

## **Reifen / Reifen-Boden-Interaktion**

Stefan Böttinger

### **Kurzfassung**

Die Neuheiten und Trends auf dem Reifenmarkt werden vorgestellt. Dabei ist die Entwicklung zu intelligenten Reifen mit Sensoren, Reifendruckempfehlungen und Druckregelanlagen zu beobachten.

### **Schlüsselwörter**

Traktorreifen, Raupenlaufwerk, Reifendruckregelanlagen, Traktion, Reifenmodell, Bodenmodell

## **Tyres / Tyre-Soil-Interaction**

Stefan Böttinger

### **Abstract**

The innovations and trends on the tyre market are presented. The development of intelligent tires with sensors, tire pressure recommendations and pressure control systems can be observed.

### **Keywords**

Tractor tyres, rubber tracks, pressure control systems, traction, tyre modelling, soil modelling

## **Markt**

Auf der Agritechnica waren alle relevanten Marken vertreten. Michelin hat sich mit der Übernahme des Laufwerkherstellers Camso und von PTG mit Druckluftregelanlagen zu einem Full-liner entwickelt. Trelleborg hat nach Übernahme von Mitas sein Portfolio ebenfalls erweitert, bietet aber keine Laufwerke an. Continental ist seit zwei Jahren wieder im Landwirtschaftsreifenmarkt. Der Umfang des Reifenangebots befindet sich noch im Aufbau. Der Alliance Tire Group ATG, eine Tochter der Yokohama Rubber Company, bekam für den ersten landwirtschaftlichen MPT-Reifen für AgroTrucks, der bis 100 km/h zertifiziert ist, eine Silbermedaille. Dieser Reifen lässt sich mit 0,8 bar auf dem Feld und mit 6,5 bar auf der Straße fahren. Bridgestone bietet Reifen auch unter der Marke Firestone und Laufwerkblätter an. Goodyear will wieder auf dem europäischen Markt Fuß fassen. Informationen zu den weiteren Anbietern sind in entsprechenden Übersichtsbeiträgen zu finden [1; 2].

Die steigende Tendenz zu Reifen mit der IF- bzw. sogar der VF-Technologie war auf der Agritechnica deutlich zu sehen. Der um 20 % bzw. 40 % geringere Luftdruck bei gleicher Traglast im Vergleich zu Standardreifen erhöht für den Anwender die Möglichkeiten zur Anpassung des Reifenluftdrucks an die Einsatzverhältnisse. Damit diese Möglichkeiten auch einfach genutzt werden, steigt das Angebot an Druckluftregelanlagen, die von der Kabine aus bedient werden können. Von verschiedenen Herstellern werden nun Systeme angeboten, bei denen Daten zu Reifen wie Luftdruck und Temperatur, zu Maschinen und Geräten und eventuell sogar zum Boden erfasst oder eingegeben werden. Darauf basierend wird ein Luftdruck empfohlen und eventuell über die Druckluftregelanlage am Traktor, an der Erntemaschine, an der Feldspritze oder auch am Güllewagen eingestellt.

In einem Gemeinschaftsprojekt von Steyr, Grasdorf und TerraCare ist eine Reifendruckverstellung mit einem intelligenten Rad entwickelt worden. Abhängig von Reifengröße und Reifendruck wird aus der mittels eines innenliegenden Ultraschallsensors gemessenen Reifeneinfederung die dynamische Radlast unter den aktuellen Bedingungen ermittelt. Die Druckregelanlage berücksichtigt zudem Fahrgeschwindigkeit, Fahrzeugposition und weitere Parameter.

Michelin hat bereits 2018 „Zen@Terra“ eingeführt, wobei der Reifendruck von der Kabine mit einer Druckregelanlage von PTG verstellt werden kann. Das nun vorgestellte System „Agro-Pressure“ unterstützt bei der Wahl des optimalen Reifendrucks. Es wurde gemeinsam mit 365FarmNet und der Berner Fachhochschule entwickelt. In 365FarmNet erfolgt die Auswahl der Fahrzeuge, der Bereifung und der Art der zu verrichtenden Arbeit. Darauf basiert eine Luftdruckberatung. Bei zusätzlicher Eingabe von Beschaffenheit und Zustand des Feldes wird von der Software Terranimo unter Berücksichtigung des Verdichtungsrisikos eine Empfehlung, ob auf dem Feld gearbeitet werden soll oder nicht, gegeben.

