

Innenkontur eines Traktorreifens auf festem und nachgiebigem Boden

Volkmar Schlotter und Heinz Dieter Kutzbach
Universität Hohenheim, Stuttgart

Für die Vorhersage der Kräfte und Momente, die ein Reifen auf den Untergrund übertragen kann, ist eine genaue Kenntnis der Kontaktfläche erforderlich. An der Universität Hohenheim wurde in die bestehende Einzelradmesseinrichtung eine Lasermesseinrichtung integriert. Mit einem Lasersensor im Rad kann der Abstand zur Innenkontur in der Lauffläche als auch im Bereich der Seitenflanke gemessen werden. Erste Ergebnisse zeigen eine weitreichende Verformung des Reifens auch außerhalb der Kontaktfläche, welche von bestehenden Modellen zur Kontaktflächenberechnung nicht berücksichtigt werden.

Schlüsselwörter

Traktorreifen, Innenkontur, Lasermesseinrichtung, Reifenverformung

Einleitung

Zunehmende Fahrzeugmassen von Traktoren und selbstfahrenden Arbeitsmaschinen haben in den letzten Jahren zu einer intensiveren Betrachtung der Wirkungsweise von Reifen und Boden geführt. Zum einen muss die Bauart und Geometrie der Reifen den gestiegenen Anforderungen bezüglich Leistungsfähigkeit und somit der Kraftübertragung angepasst werden, zum anderen wird die Verdichtung und Schädigung der Böden maßgeblich durch die verwendeten Reifen bedingt. Für die Beurteilung beider Kriterien ist die exakte Form und Fläche der Kontaktzone des Reifens mit der Oberfläche von entscheidender Bedeutung. An der Universität Hohenheim wurde eine Lasermesseinrichtung in einen Reifen eingebaut, um genaue Aussagen hinsichtlich des Verformungsverhaltens des Reifens treffen zu können.

Theorie

Die Kenntnis der genauen Kontur der Kontaktfläche ist für eine Beurteilung der Vorgänge im Reifen und der daraus entstehenden Wirkungen für die Kraftübertragung von Bedeutung. Auf fester Fahrbahn, wie Asphalt oder Beton, ist die Kontaktfläche maßgeblich von der Reifeneinfederung abhängig, da die Elastizität der Fahrbahn meist vernachlässigt werden kann. Diese Vereinfachung ist auf nachgiebigem Boden nicht mehr zulässig, da hier eine Verformung des Bodens und

somit eine Spurbildung stattfindet. Die Verformung des Bodens setzt sich aus einem plastischen und einem elastischen Anteil zusammen, so dass eine nachträgliche Messung der Bodenverformung den Momentanzustand während der Überfahrt nur bedingt widerspiegelt.

Der Rollwiderstand des Reifens setzt sich aus einem inneren Anteil, hervorgerufen durch die Walkarbeit des Reifens, und einem äußeren Anteil, hervorgerufen durch die Verformung des Bodens, zusammen. Eine genauere Betrachtung der Kräfte am Rad zeigt, dass die Definition des Schlupfnullpunktes die Kenntnis der entsprechenden Anteile voraussetzt. Nach Grečenko [1] rollt ein Rad schlupflos ab, wenn die Triebkraft dem äußeren Rollwiderstand entspricht. Da eine direkte Messung des äußeren Rollwiderstandes

nicht möglich ist, kann ersatzweise der innere Rollwiderstand auf fester Fahrbahn und der Gesamtwiderstand auf nachgiebiger Fahrbahn bestimmt werden. Unter der Annahme, daß der innere Anteil auf beiden Untergründen gleich ist, kann der äußere Rollwiderstand berechnet werden. Dies setzt eine identische Verformung des Reifens in beiden Situationen voraus - eine Annahme, die näher untersucht werden soll.

