

Reifen / Reifen-Boden-Interaktion

Alexander Bürger und Stefan Böttinger
Institut für Agrartechnik, Universität Hohenheim, Stuttgart

Kurzfassung

Es existieren unterschiedliche Herangehensweisen zur Optimierung der Reifen-Boden-Interaktion. Auf der einen Seite werden weiterhin neue verbesserte Reifen, Raupenlaufwerke und Maschinensysteme vorgestellt. Auf der anderen Seite entstehen vermehrt Systeme zur Optimierung vorhandener technischer Gegebenheiten mit dem Ziel, den Anwender zu entlasten und nötige Einstellungen zu automatisieren. Der Fortschritt in der Simulationstechnologie fördert außerdem das zur Optimierung benötigte Verständnis der Kraftübertragungsvorgänge zwischen Reifen und Boden.

Schlüsselwörter

Ackerschlepperreifen, Raupenlaufwerk, Reifenkennlinien, Reifenmodelle, Bodenmodelle, Traktion, Bodenverdichtung

Tyres / Tyre-Soil-Interaction

Alexander Bürger and Stefan Böttinger
Institute of Agricultural Engineering, University of Hohenheim, Stuttgart

Abstract

Different approaches for the optimisation of the tyre-soil-interaction exist. On the one hand, new improved tyres, tracks and machinery systems are introduced. On the other hand, systems for the optimisation of existing technical solutions are increasingly developed with the aim to relieve the driver and automatize required adjustments. Additionally, the progress in simulation technology boosts the required understanding of the force transmission between tyre and soil.

Keywords

Farm tractor tyres, rubber track, tyre performance, tyre modelling, soil modelling, traction, soil compaction

Entwicklungen

Die Entwicklung von Reifen und Raupenfahrwerken wird durch verschiedene Treiber beeinflusst. Hauptaufgabe von Reifen und Laufwerk an der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Boden bleibt weiterhin die effiziente Übertragung von Trieb-, Brems- und Seitenführungskräften. Ein gesteigertes Bewusstsein für den Einfluss schwerer Maschinen auf die Leistungsfähigkeit des Bodens sorgt für Entwicklungen im Bereich Bodenschonung. Da die gesetzlichen Anforderungen an die Schwingungsisolierung des Fahrers zunehmen, werden Reifen und Laufwerke in Bezug auf die Schwingungseinleitung in das Fahrzeug optimiert. Der allgemeine Trend der Digitalisierung erhält auch im Bereich von Reifen und Laufwerken Einzug. So werden beispielsweise Sensoren genutzt, um Informationen über den Zustand des Reifens oder des Laufwerks zu ermitteln oder diese in Regelungsprozesse zur Effizienzerhöhung einzubinden.

Michelin stellte zum bereits im letzten Jahrbuch vorgestellten [1] und auf der SIMA 2017 mit einer Goldmedaille prämierten Michelin EvoBib Reifen der Dimension 710/70 R 42 erste Messergebnisse im Vergleich mit einem Michelin MachXBib Reifen der gleichen Dimension vor [2]. Es zeigt sich bei gleicher Radlast und gleichem Reifeninnendruck eine Vergrößerung der Kontaktfläche um 20 %. Gleichzeitig nimmt der Triebkraftbeiwert κ im Schlupfbereich zwischen 5 und 15 % nach Herstellerangaben um 20 bis 50 % zu. Der innere Rollwiderstand des Michelin EvoBib ist durch die reduzierte Kontaktfläche bei Straßenfahrt um 15 % reduziert. Durch die zusätzlichen Stollen in der Reifenlängsebene werden außerdem weniger Schwingungen in das Fahrzeug eingeleitet und die Lenkstabilität erhöht. Um sein volles Potential nutzen zu können, wird für den EvoBib eine Reifendruckregelanlage benötigt. Durch die Übernahme der PTG Reifendruckregelsysteme GmbH ist Michelin in der Lage, vollständige Räder einschließlich einer integrierten Reifendruckregelanlage anzubieten [3]. Nokian zeigte auf der Agritechnica 2017 in Hannover mit dem Nokian Concept Tyre ein ähnliches Konzept [4].

Weiterhin bietet Michelin mit dem RoadBib einen Reifen speziell für hohe Anteile von Transportfahrten auf der Straße an, der auch ohne Reifendruckregelanlage den Rollwiderstand sowie die Schwingungsanregung reduziert [5]. Messungen der Fachhochschule Kiel zeigen unter guten Bodenbedingungen, dass diese sogenannten Industriereifen (Nokian TRI 2) auch bei schweren Zugarbeiten im gleichen Schlupfbereich arbeiten wie ein vergleichbarer Reifen mit gängigen Traktionsstollen (Trelleborg TM900 High Power) [6]. Damit haben die beiden verglichenen Reifen nahezu den gleichen Kraftstoffverbrauch. Vor allem in tieferen Bereichen reduziert sich durch den Industriereifen außerdem der Bodendruck.

Nach Übernahme von Mitas kündigte Trelleborg die Weiterentwicklung des PneuTrac mit Fokus auf Einsätze in Weinbergen und Obstplantagen an [7]. Dabei wird eine erhöhte Seitenstabilität vor allem bei Arbeiten am Hang im Vergleich zu Standardreifen betont. Auf der Agritechnica zeigte Continental erstmalig zwei neu entwickelte Reifenbaureihen mit Querschnittsverhältnissen von 70 % (Tractor 70) und 85 % (Tractor 85) [8]. Diese sind zurzeit in Dimensionen bis 520/70 R 38 und 520/85 R 38 erhältlich. Neben Continental steigt auch Pirelli wieder in den Markt der Landwirtschaftsreifen ein und hat mit dem PHP einen neuen Reifen mit einem breiten Angebotsspektrum zwischen 26 und 46 Zoll vorgestellt [9]. Vredestein entwickelt mit dem

Traxion Optimal seine VF-Technologie (very high flexion) für den Einsatz besonders an leistungsstarken Traktoren weiter. Bei gleicher Radlast und gleichem Reifeninnendruck besitzt dieser Reifen im Vergleich zu einem herkömmlichen VF-Reifen eine 15 % und im Vergleich zu einem IF-Reifen (increased flexion) eine 25 % größere Aufstandsfläche [10]. Dadurch werden die Traktion und die Flächenleistung erhöht sowie der Kraftstoffverbrauch reduziert.