Trelleborg und Dana stellen mit „CTIS+“ eine Druckregelanlage vor. Eine Smartphone-App ermittelt den richtigen Reifendruck auf Basis des Fahrzeuges, der gewählten Arbeitsgänge und der Anbaugeräte. Diese Druckempfehlung wird dem Fahrer am Terminal angezeigt. Bei Übernahme wird der Druck in den Rädern entsprechend eingestellt.

Continental überträgt sein Reifenmanagementsystem für Lkw auf Traktorreifen. Mit einem werkseitig im Reifen montierten Sensor werden Druck und Temperatur erfasst. Über eine Bluetooth-Verbindung werden diese Daten an eine Smartphone-App zur Information des Fahrers oder in ein Webportal für das Reifenmanagement eines größeren Unternehmens übertragen. Der Sensor ist bei jedem „VF TractorMaster Hybrid“-Reifen bereits ab Werk montiert.

Nokian stellt mit „Intuitu“ einen in den Reifen geklebten Sensor für Druck, Temperatur und Verschleiß vor. Er soll im Reifen „Ground King“ verfügbar werden und seine Daten für den Fahrer über Bluetooth auf ein Smartphone oder ein Terminal übertragen [3].

Wegen des steigenden Anteils von Straßenfahrten bei Traktoren werden Reifen mit Straßenprofil und Reifen mit straßentauglicherem Profil vorgestellt. Dabei werden auch Reifen aus rußfreiem und rollwiderstandsarmen Material untersucht. Der Michelin „RoadBib“ besitzt ein Straßenprofil mit flacher Laufflächenmitte und durchgehendem Mittelsteg. Dadurch werden ein geringer Rollwiderstand und eine höhere Laufruhe bei Straßenfahrt erreicht. Ein straßen- und ackertaugliches Reifenprofil wurde schon früher von Michelin mit dem „EvoBib“ vorgestellt. Er kann seine Vorteile besonders mit einer Reifendruckregelanlage ausspielen. Bei höherem Luftdruck rollt der Reifen auf der Straße eher auf dem durchgehenden Mittenprofil ab. Auf dem Feld bei niedrigem Luftdruck fährt der Reifen auch auf den Stollen der Reifenschultern. Bei dem Nokian „Ground King“ und dem Continental „VF TractorMaster Hybrid“ sorgen mittige Klotzprofile für eine relativ ruhige und leise Straßenfahrt. In Blöcke aufgelöste Stollen bzw. Stollen mit Profilkerbungen sorgen für gute Wärmeabfuhr, gute Beweglichkeit und Traktion im Feld, **Bild 1**.



**Bild 1:** Traktorreifen mit Straßenprofil (Michelin „RoadBiB“, links) und mit straßentauglichem Profil (Nokian „Ground King“, Mitte, Continental „VF TractorMaster Hybrid“, rechts), Werksbilder

**Figure 1:** Tractor tyres with road profile (Michelin "RoadBiB", left) and with roadworthy profile (Nokian "Ground King", center, Continental "VF TractorMaster Hybrid", right), factory images

Für mehr Traktion im Feldeinsatz werden veränderte Stollenprofile eingesetzt. So besitzt der Nokian „Tractor King“ Doppelstollen an den Reifenschultern. Die „CupWheel“-Technologie von Galileo Wheel Ltd. wird beim „PneuTrac“ von Trelleborg eingesetzt. Die spezielle Seitenwand ermöglicht es, dass der Reifen mit vermindertem Luftdruck gefahren wird und dabei eine sehr lange Aufstandsfläche bildet. Durch die speziell gestaltete Flanke ist auch die Seitenstabilität für Kurvenfahrten und für den Einsatz am Hang gegeben. Trelleborg bietet diese Bauart aktuell nur in zwei Größen (280/70 R 18, 480/65 R 28) an. Galileo arbeitet an einer deutlich größeren Lösung, um Reifen der Größe 710/70 R 42 zu ersetzen. In einem Vergleich des „PneuTrac“ mit einem Standard-Radial-Reifen in den Größen von hinten 600/65 R 38 und vorne 480/65 R 28 konnte dieser deutlich mehr Zugkraft bei einem besseren Laufwerkwirkungsgrad aufbringen. Der „PneuTrac“ hatte dabei einen Luftdruck von 0,4 bar, der Standardreifen von 1,0 bar [4].