Für eine Voraussage der auftretenden Kräfte in der Kontaktfläche muss deren Form bekannt sein. Da bereits eine genaue Bestimmung des Umrisses zeitaufwendig ist, wird in vielen Modellen der Umriss der Aufstandsfläche durch ein Rechteck oder eine Ellipse angenähert. Die Breite des Reifens wird als Breite der Kontaktfläche angenommen. Somit lässt sich das Problem der Flächenbestimmung auf ein zweidimensionales Modell des Reifens in Längs- und Vertikalrichtung reduzieren. Während die Kontaktlinie des Reifens auf fester Fahrbahn durch eine Sekante dargestellt werden kann, erfolgt auf nachgiebigem Untergrund die Annäherung meist durch einen Kreisbogen mit vergrößertem Radius [2], eine Parabel [3], eine Spirale [4] oder der Kombination aus mehreren Elementen (**Bild 1**). Die Berechnung der Kontaktlänge hängt von einer Vielzahl von Reifen- und Bodenparametern ab, welche in den genannten Modellen mehr oder weniger stark berücksichtigt werden. Die Bestimmung der

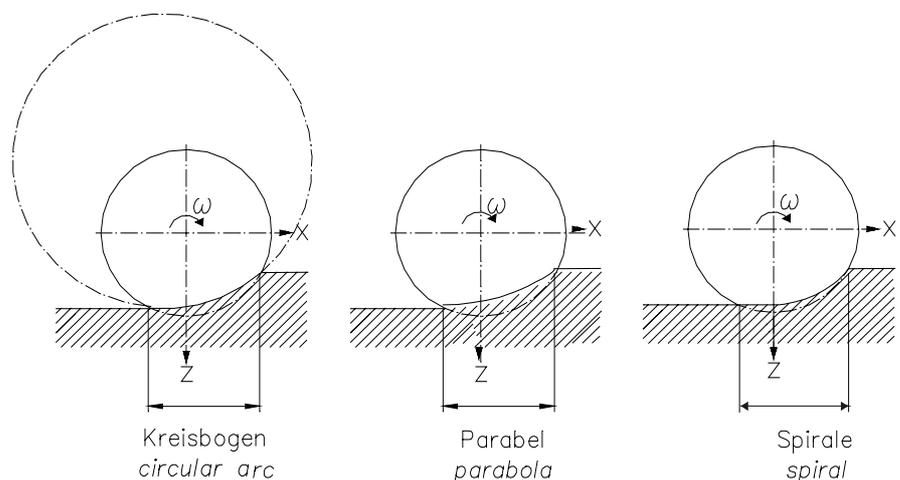


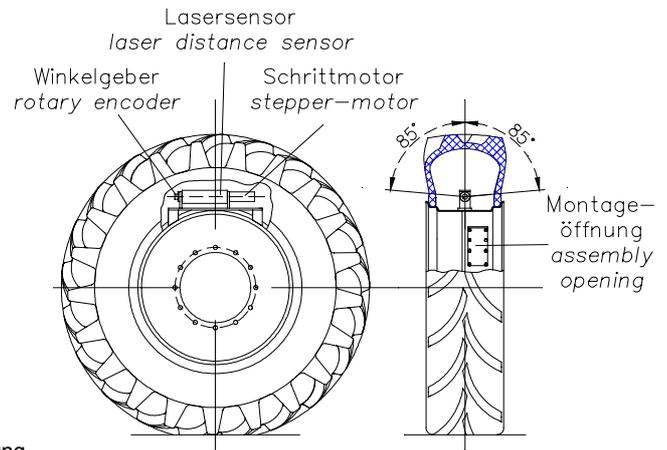
Bild 1: Reifenmodelle von Söhne [2], Schmid [3] und Okello [4]

Kontur erfolgt in iterativer Weise. Mit der berechneten Kontur kann die Normalspannungsverteilung mit Hilfe der Druck-Einsink-Beziehung von Bekker [5] berechnet werden. Normal- und Scherspannung werden für die Berechnung der Triebkräfte und des Rollwiderstandes genutzt.