Allgemein wird verstärkt das Potential von Reifen und Laufwerken zur Optimierung der Maschineneffizienz erkannt [11]. Neben neuen konstruktiven Ansätzen werden vermehrt Sensoren eingesetzt, um den Reifen-, Fahr- oder Bodenzustand zu erfassen. Temperatursensoren im Laufband des Raupenlaufwerkes können beispielsweise bei hohen Temperaturen Warnungen bezüglich des Verschleißes ausgeben [12]. Trelleborg hat mit ConnectTire einen in Reifen und Felge integrierten Sensor vorgestellt, der über Bluetooth oder Mobilfunk mit dem Fahrzeug kommuniziert [13]. Er erfasst kontinuierlich Reifeninnendruck und Temperatur und wird außerdem zur Überwachung des Schlupfes zwischen Reifen und Felge eingesetzt.



Bild 1: Verkürzung der Lauffläche zur Schonung der Grasnarbe bei Wendevorgängen [14]

Figure 1: Reduction of the bearing surface to prevent the turf from damage during turning [14]

Raupenlaufwerke bieten bei hohem Zugkraftbedarf Vorteile im Traktionsverhalten. Außerdem leisten sie durch ihre größeren Aufstandsflächen im Vergleich zu Reifen einen Beitrag zur Bodenschonung. Dies gilt nur für eine moderate Erhöhung der Gesamtmasse durch das zusätzliche Gewicht der Laufwerke. Auf der Agritechnica waren vermehrt Traktoren, selbstfahrende Erntemaschinen und Anhänger mit Raupenlaufwerken ausgestattet. Claas bietet neben Mähdreschern nun auch Feldhäcksler und Traktoren in der oberen Leistungsklasse mit dem Rau-

penlaufwerk TerraTrac an [15]. Um die Grasnarbe im Vorgewende beim Einsatz des Feldhäckslers im Grünland zu schonen, werden die Stützrollen beim Wenden belastet, um die vordere Umlenkrolle auszuheben, **Bild 1**. Dadurch wird die Aufstandsfläche verkürzt und ein Abscheren der Grasnarbe reduziert. Bodendruck und Scherung der Grasnarbe entsprechen bei ausgehobener Umlenkrolle in etwa einer vergleichbaren Bereifung. In einem Projekt mit Hawe hat Claas Industrietechnik außerdem einen Überladewagen mit einem angetriebenen Raupenlaufwerk ausgestattet [16]. Dieses Konzept wurde bereits 2015 vorgestellt und befindet sich nun in der Felderprobung. Fendt bietet im oberen Leistungsbereich Traktoren mit Vollraupen und hydrostatisch-leistungsverzweigten Getrieben an, um die Effizienzvorteile bei hohen Triebkraftbeiwerten (z.B. bei schwerer Bodenbearbeitung) zu nutzen [17].

Ein weiterer Ansatz, um die Effizienz der Reifen-Boden-Interaktion zu beeinflussen, ist die Optimierung bestehender Maschinenkombinationen und Laufwerkssysteme. John Deere wurde auf der Agritechnica für das EZ Ballast Wheel System mit einer Silbermedaille ausgezeichnet [18]. Das System ermöglicht einem einzelnen Bediener die werkzeuglose Montage von Gewichtsscheiben in den Vorder- und Hinterradfelgen. Dabei werden die Anbauräume an der Front und im Heck des Traktors nicht blockiert. Durch die Modularität der 250 kg Gewichte wird eine Ballastierung entsprechend des Einsatzzweckes ermöglicht, unnötige Bodenbelastung reduziert und die Traktion optimiert. Fendt hat mit dem VarioPull ein weiteres System zur Optimierung der Traktion und der Bodenschonung vorgestellt [19]. Dazu wird der Stützpunkt des aufgesattelten Gerätes bei der Arbeitsfahrt hydromechanisch zur Hinterachse hin verschoben. Diese Verschiebung resultiert in einer Reduktion der Entlastung der Vorderachse, **Bild 2**. Dadurch wird das vorhandene Einsatzgewicht des Traktors ohne zusätzliche Ballastgewichte besser zur Traktion eingesetzt. Claas präsentierte mit dem Cemos für Traktoren ein Fahrerassistenzsystem zur gesamtheitlichen Optimierung von Traktoren und Anbaugeräten bezüglich Leistung, Effizienz, Bodenschonung und Arbeitsqualität [20].

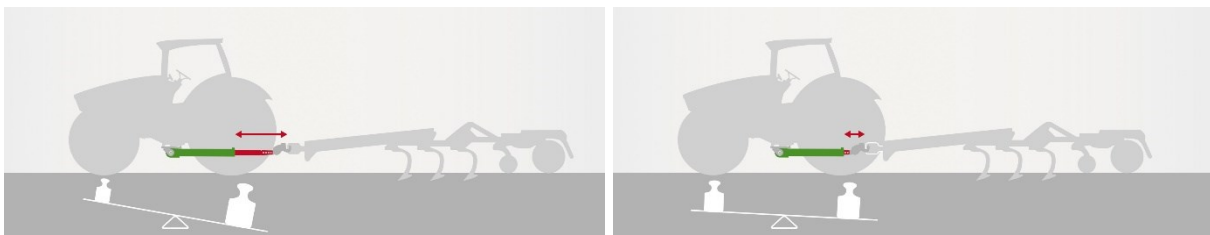


Bild 2: Verschiebung des Stützpunktes zur Verringerung der Entlastung der Vorderachse [19]

Figure 2: Adjustment of the supporting point to reduce the unloading of the front axle [19]

Messungen

Im Bereich der Reifen-Boden-Interaktion werden verschiedene Messungen durchgeführt. Messungen am einzelnen Rad haben zum Ziel, das externe und interne Kraftübertragungsverhalten von Reifen oder Raupenlaufwerk zu untersuchen. Hierzu zählen zum Beispiel Triebkraft-Schlupf-Messungen oder Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen. Reine Bodenmessungen dienen zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften. Gesamtfahrzeugmessungen werden hauptsächlich zur Bewertung der Traktion von Maschinensystemen sowie ihren Eigenschaften bezüglich Fahrsicherheit und Fahrkomfort eingesetzt.