Raupenlaufwerke für mehr Traktion bei größerer Aufstandsfläche und geringerem Bodendruck werden verstärkt angeboten und eingesetzt. Michelin hat Camso zur Abrundung seines Produktangebotes übernommen. Auf der Agritechnica waren alle Varianten von Raupenfahrwerken ausgestellt: Raupen nur an der Hinterachse, Raupen an allen Achsen oder nur eine Raupe an jeder Seite des Fahrzeugs. Raupenlaufwerke sind in verschiedenen Breiten und flach- oder hochbauend verfügbar.

Die Betriebskosten von Reifen hängen sehr stark von ihrem Verschleißverhalten und damit von ihrer Langlebigkeit ab. Im Vergleich zu einem Referenzreifen eines namhaften Herstellers zeigt der Vredestein „Traxion XXL“, 600/70 R 28 an der Vorderachse und 710/70 R 42 an der Hinterachse, ein deutlich besseres Verschleißverhalten. Die Standzeit ist an der Vorderachse um 87 % und an der Hinterachse um 51 % höher. Daraus ergeben sich spezifische Kosten für die vier Reifen von 1,62 €/h gegenüber der Referenz mit spezifischen Kosten von 2,64 €/h [5].

## **Forschung und Entwicklung**

### *Sensoren*

Die Spurbildung eines Reifens auf weichem Untergrund kann mit Stereokameras vor und hinter dem Reifen ermittelt werden. In Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit kann mit einer Genauigkeit innerhalb von 1,5 mm das Fahrspurprofil aufgenommen werden [6].

Der Schräglaufwinkel ist für Fahrdynamik und Fahrstabilität ein wichtiger Parameter. Viele Assistenzsysteme könnten davon profitieren, wenn er in Echtzeit ermittelt werden kann. Mit Hilfe einer direkt nach unten auf den Boden ausgerichteten Kamera und digitaler Bildverarbeitung kann er aus der Verschiebung charakteristischer Punkte der Bodenoberfläche von Bild zu Bild berechnet werden. Diese Funktion wurde bis 100 km/h bestätigt [7].

Reifenabplattung, Aufstandslänge und Reifenkontur lassen sich mit drei Ultraschallsensoren, die im Reifen mit der Felge rotieren, messen [8]. In einer Untersuchung wurde der Schlupf des angetriebenen Rades aus der Differenz der Umfangsgeschwindigkeit des angetriebenen Hinterrades und des geschobenen Vorderrades ermittelt. Damit konnte ein Regelsystem zur Verbesserung der Zugleistung aufgebaut werden [9]. Einfache Sensoren wie beispielsweise drei

Kraftmessungen an der Dreipunktanlenkung und die Messung von Drehzahl und Drehmoment an der Zapfwelle lassen sich einfach kabellos mit einem Zigbee-Netzwerk erfassen [10].

### *Performance Messungen*

Der Einfluss der Reifenluftdruck-Kombinationen an Vorder- und Hinterrädern auf Schlupf und Kraftstoffverbrauch wurde untersucht. Wenn durch entsprechenden Luftdruck der Vorlauf der Vorderachse ca. 2 % beträgt, dann reduzierte sich, im Vergleich zu identischem Luftdruck in Vorder- und Hinterrädern, der Kraftstoffverbrauch pro Stunde um 2,5-3 % und pro ha um 3,5-4 % [11].