Untersuchungsmethode

Für die Untersuchung wurde die Einzelradmesseinrichtung [6, 7] der Universität Hohenheim verwendet und erweitert. Die Messeinrichtung bietet eine gute Voraussetzung für die Erfassung der Kontaktfläche, da verschiedene Zustände des Reifens, wie beispielsweise Abrollen unter positiven oder negativen Längskräften oder bei Seitenkräften auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen dargestellt werden können. Da eine Messung der Außenkontur des Reifens während der Interaktion zwischen Reifen und Oberfläche nur mit großem Aufwand möglich ist, wurde ähnlich wie in Kiel [8] ein System zur Erfassung der Innenkontur entwickelt. Beim verwendeten Versuchsreifen der Größe 520/70 R34 ist im Innenraum des Reifens genügend Platz für den Einbau eines Laserabstandsensors vorhanden. Damit der Sensor bei der Reifenmontage nicht beschädigt wird, erfolgt der Einbau nach der Montage. Die in **Bild 2** abgebildete Felge wurde mit Montageöffnungen versehen. Auf einem Grundträger sind der Lasersensor, ein Schrittmotor und ein Winkelgeber montiert. Durch den Schrittmotor kann der Lasersensor quer zur Fahrtrichtung um einen Schwenkwinkel β von bis zu $\pm 85^\circ$ ausgelenkt werden. Der Grundträger wird auf die Felge montiert und rotiert mit dem Reifen. Weiterhin wurde ein Druckaufnehmer in die Felge eingebaut, um den genauen Reifeninnendruck zu erfassen. Die Messsignale werden über einen Schleifring zur Messdatenerfassung übertragen. Die Drehwinkelposition δ des Messrades wird über den bereits vorhandenen Drehwinkelgeber festgestellt. Zusätzlich wurde ein Näherungsschalter installiert, um die Nullstellung des Messrades zu definieren. Vor allem bei schräglauflendem Rad ist eine starke Verschiebung des Reifens zu erwarten, welche mit der Lasermesseinrichtung nur eingeschränkt erfasst werden kann. Systembedingt gibt der Laserabstandssensor die Distanz zur Innenkontur des Reifens wieder, ohne eine mögliche translatorische Bewegung des Messpunktes zu berücksichtigen. Andere Systeme aus Federn und Dehnmessstreifen berücksichtigen diese Flächenver-

Bild 2: Lasermesseinrichtung



schiebung [9]. Allerdings haben diese Systeme den Nachteil, dass nur ein Messpunkt ortsfest gemessen werden kann, d.h. eine Variation ist nur durch aufwendiges Versetzen des Messpunktes möglich.

Messungen wurden im Stand und während der Fahrt durchgeführt. Bei den Standmessungen wurde der Lasersensor durch den Schrittmotor geschwenkt, um das Querprofil des Reifens aufzuzeichnen. Für die einzelnen Messungen wurde das Rad in verschiedene Positionen gedreht, so dass ein Profil der gesamten Kontaktfläche entstanden ist. Für die Fahrtmessungen wurde der Laser in einer festen Position $\beta = \text{const}$ fixiert, und das Abstandssignal für mehrere Umdrehungen gemessen. Anschließend wurde der Schwenkwinkel β variiert und somit die Aufstandsfläche als auch die Flanke erfasst. Messungen wurden sowohl auf fester als auch auf nachgiebiger Fahrbahn durchgeführt. Dafür wurde eine Bodenrinne eingesetzt, welche mit sandigem Lehm gefüllt war.

Ergebnisse

Standmessungen

Mit zunehmendem Reifendruck zeigt der unbelastete Reifen einen größeren Reifenradius. Im Vergleich zur in [8] gemessenen, sehr deutlichen Auswölbung der Reifenmitte beim Diagonalreifen, zeigt die Innenkontur des Radialreifens nur eine geringe Zunahme des Reifenradius um wenige Millimeter. Der relativ steife Gürtel des Reifens verhindert eine größere Verformung der Reifenmitte, wohingegen ein Diagonalreifen durch die Wicklungsweise der Karkasse eine größere Verformung zulässt.