Das Irstea (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) in Clermont-Ferrand, Frankreich, verfügt über eine Einzelradmesseinrichtung zur Untersuchung der Effizienz der Triebkraftübertragung zwischen Reifen und Boden sowie der Bodenschonung [21]. Zusätzlich zur Kraftmessung wird parallel aus dem Reifinneren die Verformung des Reifens ermittelt. Zusammen mit Penetrometermessungen und einer optischen Vermessung der resultierenden Fahrspur wird die Messmethode zur Validierung von Reifen-Boden-Modellen und zum allgemeinen Verständnis der Reifen-Boden-Interaktion eingesetzt. Auf Basis der am Irstea eingesetzten Messeinrichtung wird in Kooperation mit dem NARIC (National Agricultural Research and Innovation Center) in Gödöllő, Ungarn, eine neue Einzelradmesseinrichtung für Triebkraftuntersuchungen entwickelt [22]. Diese soll Reifen mit bis zu 2,5 m Durchmesser und 0,9 m Breite bei einer Radlast von bis zu 120 kN und einem Schlupf von bis zu 40 % vermessen können.

Durch Einsatz eines Kraftmessrahmens, der am Heckhubwerk eines Traktors zur Ermittlung der durch ein Bremsfahrzeug aufgebrachten Zugkräfte angebaut wird, kann die Triebkraftbeiwert-Schlupf-Charakteristik des gesamten Fahrzeuges sowie eines einzelnen angetriebenen Hinterrades praktikabel ermittelt werden [23]. Die Ergebnisse wurden mit Messungen an Kraftmessfelgen validiert. Ein solcher Messaufbau reduziert den Aufwand zur Ermittlung dieser Kennlinien und ist flexibel an verschiedenen Fahrzeugen mit verschiedenen Laufwerken einsetzbar.

An der University of Pretoria werden Systeme aus einfachen Stereokameras innerhalb und außerhalb eines Reifens eingesetzt, um Antriebs- und Bremschlupf, Schräglaufwinkel und Rollradius in Echtzeit zu messen und verschiedenen Regelsystemen (z.B. ABS) als Regelgröße bereitzustellen [24; 25]. Zur Untersuchung einzelner SUV-Reifen in Zusammenhang mit solchen Systemen wurde dort ein gezogener Messanhänger aufgebaut [26].

Der dynamische Rollradius eines Reifens ist ebenfalls eine Eingangsgröße für viele Regelsysteme. Am Advanced Vehicle Dynamics Laboratory (AVDL) der Virginia Polytechnic Institute and State University in Blacksburg, USA, wurden Untersuchungen zum Unterschied des dynamischen Rollradius auf festen und nachgiebigen Fahrbahnen angestellt. Größte dynamische Rollradien zeigen sich für sehr nachgiebigen Boden und hohe Reifeninnendrucke. [27]

Die vertikale Steifigkeit eines Reifens hat einen großen Einfluss auf seine Federungseigenschaften. Die VDG (Vehicle Dynamics Group) der University of Pretoria untersuchte den Einfluss der Reifenalterung auf diese Größe [28]. Dazu wurde ein SUV-Reifen künstlich über 8 Wochen in einem Ofen gealtert. Die Shore A Härte der Reifenseitenwand steigt während dieser Prozedur schnell an. Die vertikale Steifigkeit - gemessen an einem stehenden Reifen - zeigt im Untersuchungszeitraum jedoch nur eine Änderung von 5 %. Offen bleibt, wie sich die Steifigkeiten an rollenden Reifen verändern. Am ika (Institut für Kraftfahrzeuge Aachen) wurde eine Methode zur Übertragung der Eigenschaften rollender Reifen auf einen vertikaldynamischen Achsprüfstand für Lkw-Reifen entwickelt [29]. Auch die vertikalen Feder- und Biegesteifigkeiten von Gummibändern an Raupenlaufwerken wurden zur Bewertung der Verluste durch das viskoelastische Verhalten messtechnisch untersucht [30].

Zur Ermittlung von Reifenkennlinien werden auch mit Messfelgen ausgestattete Versuchsfahrzeuge verwendet. Am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim wurde dazu ein Traktor mit Reifengrößen von 650/65 R 34 und 710/75 R 42 mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet [31]. Im Vergleich zu Messungen an einer Einzelradmesseinrichtung (ERM) können auch anhand von Fahrversuchen am Gesamtfahrzeug stationäre Zugkraft-Schlupf und Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden, **Bild 3**. Abweichungen treten vor allem durch unterschiedliche Fahrbahnbeläge auf. Die Aufnahme transientser Verläufe im Fahrversuch ist mit einfachen Mitteln nicht möglich. An der National Defense Academy of Japan wurden ähnliche Fahrversuche an einem messtechnisch ausgestatteten Geländewagen durchgeführt [32]. Zur Bestimmung der Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Kennlinien wird zusätzlich der Einfluss der Sturzseitenkraft berücksichtigt.

Traktorreifen zeigen im Vergleich zu Pkw- oder Lkw-Reifen bereits bei niedrigeren Frequenzen erste Eigenformen. Untersuchungen am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim zeigen bis zu 15 Eigenmoden im Frequenzbereich von 0 bis 80 Hz an einem Reifen der Dimension 520/70 R 38. Diese Moden werden sowohl am einzelnen, frei schwingenden Rad als auch in einem Flachbandprüfstand und an einem am Versuchstraktor montierten Rad ermittelt. Sie haben somit einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Einleitung von Schwingungen in das Fahrzeug. [33]

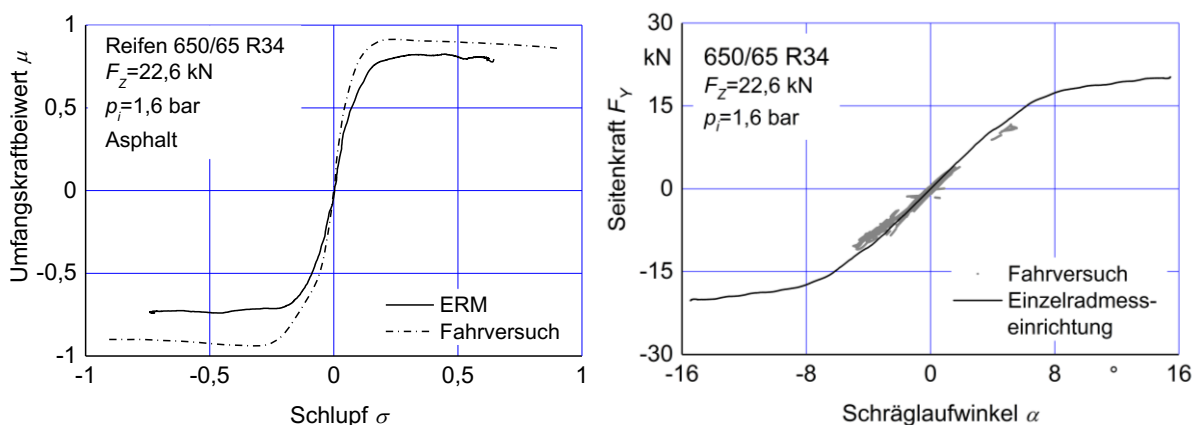


Bild 3: Vergleich zwischen Umfangskraftbeiwert-Schlupf- (links) und Seitenkraft-Schräglaufwinkel-Messungen (rechts) am Gesamtfahrzeug und am Einzelreifen [31]