Im Vergleich zu einem Standardtraktor können mit dem Claas Axion 900 TerraTrac deutlich höhere Zugleistungen bei schweren Zugarbeiten und Geschwindigkeiten unter 10 km/h erreicht werden. Über 10 km/h ist die Zugleistung vergleichbar. Der spezifische Kraftstoffverbrauch ist meist geringer. Der reduzierte Schlupf verursacht geringere Bodenbewegungen. Im Vergleich zu Radfahrwerken und zu Triangle-Laufwerken werden geringere Bodendrücke erreicht. Dieser Effekt ist in den untersuchten Tiefen von 20 cm, 40 cm und 60 cm sichtbar [12].

Der Einfluss der Bodenfeuchte auf die übertragbare Triebkraft eines Traktors mit Hinterradantrieb wurde mit Drehmomentsensoren an den Rädern aufgenommen. Die Zugkraftmessung erfolgte mit einem Kraftmessrahmen zwischen Traktor und angebautem Gerät bei konstanter Fahrt. Mit Zunahme der Bodenfeuchte von 20-30 % auf 30-40 % bzw. 40-50 % erhöhte sich leicht der Schlupf von 12 % auf 14 % bzw. 16 %, der Zugkraftbeiwert nahm um 2 % bzw. 9 % zu und der Laufwerkwirkungsgrad nahm um 3 % bzw. 5 % ab. Die Fahrgeschwindigkeit wurde nicht variiert [13].

Vollständige Triebkraft-Schlupfkurven für Traktorreifen der Größen von 520/70 R 38 bis zu 710/70 R 42 wurden mit Reifendrücken von 0,8 bis 2,0 bar aufgenommen. Mit diesen aktuellen Reifenbauarten und -größen wurde das Modell von Schreiber, das mit älteren Bauarten und kleineren Reifengrößen entwickelt wurde, angepasst. Mit der Anpassung können die Triebkraft-Schlupfkurven auch bei Schlupfwerten größer 20 % besser abgebildet werden [14].

Ein Traktor mit Stahlrädern an der angetriebenen Hinterachse mit 150 mm hohen Stollen ermöglicht höhere Zugkräfte als mit konventionellen Hochstollenreifen mit 90 mm Stollen. Die Stahlstollen drückten sich weiter in den Boden und konnten dadurch höhere Scherkräfte übertragen. Anhand des Penetrometer-Eindringwiderstandes und der Raumdichte des Bodens zeigten sich etwas geringere Verdichtungen mit den Stahlrädern. Aussagen zur Spurbildung und wie ein für diese Einsatzbedingungen günstiger Luftreifen gestaltet sein müsste werden nicht gemacht [15].

Mit dem Reifenluftdruck ändern sich die Spurtiefe, der Schlupf und die Reifenabplattung. Der Reifenluftdruck hat auch eine Auswirkung auf die Bodenfestigkeit, die u. a. durch den Eindringwiderstand mit einem Penetrometer gemessen wird. Die statistische Analyse der Versuche zeigt den Zusammenhang zwischen Reifendruck und Eindringwiderstand und die Grenzen dieser Korrelation auf [16].

Durch eine angepasste Ballastierung und einen angepassten Reifendruck kann der Systemwirkungsgrad des Traktors bei schwerer Bodenbearbeitung verbessert werden. Es reicht allerdings nicht aus, den Reifendruck bis an die Tragfähigkeitsgrenze des Reifens abzusenken. In Versuchen wurden Reifen-Boden-Kennfelder für verschiedene Reifendrücke aufgenommen. Es zeigte sich, dass unter homogenen Traktionsbedingungen die unterschiedlichen Reifendrücke bewertet werden können. Für wechselnde Traktionsbedingungen muss diese Bewertung weiter erforscht werden [17].

Mit Hilfe der Simulation eines Versuchstraktors inklusive der Feder-Dämpfer-Charakteristik von Reifen, Vorderachsfederung und Kabinenfederung konnte gezeigt werden, dass die Vorderachsfederung die Fahrsicherheit in Form der Nick- und Rollstabilität verbessert. Der Fahrkomfort wird allerdings verschlechtert und durch die Kabinenfederung verbessert. Mit einem angebauten Gerät erhöhen sich der Komfort und die Nick-Stabilität, die Roll-Stabilität nimmt aber ab. Die Untersuchung zeigt die Schwierigkeit der Abstimmung von Fahrkomfort und Fahrsicherheit bei Traktoren und die teilweise gegenläufigen Effekte bezüglich der Stabilität auf [18].