Bild 3 zeigt den Vergleich mehrerer Standmessungen auf festem und auf nachgiebigem Untergrund für unterschiedliche Radlasten. Dargestellt ist der reale Abstand des Lasers von der Innenkontur in Z- und Y-Richtung. Mit zunehmender Radlast nimmt die Einfederung des Reifens zu, wobei eine zunehmende Abplattung der Aufstandsfläche stattfindet. Die Abplattung und die Einfederung sind auf der Betonfahrbahn größer, da die Latschlänge geringer ist. Messungen auf fester Fahrbahn haben gezeigt, dass an der

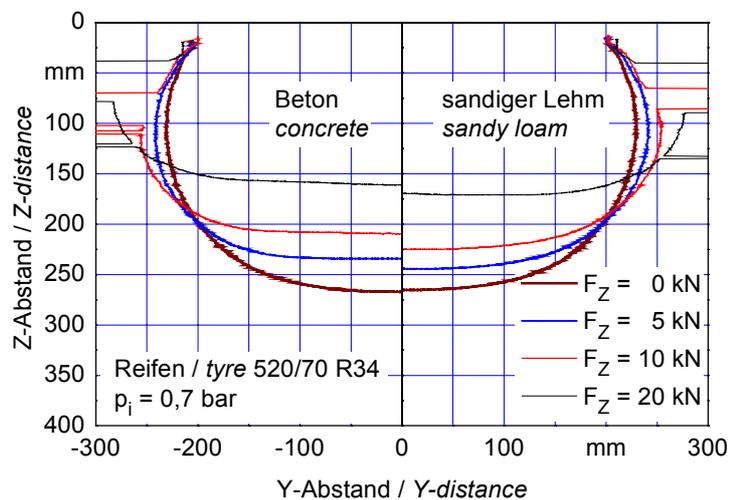


Bild 3: Innenkontur des Reifens in Querrichtung

Innenfläche des Reifens die Lage der Stollen erkennbar wird. Der Druck des Stollens führt zu einer Verformung der Karkasse, daher ist die Kontur im mittleren Bereich nicht parallel zur waagerechten Fahrbahnoberfläche, sondern zeigt bei -200 mm bis -100 mm eine Wölbung. Bei höheren Reifeninnendrüken wird dieser Effekt noch deutlicher. Der Grund dafür liegt in der verringerten Anzahl der in der Kontaktfläche befindlichen Stollen und der damit verbundenen reduzierten Reifenaufstandsfläche. Bedingt durch die zunehmende Auswölbung der Reifenflanke bei höheren Radlasten kommt es zu Fehlsignalen aufgrund der schlechten Reflexion des Laserstrahls an der Innenwand des Reifens.

Die Ergebnisse außerhalb der Aufstandsfläche zeigen im Ein- und Auslauf im allgemeinen ein symmetrisches Verhalten. Abweichungen sind unter anderem durch die Laufrichtung der Stollen bedingt. Beim Eintreten des Stollens in die Kontaktfläche findet die Krafteinwirkung von der Mitte statt, während der äußere Teil des Stollens die Kontaktfläche im Reifenauslauf zuletzt verläßt. Die Verformung der Innenkontur wird deshalb von dieser Einwirkung beeinflusst und erklärt die Abweichung.

Fahrtmessungen

In Bild 4 ist die reale Kontur, welche in einer Fahrtmessung ermittelt wurde, dargestellt. Die Innenkontur gibt den gemessenen Abstand des Lasers für eine Radumdrehung auf nachgiebigem Boden wieder. Die kreisförmige unbelastete Kontur des Reifens ist gestrichelt dargestellt. Ausgehend von der Innenkontur wurde die Form der zu erwartenden Außenkontur festgelegt. Dabei bleiben die Elastizitäten der Lauffläche in radialer Richtung und der Stollen unberücksichtigt. Für die Betrachtung der Aufstandsfläche werden gewöhnlich Bug- und Heckwinkel Θ_1 und Θ_2 herangezogen, welche den Ein- und Austrittspunkt der Kontaktfläche charakterisieren.

Theoretisch lässt sich der Bugwinkel über die Einsinkung des Reifens berechnen. Die elastische Rückverformung des Bodens erschwert eine genaue Bestimmung des Heckwinkels, aufgrund des geringen elastischen Anteils wird dieser näherungsweise vernachlässigt.

Wird die Kontur innerhalb der Kontaktfläche mit den theoretischen Ansätzen verglichen, so zeigen sich nur geringe Unterschiede für die einzelnen Modelle. Bild 5 zeigt die Abweichungen der Kreis- und Parabelkontur von der gemessenen Kontur innerhalb der Kontaktfläche. Aufgrund des relativ großen Durchmes-

sers der Traktorreifen im Vergleich zur Aufstandsfläche stellt die Kontur innerhalb der Kontaktfläche nur einen kleinen Abschnitt des gesamten Umfangs dar. Dieser Teil der Kontur lässt sich sowohl durch Kreisbögen als auch durch Parabeln oder Spiralen gut annähern.