Figure 3: Comparison of tangential force coefficient-slip- (left) and lateral force-side slip-measurements (right) on a whole vehicle and on a single wheel [31]

Vor allem im Bereich der autonomen Navigation hat die Ermittlung von Bodenkennwerten zur Sicherstellung der Mobilität eine große Bedeutung. So können die Fahrbahnoberflächen Asphalt, Beton, Grünland und Ackerboden durch Auswertung der Signale eines Winkelencoders zur Bestimmung des Reifenschlupfes und eines in die Lauffläche des Reifens integrierten triaxialen Beschleunigungssensors zugeordnet werden [34]. Eine Erweiterung der Sensorik um Drehmomentaufnehmer und eine Stereo-Farbkamera führt zu einer Zuverlässigkeitserhöhung der Bodenklassierung [35].

Zur Beurteilung des Bodens werden häufig auch die Fahrspuren hinter dem Reifen oder Laufwerk herangezogen. An der University of Pretoria wurde ein Algorithmus zur Auswertung der von verschiedenen Stereokameras aufgenommenen Bilder entwickelt [36]. Dieser setzt die Verformung der Reifeninnenkontur eines rollenden Reifens mit der Verformung des Bodens in Bezug, um Aussagen über das plastische und elastische Verformungsverhalten des Bodens zu treffen. Die vorgestellten Untersuchungen basieren auf SUV-Reifen. Dass dieses Vorgehen auch bei größeren Reifen anwendbar ist, wurde in Untersuchungen an der Michigan Technological University durch die Ermittlung der Aufstandsfläche, der Spurtiefe und des verformten Volumens eines Traktorreifens mit Hilfe einer handelsüblichen Kamera gezeigt [37].

Die Kraftübertragung am Einzelreifen oder am einzelnen Laufwerk dient letztendlich zur Aufprägung bestimmter Kräfte auf ein Fahrzeug. Auch an diesem werden entsprechende Messungen von Fahrzustandsgrößen vorgenommen, die durch das Laufwerk beeinflusst werden. Zur Erhöhung der Messgenauigkeit von Traktionsmessungen auf unterschiedlichen Böden wird am NARIC in Gödöllő, Ungarn, ein Bremsfahrzeug mit einem elektronisch regelbaren hydrostatischen Getriebe eingesetzt [38]. Der Fokus dieses Messfahrzeuges liegt auf der Untersuchung der Traktion in Fahrzeuginnenrichtung.

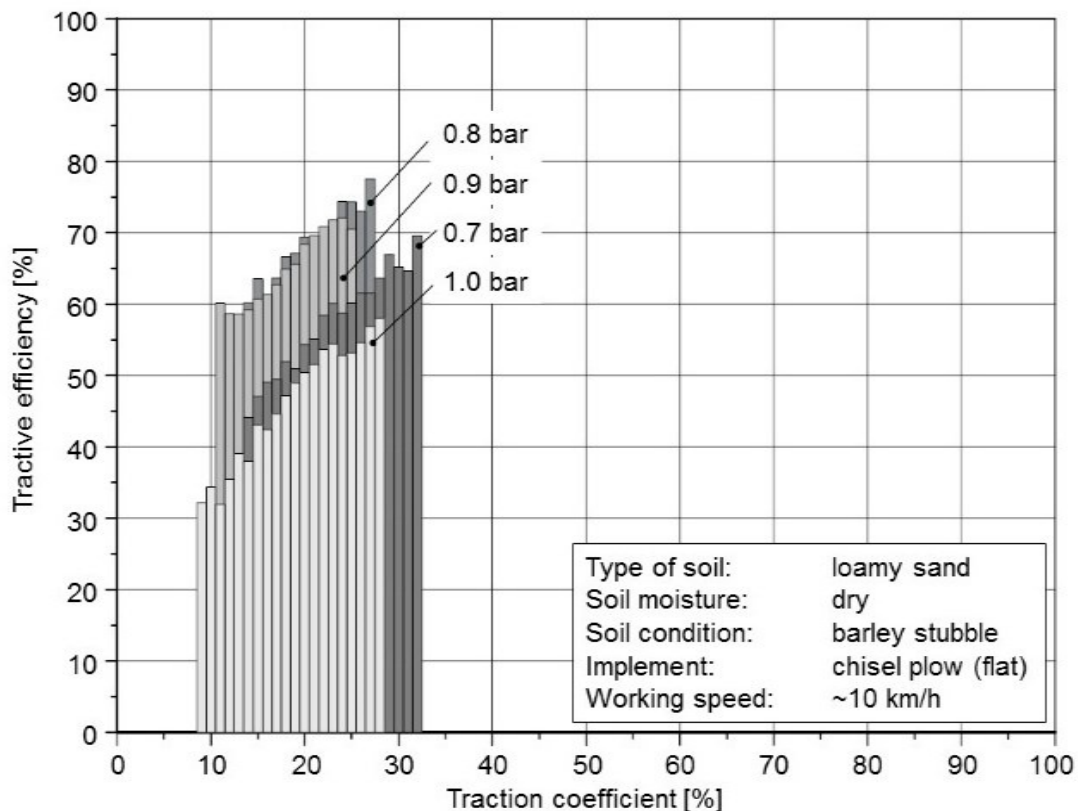


Bild 4: Abhängigkeit des Laufwerkwirkungsgrades vom Reifeninnendruck [39]

Figure 4: Influence of the tyre inflation pressure on the efficiency of the running gear [39]

Ein bereits 2015 vorgestelltes und in die Hinterachse eines Traktors integriertes Sensorkonzept zur Messung dynamischer Radlasten wurde zusammen mit einem Drucksensor zur Bestimmung der Vorderachslast an einem Versuchstraktor implementiert [40]. Bei Feldmessungen im Bereich der Bodenbearbeitung wurde der Messaufbau zur Untersuchung des Einflusses des Reifeninnendruckes auf den Wirkungsgrad der Kraftübertragung in der Reifen-Boden-Schnittstelle eingesetzt [39]. Es zeigt sich, dass das Wirkungsgradoptimum nicht bei minimalem Reifeninnendruck vorliegt, **Bild 4**.