#### *Modellierung und Simulation*

Die Grundlagen zu Reifendeformationen, den fünf unterschiedlichen Reifenhalbmessern und die unterschiedlichen Nullpunktdefinitionen für den Schlupf werden ausführlich dargelegt. Es wird hergeleitet wie mit dem dynamische Radhalbmesser  $r_{dyn}$  die Kräfte und Drehmomente am Rad berechnet werden können. Allerdings greifen die Kräfte virtuell unterhalb der Reifenaufstandsfläche an, da  $r_{dyn}$  ein bisschen größer als der messbare Abstand Radnabe zu Bodenoberfläche,  $r_{stat}$ , ist. Der Hebelarm der Radlast ist nicht konstant, sondern vergrößert sich mit dem steigenden Antriebsmoment wegen der auftretenden Reifendeformation in Längsrichtung. Jedoch ist dieser Hebelarm nicht nötig, wenn mit dem Rollradius  $r_{dyn}$  bei Nullschlupfdefinition gerechnet wird. Eine Leistungsbetrachtung bestätigt, dass die Längskräfte korrekt berechnet werden, wenn  $r_{dyn}$  als Hebelarm des Antriebsmoments verwendet wird. Deshalb ist für Untersuchungen zu Drehmoment und Leistung an Luftreifen die Angabe von  $r_{dyn}$  bei Nullschlupf maßgeblich [19].

Aufgrund der extremen Variabilität von Böden und der unterschiedlichen Bodenbearbeitungsbedingungen sind Messungen, die unter einem einzigen Satz von Bedingungen durchgeführt werden, schwer zu verallgemeinern. Ergebnisse von allgemeinerem Nutzen erfordern die Durchführung systematischer Messungen über geeignete Bereiche der wichtigsten Einflussgrößen. Daraus können dann z. B. Ähnlichkeitsbeziehungen hergeleitet werden. Es werden die Ergebnisse neuer Untersuchungen dargestellt und diese mit Hilfe der Dimensionsanalyse verallgemeinert [20].

Erste Ergebnisse zu einem vereinfachten und sehr theoretischen Ansatz für die Reifen-Boden Interaktion werden vorgestellt. Versuche zur Parametrierung der Modelle und zur Validierung sind nicht vorgesehen [21].

Eine Literaturübersicht zur terramechanischen Modellen wurde erstellt. Dabei konnten die Parameter identifiziert werden, die einerseits den Boden in empirischen Modellen zur Beurteilung der off-road Mobilität, und die andererseits den Reifen-Boden-Kontakt beschreiben [22]. Für

SUV-Reifen auf weichem Boden wurden umfangreiche Untersuchungen zur Beschreibung des Traktionsverhaltens durchgeführt [23]. Auf Basis der Druck-Einsink- und der Scher-Versuche konnte ein modifiziertes Bekker-Model für den Boden parametrisiert werden. Als Reifenmodell kam das Magic Formula Model zum Einsatz [24]. Für die weitergehende Modellierung von SUV-Reifen auf weichem Boden wurde ein semi-analytisches Modell für die Reifenstruktur erstellt, das für on- und off-road-Bedingungen geeignet ist. Das Materialmodell beinhaltet viskoelastische und hyperelastische Eigenschaften. Die Reifenstruktur hat mit Federn und Dämpfern verbundene verteilte Massen [25]. Für die Interaktion von Reifen und verformbaren und festen Untergrund werden Interaktionsmodelle vorgestellt und beschrieben. Wichtig ist dabei die Charakterisierung des Untergrundes in Normal- und Tangentialrichtung während des Reifen-Boden-Kontakts. Dazu sind Kontakt-Suchalgorithmen notwendig. In einer folgenden Publikation werden die Parametrisierung des Reifenmodells und die Validierung beschrieben werden [26].