Jedoch verursacht der relativ steife Gürtel des Reifens eine Verformung der Lauffläche auch außerhalb der eigentlichen Kontaktfläche. Durch die Vorverformung des Reifens ergibt sich eine Verschiebung des Eintrittspunktes des Reifens in die Kontaktfläche, so dass der reale Bugwinkel Θ_{1R} größer ist. Für den gezeigten Fall verringert sich die Kontaktlänge um 12,5 %, vorausgesetzt der Heckwinkel Θ_2 bleibt konstant.

In den bekannten theoretischen Ansätzen zur Bestimmung der Kontaktfläche wird der Reifen außerhalb des Kontaktbereichs durch den unbelasteten Radius r_0 angenähert. Bild 6 zeigt jedoch, dass dies nur eine grobe Näherung darstellt. Ein Vergleich mit dem unbelasteten Abstand l_0 des Lasersensors zeigt die Verschiebung und Verformung der Innenkontur über den gesamten Umfang. Im oberen Bereich

des Reifens findet eine nahezu konstante Verschiebung der Kontur nach außen statt. Im Bereich von $\delta = 90^\circ$ und $\delta = 270^\circ$ zeigt sich eine zusätzliche Anhebung der Innenkontur. Die Winkel δ_1 und δ_2 charakterisieren die anschließende Verformung des Reifens durch den Kontaktdruck in der Aufstandsfläche. Dieser Bereich beinhaltet eine Vor- und Nachverformungszone außerhalb der Aufstandsfläche. Die Intensität der Vor- und Nachverformung des Reifens hängt von der Auslastung ab und ist mit zunehmender Gesamtverformung ausgeprägter. Daher kann die Verformung des Reifens nur unzureichend durch die in Bild 4 gezeigten Bug- und Heckwinkel beschrieben werden kann.

Weiterhin wurde festgestellt, dass die Verformung nicht symmetrisch ist. Vor allem auf nachgiebigem, aber auch auf festem Untergrund ist die Verformung in der Eintrittszone stärker als in der Austrittszone. Dies gilt sowohl in als auch außerhalb der Kontaktfläche.

Ergänzend zu den Messungen in der Reifenmitte wurden zusätzlich die Reifenflanken untersucht. Wie bereits in Bild 3