Modellierung

Die Simulation von Reifen und Laufwerken sowie ihrer Interaktion mit dem Boden hat verschiedene Ziele. Auf der einen Seite werden so zum Beispiel Traktionsbedingungen auf nachgiebigem Boden abgebildet. Dazu sind vor allem die Kraftübertragung zwischen Reifen und Boden sowie die Eigenschaften des Bodens von Bedeutung. Auf der anderen Seite werden Modelle zur Untersuchung der Fahrdynamik und des Fahrkomforts entwickelt. Diese Modelle müssen auch die Kraftübertragung innerhalb des Reifens oder Laufwerks abbilden. Beide Modellarten werden primär in der Entwicklung von Reifen, Raupenlaufwerken und Fahrzeugen eingesetzt. Zusätzlich existieren anwenderorientierte Modelle, die beispielsweise die Berechnung der Kontaktflächengröße oder der resultierenden Druckverteilung im Boden ermöglichen.

Das am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim entwickelte Reifenmodell lässt sich valide sowohl für fahrdynamische als auch für fahrkomfortrelevante Untersuchungen einsetzen. Es bildet die dynamische Kraftübertragung zwischen Reifen und festen unebenen Fahrbahnen ab. So kann beispielsweise die Fahrdynamik eines Traktors anhand genormter Fahrversuche wie Sinuslenken oder einem Ausweichtest bewertet werden [41]. Mit dem gleichen Modell ist außerdem eine Bewertung der Schwingungsisolierung des Fahrers auf Versuchsstrecken wie einem ISO 5008 smoother track möglich [42].

Vermeehrt werden Reifenmodelle zur Simulation von Reifen auf mit Schnee oder Eis bedeckten Fahrbahnen entwickelt. Ihr Einsatz dient zum Beispiel zur Verbesserung des Verständnisses der Kraftübertragung zwischen Reifen und Eisfläche, die stark von der Temperaturverteilung im Reifenlatsch abhängt [43]. In den vorgestellten Untersuchungen wurde die Eisfläche empirisch modelliert. Eine Abbildung der Eigenschaften durch Modelle auf Basis der Diskreten Elemente Methode (DEM) ist deutlich komplexer und wird für einfache Systeme - z.B. zur Untersuchung einzelner Profilelemente - eingesetzt [44].

Reifenmodelle zur Anwendung in den Bereichen Fahrdynamik und Fahrkomfort stehen in einem Spannungsfeld zwischen Anwender - meist Fahrzeughersteller - und Reifenhersteller. Es existieren differenzierte Modelle für unterschiedliche Anwendungen. Eine vollständige Parametrierung dieser Modelle ist sehr aufwändig. Fahrzeughersteller sehen gerne die Reifenhersteller in der Pflicht, die Parameter für verschiedene Simulationsmodelle mit ihren Reifen zu liefern. Bei der Vielzahl der verfügbaren Reifen und Reifenmodelle ist diese Aufgabe von den Reifenherstellern jedoch nicht wirtschaftlich durchführbar. Auf der VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn vom 25. bis 26.10.2017 in Hannover wurden die Anforderungen an Reifenmodelle der Zukunft zum Einsatz im Pkw- und Lkw-Bereich diskutiert [45]. Bestehende Modelle erfüllen zum Teil nur unzureichend Kriterien wie Skalierbarkeit, Rechenzeit und Genauigkeit.

Weiterhin basiert die Parametrierung oft nicht auf einheitlichen Standards. Die vorgestellten Ergebnisse lassen sich auf den Bereich landwirtschaftlich eingesetzter Fahrzeuge übertragen.

Die Modellierung nachgiebiger Böden rückt in den Fokus der Entwicklung. Der Boden wird dabei anhand von empirischen Zusammenhängen oder auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) oder Diskrete Elemente Methode (DEM) modelliert. Zur Verifizierung und Validierung dieser Modelle werden zunächst oft einfache Versuche wie die Beziehung zwischen Druck und Einsinkung herangezogen [46; 47]. Empirische Modelle, die für zu ihrer Entwicklungszeit bestehende Reifendimensionen entwickelt wurden, müssen auf ihre Gültigkeit für aktuelle, größere Dimensionen überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes EKoTech (Effiziente Kraftstoffnutzung der Agrartechnik) wird ein solcher empirischer Modellansatz [48] für aktuell verfügbare Reifendimensionen adaptiert [23]. Zur Parametrierung der verschiedenen Modelle zur Abbildung der Interaktion von Reifen und nachgiebigen Böden existieren unterschiedliche Methoden und Prüfstände. Die Modelle und zugehörigen Verfahren zur Parametrierung wurden in einer von der International Society for Terrain Vehicle Systems (ISTVS) finanzierten Arbeit zusammengefasst [49].

Bodenschonung

Optimierungspotential in Bezug auf die Bodenschonung wird vor allem bei den Maschinen selbst gesehen. So wird weiterhin versucht, die Aufstandsfläche von Fahrzeugkombinationen durch den Einsatz von Raupenlaufwerken oder Reifendruckregelanlagen zu erhöhen. Claas bietet Raupenlaufwerke für fast alle selbstfahrenden Fahrzeuge an [15; 50]. Claas übernahm die Reifendruckregeltechnik von R&M Landtechniksysteme und bietet damit nun bodenschonende Technik aus einer Hand an [51].

Einfache Zusammenhänge zwischen Achs- und Radlasten, dem Reifeninnendruck und der Tragfähigkeit des Bodens können genutzt werden, um die Auswirkung einer bestehenden Maschinenkonfiguration zu überprüfen und zu optimieren [52]. Diese Modelle sind teilweise auch für jeden Anwender verfügbar und ohne spezielle fachliche Kenntnisse nutzbar. Es existiert eine Methodik zur Berechnung des Soil Compaction Effect (SCE), der als Index zur Bewertung des Verdichtungsrisikos eines Reifens eingesetzt werden kann, jedoch zurzeit nicht von Reifenherstellern angewendet wird [53]. Zusätzlich zur Aufstandsfläche berechnet das frei verfügbare Modell Terranimo, **Bild 5**, die Druckverteilung unter Reifen oder Laufwerken in Abhängigkeit der Tiefe und gibt eine Einordnung der Gefährdung bezüglich möglicher Bodenschadverdichtungen aus [54; 55].

