucke möglichst gering eingestellt und aufeinander abgestimmt werden. Die gezielte Aufteilung der Fahrzeugmasse auf die Räder nach dem Verhältnis der projizierten Aufstandsflächen erlaubt die Einstellung des gleichen Reifeninnendrucks an allen Reifen. Um die resultierenden Reifenkräfte im Arbeitseinsatz permanent bestimmen zu können, ist ein in die Fahrzeugstruktur integriertes Radlastmesssystem notwendig. Für einen Standardtraktor mit hydropneumatisch gefederter Vorderachse wurde ein Messsystem mithilfe von Drucksensoren an der gefederten Achse und magnetostriktiven Sensoren für die starre Achse entwickelt. Die Bestimmung der Vorachslast mit diesem Messsystem konnte bereits über Referenzmesstechnik validiert werden. An der Hinterachse wurde für das Messsystem eine Kalibriergerade in statischen Versuchen ermittelt, der Messwertverlauf im anschließenden Feldversuch wurde über Erfahrungs- und Erwartungswerte verifiziert. Eine Validierung der Hinterradlastmessung mithilfe von Referenzmesstechnik steht noch aus.

Für die magnetostriktive Spannungsermittlung, aber auch bei anderen Radlastmessmethoden an Starrachsen, müssen viele Störeinflüsse berücksichtigt werden. Wird der Traktor mit Radballast oder Zwillingsbereifung ausgestattet, müssen unterschiedliche Kalibrierfunktionen genutzt werden. Zudem muss die eingestellte Spurweite und die verwendete Reifen-Felgen-Kombination bekannt sein. Sofern die notwendigen Informationen nicht sensorisch erfasst werden, ist eine Eingabeaufforderung für den Traktoranwender in einem Bedienterminal vorzusehen. Über hinterlegte Radlast-Reifendruck-Tabellen ist es mit den bekannten Radkräften möglich, die Reifen mit einer Reifendruckregelanlage jederzeit an seiner Tragfähigkeitsgrenze zu betreiben und einen bodenschonenden Maschineneinsatz zu gewährleisten.

Literatur

AGCO International GmbH (2013a): WO 2013/104981 A1. Stoiber, M.; Fries, S.; Würtele, E.

AGCO International GmbH (2013b): WO 2014/000932 A1. Buchner, T.; Stoiber, M.

AGCO International GmbH (2016): WO 2017/042265 A1. Müller, T.

Bauer, W. (2008): Hydropneumatische Federungssysteme, Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag

- Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) (2002): Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion. https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Broschuere_GfP_Bodenschutz.pdf, Zugriff am 04.04.2018
- CLAAS Tractor SAS (2013): DE 102013110311 A1. Wieckhorst, J.; Fedde, T.; Kloster, V.
- Continental AG (2000): DE 10029332 B4. Grünberg, H.; Hartmann, K.-H.; Maßmann, C.; Stahmer, R.
- Deere & Company (2015): DE 102015206369 A1. Traut, S.; Meid, M.; Wolf, G.
- EBE Elektro-Bau-Elemente GmbH (2018): Overload Warning. Monitoring of the tilt moment of commercial vehicles. http://www.ebe-gmbh.de/resources/load/Overload_warning_EN.pdf, Zugriff am 05.04.2018
- Grasdorf Wennekamp GmbH (2009): DE 102009025494 A1
- Hering, E. (Hg.) (2012): Sensoren in Wissenschaft und Technik – Funktionsweise und Einsatzgebiete. Wiesbaden, Vieweg + Teubner
- Herlitzius, T.; Grosa, A.; Henke, M.; Krzywinski, J.; Pahner, F.; Klingner, M. (2013): Concept Study of a Modular and Scalable Self-Propelled Implement System. In: Conference Agricultural Engineering 2013, VDI-MEG, 08.11.-09.11.2013, Hannover, VDI-Verlag, pp. 37–45
- Linde Material Handling GmbH (2006): DE 102006028551 A1. Adami, P.; Hanke, M.; Hartmann, H.
- Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA (2018): Technische Daten Michelin Multibib. <http://landwirtschaft.michelin.de/de/content/download/2670/49781/file/MULTIBIB-DE.pdf>, Zugriff am 05.04.2018
- Pichlmaier, B. R. (2012): Traktionsmanagement für Traktoren. Dissertation, Technische Universität München
- Rempfer, M. (2003): Grundlagen der automatischen Reifenluftdruckverstellung bei Traktoren. Dissertation, Technische Universität München
- Renius, K. T.; Knechtges, H. J. (2009): Traktoren 2007 bis 2009. *ATZoffhighway* 2(2), S. 6–19, <https://doi.org/10.1007/BF03223648>
- Schulze Zumkley, H.; Böttinger, S. (2009): Modular measuring wheels for high horsepower tractors. In: Conference Agricultural Engineering 2009, VDI-MEG, 06.11.-07.11.2009, Hannover, VDI-Verlag, pp. 33–40
- Späth, R. (2004): Dynamische Kräfte an Standardtraktoren und ihre Wirkungen auf den Rumpf. Dissertation, Technische Universität München
- Stettler, M.; Keller, T.; Weisskopf, P.; Lamandé, M.; Lassen, P.; Schjønnig, P. (2014): Terranimo® – ein webbasiertes Modell zur Abschätzung des Bodenverdichtungsrisikos. *LANDTECHNIK – Agricultural Engineering* 69(3), S. 132–138, <https://doi.org/10.1515/lt.2014.181>
- VDI-Richtlinie 6101 (2014): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- Wieckhorst, J.; Fedde, T.; Frerichs, L.; Fiedler, G. (2015): A Tractive Sensor. Integrated Measurement of Tire Soil Parameters for Tractors. In: Conference Agricultural Engineering 2015, VDI-MEG, 06.11.-07.11.2015, Hannover, VDI-Verlag, pp. 219–226

Autoren

M.Sc. Michael Peeters und **Dr.-Ing. Viktor Kloster** sind Mitarbeiter der Traktor Vorentwicklung, **Dr.-Ing. Thomas Fedde** ist Abteilungsleiter der Traktor Vorentwicklung, CLAAS Tractor, Halberstädter Straße 15-19, 33106 Paderborn, E-Mail: michael.peeters@claas.com.

Prof. Dr. Ludger Frerichs ist Institutsleiter am Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge der TU Braunschweig, Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig

Hinweise

Das Thema wurde auf der VDI-Tagung LAND.TECHNIK 2017, Hannover, 10.–11. November 2017, vorgestellt und eine Kurzfassung im VDI-Bericht Nr. 2300 veröffentlicht, S. 423–430.