### **Zusammenfassung**

Die Reifenhersteller weiten ihr Angebot an Reifen aus, um den wachsenden Anforderungen durch die unterschiedlichsten Einsatzbedingungen gerecht zu werden. Lösungen mit Schwerpunkt Straßentransport, Feldarbeit und für deren Kompromiss wurden auf der Agritechnica vorgestellt. Zunehmend werden die Reifen „intelligent“ indem sie mit Sensoren für Reifendruck, Temperatur und Verschleiß ausgestattet werden. Damit lassen sie sich gut mit Reifendruckregelungen kombinieren. Aus Programmen der Hersteller werden auf Basis der Maschinen, der Geräte und des geplanten Einsatzes Reifendruckempfehlungen erstellt und bei Bestätigung durch den Fahrer direkt umgesetzt. In Kombination mit einer Berechnung des Bodendrucks können auch die aktuellen Bodeneigenschaften berücksichtigt werden.

### **Literatur**

- [1] Flebbe, W.: Reifen 5.0 - Reifendaten auf breiter Basis vernetzen. Eilbote 68 (2020) H. 7, S. 8-12.
- [2] Keppler, S.: Agrarreifen: Schnittstelle mit Profil. Lohnunternehmer 73 (2020) H. 1, S. 40-45.
- [3] Schulz, S.: Smarter Pneu für alle Fälle - Traktorreifen: Ground King von Nokian. profi 31 (2019) H. 10, S. 34-35.
- [4] Molari, G.; Mattetti, M.; Varani, M. et al.: Field performance of Trelleborg PneuTrac tyres. LandTechnik AgEng 2019, 08.-09.11.2019 Hannover. In: LandTechnik AgEng 2019. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2019, S. 57-62.
- [5] Conradi, N.: Vredestein Traxion XXL - Verschleißverhalten unter Realbedingungen – DLG-Prüfbericht 7026, DLG TestService GmbH. Groß-Umstadt 2019.
- [6] Botha, T. R.; Johnson, D. K.; Els, P. S. und Shoop, S.: Real time rut profile measurement in varying terrain types using digital image correlation. Journal of Terramechanics 83 (2019), S. 53-61.

- [7] Johnson, D. K.; Botha, T. R. und Els, P. S.: Real-time side-slip angle measurements using digital image correlation. *Journal of Terramechanics* 81 (2019), S. 35-42.
- [8] Longoria, R. G.; Brushaber, R. und Simms, A.: An in-wheel sensor for monitoring tire-terrain interaction: Development and laboratory testing. *Journal of Terramechanics* 82 (2019), S. 43-52.
- [9] Gupta, C.; Tewari, V. K.; Kumar, A. A. und Shrivastava, P.: Automatic tractor slip-draft embedded control system. *Computers and Electronics in Agriculture* 165 (2019).
- [10] Lyu, H.; Zheng, Z.; Zhang, R. et al.: Wireless Monitoring System of Working Load of Tractors Based on ZigBee. 2019 ASABE International Meeting, July 7 - 10, 2019 Boston, Massachusetts. In: 2019 ASABE International Meeting: American Society of Agricultural and Biological Engineers 2019.
- [11] Ciplienė, A.; Gurevicius, P.; Janulevicius, A. und Damanauskas, V.: Experimental validation of tyre inflation pressure model to reduce fuel consumption during soil tillage. *Biosystems Engineering* 186 (2019), S. 45-59.
- [12] Fedde, T.; Peeters, M. und Stirnimann, R.: Soil pressure and pulling behavior of standard and half-track tractor chassis concepts. *Landtechnik AgEng 2019*, 08.-09.11.2019 Hannover. In: *Landtechnik AgEng 2019*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2019, S. 35.
- [13] Kim, W.-S.; Kim, Y.-J.; Park, S.-U. et al.: Analysis of traction performance for an agricultural tractor according to soil moisture content during plow tillage. 2019 ASABE International Meeting, July 7 - 10, 2019 Boston, Massachusetts. In: 2019 ASABE International Meeting: American Society of Agricultural and Biological Engineers 2019.
- [14] Meiners, A.; Böttinger, S. und Regazzi, N.: Triebkraft/Schlupf-Verhalten von Acker-schlepperreifen – praxisnahe Messung und Simulation mit dem Hohenheimer Maschinenmodell. *Landtechnik* 75 (2020) H. 1, S. 1-13.
- [15] Md-Tahir, H.; Zhang, J.; Xia, J. et al.: Rigid lugged wheel for conventional agricultural wheeled tractors - Optimising traction performance and wheel-soil interaction in field operations. *Biosystems Engineering* 188 (2019), S. 14-23.
- [16] Oh, J.; Nam, J.-S.; Kim, S. und Park, Y.-J.: Influence of tire inflation pressure on the estimation of rating cone index using wheel sinkage. *Journal of Terramechanics* 84 (2019), S. 13-20.
- [17] Wieckhorst, J.; Fedde, T. und Frerichs, L.: Echtzeitmessung von Traktionsparametern eines Traktors bei der Bodenbearbeitung. *Landtechnik* 74 (2019) H. 1, S. 10-22.
- [18] Zheng, E.; Zhong, X.; Zhu, R. et al.: Investigation into the vibration characteristics of agricultural wheeled tractor-implement system with hydro-pneumatic suspension on the front axle. *Biosystems Engineering* 186 (2019), S. 14-33.
- [19] Kutzbach, H. D.; Bürger, A. und Böttinger, S.: Rolling radii and moment arm for the wheel load for pneumatic tyres. *Journal of Terramechanics* 82 (2019), S. 13-21.
- [20] Sitkei, G.; Pillinger, G.; Máthé, L. et al.: Methods for generalization of experimental results in terramechanics. *Journal of Terramechanics* 81 (2019), S. 23-34.