1. Maschine wählen ?

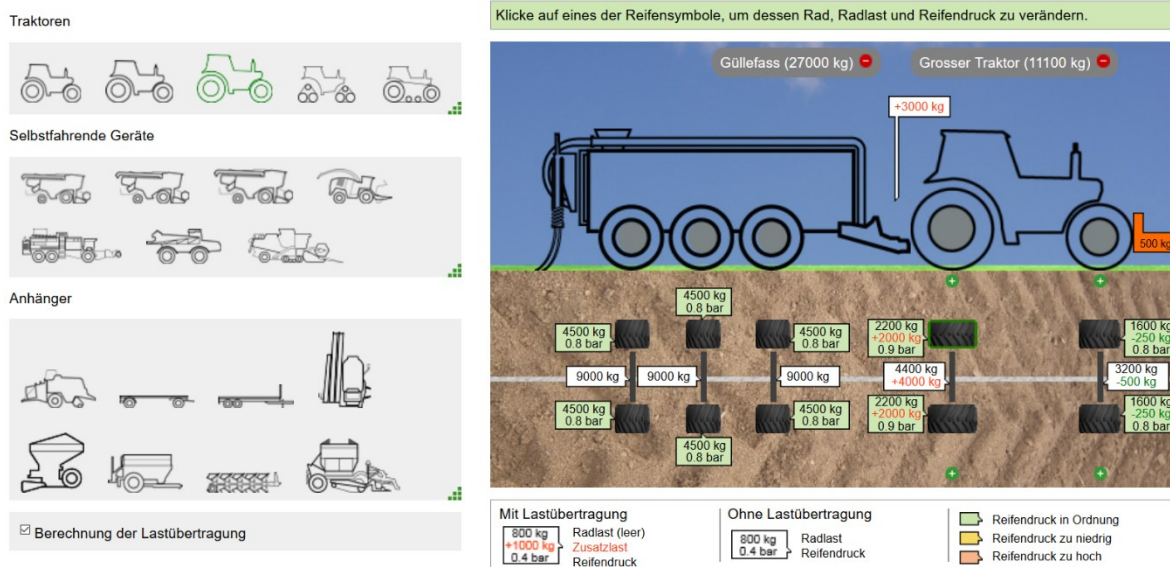


Bild 5: Bedienoberfläche von Terranimo zur Berechnung des Bodenverdichtungsrisikos [54]

Figure 5: Terranimo interface for the calculation of compaction risks [54]

Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Bodenschonung ist die Optimierung des Prozesses. Der Ansatz des Controlled Traffic Farming (CTF) sieht vor, in der gesamten Fruchtfolge immer die gleichen, festgelegten Fahrspuren zu benutzen. Dadurch wird der Anteil der überrollten Fläche minimiert. Dieser Ansatz ist mit zurzeit erhältlichen Maschinen auch in Zentraleuropa umsetzbar und zielführend einsetzbar [56].

Fachtagungen

Erstmals wurde am 25.02.2017 die 1st AXEMA-EurAgEng Conference in Villepinte, Frankreich, ausgerichtet. In diesem Rahmen wurden Bodenmodelle sowie Methoden zur Validierung von Reifen-Boden-Modellen vorgestellt.

Die International Society of Terrain Vehicle Systems (ISTVS) traf sich vom 25. bis 27.09.2017 in Budapest, Ungarn, zur kombinierten 19. internationalen und 14. regionalen Europäisch-Afrikanischen Konferenz [57]. 129 Teilnehmer diskutierten in 53 Vorträgen aktuelle Forschungsergebnisse aus den Bereichen Terramechanik, Modellierung der Reifen-Boden-Schnittstelle, Baumaschinen und extraterrestrische Fahrzeuge. Prof. Dr. György Sitkei fasste in der St. Christophorus Vorlesung die aktuellen Herausforderungen und Möglichkeiten der Terramechanik zusammen [58]. Auf der Exkursion im Rahmen der ISTVS-Konferenz wurde das Entwicklungszentrum der Rába Automotive Holding Plc. in Győr, Ungarn, sowie das Rába Testgelände in Écs, Ungarn, besichtigt.

Vor Eröffnung der Agritechnica 2017 in Hannover fand traditionell die 75. Tagung LAND.TECHNIK AgEng 2017 mit mehr als 1000 Teilnehmern statt [59]. In einer Vielzahl der 75 Fachvorträge in 21 parallelen Sessions wurde die Laufwerk-Boden-Interaktion themati-

siert. Neben der Untersuchung von Fahrdynamik und Fahrkomfort liegt der Schwerpunkt vorgestellter Projekte immer stärker auf der Messung und Modellierung von Traktion und Effizienz.

Zusammenfassung

Die Entwicklungen im Bereich Reifen und Raupenlaufwerken werden von steigenden Anforderungen bezüglich effizienter Kraftübertragung auf den Boden sowie bezüglich der Bodenschonung getrieben. Es existieren vielfältige technische Lösungen und methodische Ansätze, um diese Ziele zu erreichen. Hersteller fassen zunehmend Kompetenzen - zum Beispiel im Bereich Reifen und Reifendruckregelanlagen - zusammen, um ganzheitliche Lösungen anbieten zu können. Eine aktuelle Umfrage zur Verwendung von Reifen durch die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (DLG) zeigt jedoch, dass Technik und Verfahren nur bedingt eingesetzt werden [60]. Das liegt unter anderem an der Komplexität der Systeme aus Maschinen, Reifen bzw. Raupenlaufwerken und Boden. Anwenderfreundliche Werkzeuge wie Terranimo machen dem Anwender Forschungsergebnisse ohne notwendiges Fachwissen zugänglich. Die Verbreitung solcher Anwendungen muss gefördert werden, um eine ganzheitliche Optimierung der Reifen-Boden-Interaktion zu erreichen.