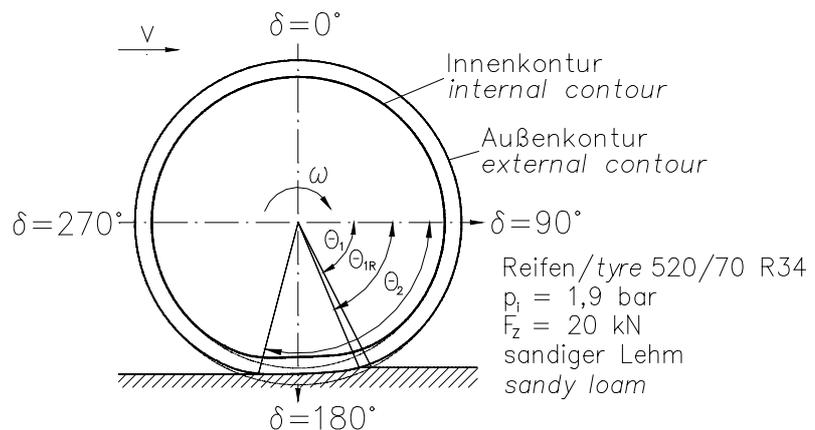


Bild 4: Verformung des Reifens in Längsrichtung

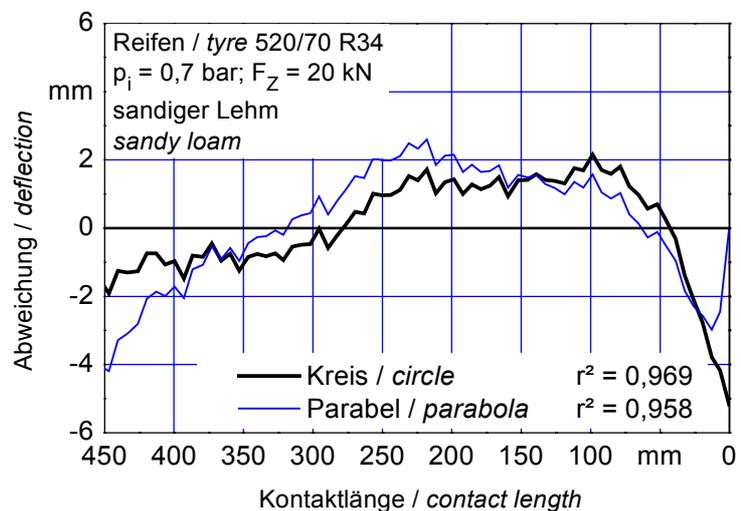


Bild 5: Abweichung der Ersatzmodelle von der realen Innenkontur

für die Standmessungen gezeigt, findet im Bereich der Aufstandsfläche eine Aufweitung statt. Dadurch ergibt sich ein gegensätzliches Verhalten im Vergleich zu Bild 6. Der Abstand in der Kontaktfläche ist vergrößert, während in der Vor- und Nachverformungszone außerhalb der Kontaktfläche die Flanke leicht nach innen verschoben ist.

Vergleich von Stand- und Fahrtmessungen

Wird der Abstand des Lasersensors in der Reifenmitte für Stand- und Fahrtmessungen auf fester Fahrbahn verglichen, so zeigen sich nahezu identische Ergebnisse. Eine zu erwartende Zunahme des Rollradius und des Reifenumfanges für höhere Fahrgeschwindigkeiten [10] konnte nicht nachgewiesen werden. Die Gründe dafür sind in der geringen Fahrgeschwindigkeit bei den Fahrtmessungen zu sehen.

Für einen Vergleich der Messungen auf nachgiebiger Fahrbahn ergeben sich für die Fahrtmessungen größere Verformungen im Reifeneinlauf. Bei den Standmessungen wird nach Abschluss des Setzens des Bodens ein stationärer Zustand erreicht, so dass ein Vergleich nicht sinnvoll ist. Bei den Fahrtmessungen setzt der Boden dem rollenden Rad mehr Widerstand entgegen. Gleichzeitig wird bei stärkerer Verformung der Reifenmitte die Reifenflanke stärker nach außen verformt.

Bestimmung des Rollradius

Die gemessenen Konturen in der Kontaktfläche zeigen die Problematik der Rollradius-Bestimmung auf. Verschiedene Definitionen des Rollradius liefern unterschiedliche Ergebnisse. So wird der Momentenradius nicht in der Radmitte gemessen, sondern verschoben um den Hebelarm der Radlast [7]. Das Ergebnis unterscheidet sich von der geometrischen Rollradius-Bestimmung aus dem Abrollumfang des Reifens. Die gemessenen Innenkonturen verdeutlichen, dass je nach Angriffspunkt veränderte Werte für den Abstand eines Kontaktpunktes von der Radmitte erzielt werden.

Fahrtmessungen mit schräglauflendem Rad

Für einen Schräglaufwinkel von $\alpha = 15^\circ$ wurden Fahrtmessungen durchgeführt und der Abstand der Lasermesseinrichtung zur Innenkontur unter verschiedenen Schwenkwinkeln β aufgezeichnet (Bild 7). Die Auslenkung des Lasersensors erfolgt dabei in kurvenäußere Richtung. Bild 8 zeigt die Abrolllinien des schräglauflenden Rades bei verschiedenen Winkeln des Lasersensors im Vergleich