- [21] Lajunen, A.: Development of a tire-soil interaction model for agricultural tractors. Land-Technik AgEng 2019, 08.-09.11.2019 Hannover. In: LandTechnik AgEng 2019. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2019, S. 47-55.
- [22] He, R.; Sandu, C.; Khan, A. K. et al.: Review of terramechanics models and their applicability to real-time applications. Journal of Terramechanics 81 (2019), S. 3-22.
- [23] He, R.; Sandu, C. und Osorio, J. E.: Systematic tests for study of tire tractive performance on soft soil: Part I - Experimental data collection. Journal of Terramechanics 85 (2019), S. 59-76.
- [24] He, R.; Sandu, C. und Osorio, J. E.: Systematic tests for study of tire tractive performance on soft soil: Part II - Parameterization of terramechanics model and tire model. Journal of Terramechanics 85 (2019), S. 77-88.
- [25] Sandu, C.; Taheri, S.; Taheri, S. und Gorsich, D.: Hybrid Soft Soil Tire Model (HSSTM). Part I: Tire material and structure modeling. Journal of Terramechanics 86 (2019), S. 1-13.
- [26] Sandu, C.; Taheri, S.; Taheri, S. und Gorsich, D.: Hybrid Soft Soil Tire Model (HSSTM). Part II: Tire-terrain interaction. Journal of Terramechanics 86 (2019), S. 15-29.

#### **Autorendaten**

Prof. Dr.-Ing. Stefan Böttinger leitet das Fachgebiet Grundlagen der Agrartechnik am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim, Stuttgart.

<p><b>Bibliografische Angaben / Bibliographic Information</b></p> <p><b>Empfohlene Zitierweise / Recommended Form of Citation</b> Böttinger, Stefan: Reifen / Reifen-Boden-Interaktion. In: Frerichs, Ludger (Hrsg.): Jahrbuch Agrartechnik 2019. Braunschweig: Institut für mobile Maschinen und Nutzfahrzeuge, 2020. S. 1-9</p> <p><b>Zitierfähige URL / Citable URL</b> <a href="https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202001201525-0">https://doi.org/10.24355/dbbs.084-202001201525-0</a></p> <p><b>Link zum Beitrag / Link to Article</b> <a href="https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/jahrbuch-2019/chapter/reifen-boden.html">https://www.jahrbuch-agrartechnik.de/artikelansicht/jahrbuch-2019/chapter/reifen-boden.html</a></p> <p>Dieser Beitrag wird unter einer CC-BY-NC-ND 4.0 Lizenz veröffentlicht.</p>
---