Literatur

- [1] Bürger, A.; Böttinger, S. und Kutzbach, H. D.: Reifen - Reifen/Boden-Verhalten. In: Jahrbuch Agrartechnik 2016. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge 2017, S. 1–9.
- [2] Vervaeet, P. und Gandillet, M.: '2 in 1 tire' technology to allow maximal efficiency of the transmission chain in both road and field usage. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 447–452.
- [3] N.N.: Michelin übernimmt PTG und Teleflow - Der französische Hersteller wird zu einem führenden Anbieter von Reifendruckregelsystemen für die Landwirtschaft, Pressemitteilung, Michelin Reifenwerke AG & Co. KGaA. Hannover 12.11.2017.
- [4] N.N.: Nokian Tyres präsentiert Nokian Concept Tyre für Traktoren, Pressemitteilung, Nokian Tyres GmbH. Nürnberg 12.11.2017.
- [5] Feuerborn, B.: Michelin Roadbib: Neuer Landwirtschaftsreifen für die Straße. URL - <https://www.agrarheute.com/technik/traktoren/michelin-roadbib-neuer-landwirtschaftsreifen-fuer-strasse-535460>, Zugriff am: 29.11.2017.
- [6] profi: Industriereifen auch für den Acker. URL - <https://www.profi.de/news/Industriereifen-auch-fuer-den-Acker-8758898.html>, Zugriff am: 29.11.2017.
- [7] N.N.: Trelleborg kündigt PneuTrac an – eine neue Generation von Landwirtschaftsreifen, Pressemitteilung, Trelleborg Wheel Systems. Erbach 10.2017.
- [8] N.N.: Conti will wieder mitmischen. Agrartechnik (2017) H. 11, S. 119–122.
- [9] N.N.: Reifen-Schaufenster. Agrartechnik (2017) H. 11, S. 128–129.
- [10] Ai, A. und Conradi, N.: DLG-Prüfbericht 6800 - Vredestein Traxion Optimall. DLG-Prüfbericht (2017) H. 6800, S. 1–8.
- [11] N.N.: Intelligente Reifen. Agrartechnik (2017) H. 11, S. 124–127.
- [12] Deter, A.: Continental baut Agrargeschäft weiter aus. URL - <https://www.topagrar.com/news/Technik-Techniknews-Continental-baut-Agrargeschaeft-weiter-aus-8684492.html>, Zugriff am: 29.11.2017.
- [13] N.N.: Trelleborg kündigt ConnectTire an – das clever konzipierte Rad für mehr Ertrag mit wenige Einsatz. Intelligent., Pressemitteilung, Trelleborg Wheel Systems. Erbach 10.2017.
- [14] CLAAS KGaA mbH: TERRA TRAC am JAGUAR. URL - <http://www.claas.de/faszination-claas/themen/terra-trac/jaguar>, Zugriff am: 06.12.2017.
- [15] Wilmer, H.: Claas auf Raup-Zug. profi - Magazin für professionelle Agrartechnik 29 (2017) H. 12, S. 52–54.
- [16] Brüse, C.: Der will nach vorne. profi - Magazin für professionelle Agrartechnik 29 (2017) H. 12, S. 82–83.
- [17] Krieger, S.; Schnur, E. und Brenninger, M. M.: The Potential of CVTs in Tracked Tractors around 400 hp. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 135–142.

- [18] N.N.: Agritechnica 2017-Silbermedaille für EZ Ballast Wheel System von John Deere, Pressemitteilung, John Deere GmbH & Co. KG. Hannover 06.09.2017.
- [19] N.N.: Zwei Systeme zur Steigerung der Effizienz der Zugkraft - Fendt VarioPull: Eine richtungsweisende Innovation, Pressemitteilung, AGCO Fendt. Marktoberdorf 08.09.2017.
- [20] Meyer, L. und Noyer, P.: Holistic Tractor Setup and Optimization System - CLAAS Electronic Machine Optimization for the Tractor. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 185–190.
- [21] Heritier, P.; Miclet, D.; Piron, E.; Chanut, M. und Lenain, R.: Tools and methods to develop and validate soil-wheel interaction model and knowledge. 1st AXEMA-EurAgEng Conference, 25.02.2017 Villepinte. In: 1st AXEMA-EurAgEng Conference, S. 1–10.
- [22] Szalay, K.; Kovács, L.; Bércesi, G.; Oldal, I.; Piron, E.; Charlet, J.; Joly, T.; Poncet, C. und Tran, F.: Agricultural Tire Energy Efficiency test method and dedicated equipment to measure the fuel consumption and traction of agricultural tires under real field conditions. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 407–416.
- [23] Meiners, A.; Häberle, S. und Böttinger, S.: Advancement of the Hohenheim Tractor Model – Adaption on current demands. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 245–254.
- [24] Botha, T. R.; Guthrie, A. G.; Jimenez, E.; Els, P. S. und Sandu, C.: Tyre Longitudinal Velocity and Slip Measurements from the Inside of a Tyre. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–10.
- [25] Johnson, D. K.; Botha, T. R. und Els, P. S.: Real-Time Slip Angle Measurements Using Digital Image Correlation. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–8.
- [26] Žuraulis, V.; van der Merwe, Nico A.; Scholtz, O. und Els, P. S.: Modelling and Validation of a Testing Trailer for ABS and Tyre Interaction on Rough Terrain. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–9.
- [27] He, R.; Sandu, C. und Osorio, J. E.: Investigating the Difference of the Effective Rolling Radius of a Tire on a Soft Soil and a Rigid Surface. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–16.

- [28] Wright, K. R.S. und Els, P. S.: The Effects of Age on the Stiffness Properties of a SUV Tyre. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–7.
- [29] Winkler, T.; Friedrichs, J.; Wegener, D. und Eckstein, L.: Übertragung rollender Reifeneigenschaften auf einen stationären vertikaldynamischen Achsenprüfstand. 16. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn 2017 mit Fachausstellung, 5. VDI-Fachkonferenz Innovative Bremstechnik, 25./26.10.2017 Hannover. In: 16. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn 2017 mit Fachausstellung. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 135–146.
- [30] Dudziński, P. und Chołodowski, J.: On Internal Resistance of Rubber Track Systems. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–14.
- [31] Schulze Zumkley, H.: Reifenparameterermittlung aus Fahrversuchen mit einem Ackerschlepper unter besonderer Berücksichtigung des Hohenheimer Reifenmodells. Dissertation, Universität Stuttgart, 2016. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 571. Aachen: Shaker Verlag 2017.
- [32] Yamakawa, J.; Enari, A.; Eto, R. und Soe, T. P.: Measurement of Tire Characteristics Travelling in Actual Ground Environment with an Instrumented Vehicle. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–9.
- [33] Brinkmann, C.: Experimental investigations on tractor tire vibration properties. Dissertation, Universität Stuttgart, 2016. Forschungsbericht Agrartechnik des Fachausschusses Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 573. Aachen: Shaker Verlag 2017.
- [34] Khaleghian, S. und Taheri, S.: Terrain classification using intelligent tire. *Journal of Terramechanics* 71 (2017), S. 15–24.
- [35] Reina, G.; Milella, A. und Galati, R.: Terrain assessment for precision agriculture using vehicle dynamic modelling. *Biosystems Engineering* 162 (2017), S. 124–139.
- [36] Guthrie, A. G.; Botha, T. R.; Jiminez, E.; Els, P. S. und Sandu, C.: Dynamic 3D Measurement of Tyre-Terrain Interaction. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–10.
- [37] Kenarsari, A. E.; Vitton, S. J. und Beard, J. E.: Creating 3D models of tractor tire footprints using close-range digital photogrammetry. *Journal of Terramechanics* 74 (2017), S. 1–11.

- [38] Bércesi, G.; Bablena, A.; Kovács, L. und Szalay, K.: Dynamometer Vehicle for Field Tests in Agricultural Machinery. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–7.
- [39] Wieckhorst, J.; Fedde, T. und Frerichs, L.: A Traction Field Test – Real Time Tire Soil Parameters of a Tractor in Tillage Applications. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 431–438.
- [40] Peeters, M.; Kloster, V.; Fedde, T. und Frerichs, L.: Integrated wheel load measurement for tractors. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 423–430.
- [41] Bürger, A. und Böttinger, S.: Modelling of high volume agricultural tyres for driving dynamics investigations. 17th Stuttgart International Symposium, 14./15.03. Stuttgart. In: 17th Stuttgart International Symposium. Wiesbaden: Springer Vieweg 2017, S. 91–106.
- [42] Bürger, A. und Böttinger, S.: Driving comfort analysis of an agricultural tractor with the Hohenheim Tyre Model on complex tracks. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 263–272.
- [43] Jiminez, E. und Sandu, C.: Advanced Tire-Ice Interface Model for Pneumatic Tire Performance. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–18.
- [44] Theile, T. C.; Szabó, D.; Schneebeli, M.; Kaji, Y.; Hagiwara, K. und Hatanaka, S.: Discrete Element Snow Model for Impact Loading. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–4.
- [45] Selig, M.; Meyer, M.; Petry, F. und Westermann, S.: Reifensimulationsmodelle der Zukunft - Tire Simulation Models of the Future. 16. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn 2017 mit Fachausstellung, 5. VDI-Fachkonferenz Innovative Bremstechnik, 25./26.10.2017 Hannover. In: 16. Internationale VDI-Tagung Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn 2017 mit Fachausstellung. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 33–46.
- [46] Nakashima, H.; Nakanishi, R.; Shimizu, H.; Miyasaka, J. und Ohdoi, K.: Pressure-Sinkage Relationship of an Artificial Soil Model. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–8.
- [47] Vennik, K.; Keller, T.; Kukk, P.; Krestein, K. und Reintam, E.: Soil rut depth prediction based on soil strength measurements on typical Estonian soils. Biosystems Engineering 163 (2017), S. 78–86.

- [48] Schreiber, M.: Kraftstoffverbrauch beim Einsatz von Ackerschleppern im besonderen Hinblick auf CO₂-Emissionen. Dissertation, Universität Hohenheim, 2006. Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG) Nr. 442. Aachen: Shaker Verlag 2006.
- [49] He, R.; Khan, A. K.; Guthrie, A. G.; Sandu, C. und Els, P. S.: A Technical Survey on Terminology, Testing Methodologies and Equipment Used in Modeling and Parameterization of Soft Soil for Vehicular Applications. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–39.
- [50] Haussmann, F. und Obermeier-Hartmann, R.: The CLAAS AXION 900 TERRA TRAC Product Range - Benefits of the CLAAS Axion 900 halftrack tractor concept equipped with CLAAS Big Driver Terra Trac. LAND.TECHNIK AgEng 2017, 10./11.11.2017 Hannover. In: LAND.TECHNIK AgEng 2017. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH, S. 127–134.
- [51] N.N.: CLAAS investiert in Reifendruckregeltechnologie, Pressemitteilung, CLAAS KGaA mbH. Harsewinkel 10.2017.
- [52] Pillinger, G.; Máthé, L. und Kiss, P.: Some Aspects of Pressure Regulation in Pneumatic Tractor Tyres. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–6.
- [53] Prikner, P.; Grečenko, A. und Pražan, R.: Application of Tire Rating with Aim to Implement the Matter on Agricultural Tires. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–12.
- [54] Berner Fachhochschule: Berechnung des Bodenverdichtungsrisikos. URL - <http://www.terranimoworld/CH/expert/Default.aspx>, Zugriff am: 14.12.2017.
- [55] Eder, J.: Gegen Bodenverdichtung: Mit Terranimo Reifen und Radlast checken. URL - <https://www.agrarheute.com/technik/gegen-bodenverdichtung-terranimoworld-reifen-radlast-checken-531732>, Zugriff am: 29.11.2017.
- [56] Galambošová, J.; Macák, M.; Rataj, V.; Antille, D. L.; Godwin, R. J.; Chamen, W. C. T.; Žitnák, M.; Vitázková, B.; Dudák, J. und Chlpík, J.: Field Evaluation of Controlled Traffic Farming in Central Europe Using Commercially Available Machinery. Transactions of the ASABE 60 (2017) H. 3, S. 657–669.
- [57] Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS 25.-27.09.2017.
- [58] Sitkei, G.: New Challenges and Opportunities for Terramechanics. 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, 25.-27.09.2017 Budapest. In: Proceedings of the 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, S. 1–24.
- [59] LAND.TECHNIK AgEng 2017 - The Forum for Agricultural Engineering Innovations. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 10./11.11.2017.

- [60] Volz, F.: Kraft übertragen Boden schonen. In: DLG Test Landwirtschaft. Frankfurt/Main: Max-Exth-Verlagsgesellschaft mbH 2017, S. 22–25..

Bibliografische Angaben / Bibliographic Information

Wissenschaftliches Review / Scientific Review

Erfolgreiches Review am 15.02.2018

Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation

Bürger, Alexander; Böttinger, Stefan: Reifen / Reifen-Boden-Interaktion. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2017. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2018. S. 1-17

Zitierfähige URL / Citable URL

<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201801151456>

Link zum Beitrag / Link to Article

<https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/jahrbuch-2017/chapter/reifen-boden.html>