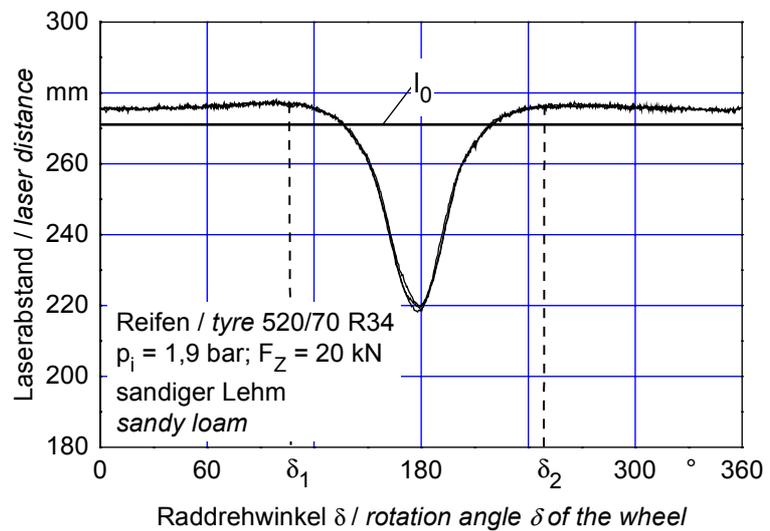


Bild 6: Abweichung der Innenkontur vom Abstand l_0 des unbelasteten Reifens

mit dem un gelenkten Rad. Dargestellt ist der reale Abstand der Reifeninnenkontur vom Lasersensor, als Referenz dient der Abstand l_0 des unbelasteten Reifens. Bei der senkrechten Abstandsmessung ($\beta = 0^\circ$) federt der Reifen bei ausgelenktem Rad stärker ein. Dieses Ergebnis wird auch durch die Messung des Rollradius während der Messfahrt bestätigt. Bei Messungen außerhalb der Reifenmitte ($\beta = 20^\circ; 40^\circ; 60^\circ$) zeigt sich deutlich, dass die Reifenkontur nicht mehr symmetrisch im Reifenein- und auslauf ist. Die Wellenbildung im Bereich des Reifenauslaufs lässt auf eine Stauchung des Reifens schließen. Weiterhin ist deutlich die Verringerung des Abstandes zur Flanke des Reifens durch die Einwirkung der Seitenkraft zu erkennen. Die Verformung der Reifenflanke erstreckt sich bei schräglauflendem Rad nahezu über den gesamten Umfang. Die Ausweitung der Reifenflanke im Bereich der Kontaktfläche wird durch die überlagerte Verschiebung reduziert. Auch im Bereich der Reifenflanke ist die Kontur nicht symmetrisch im Reifenein- und auslauf. Die größere Verformung im Reifenauslauf kann von der Geometrie des Profils

herrühren, da die Stollen im Reifenauslauf stärker im äußeren Bereich belastet werden und somit die Flanke mehr eindrücken können.

Fazit

Die Messungen zeigen, dass die bisherigen Modelle zur Simulation der Reifenkontur die reale Verformung des Reifens unzureichend berücksichtigen, da sich der Reifen nicht nur in der Aufstandsfläche, sondern nahezu über den gesamten Umfang verformt. Ein Vergleich von Fahrtmessungen auf nachgiebigem und festem Untergrund zeigt unterschiedliche Ergebnisse. Der Reifen auf nachgiebigem Untergrund wird geringer verformt. Dieses Ergebnis zeigt, dass der innere Rollwiderstand auf fester und nachgiebiger Fahrbahn auch bei sonst gleichen Parametern nicht identisch ist. Die Bestimmung des anteiligen inneren Rollwiderstandes auf nachgiebiger Fahrbahn bleibt weiterhin problematisch. Durch den Rückgriff auf den Rollwiderstand auf fester Fahrbahn wird der Anteil des inneren Rollwiderstandes zu groß, was die

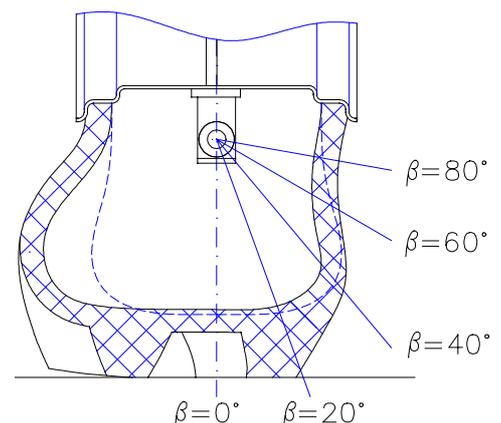


Bild 7: Messung der Innenkontur des schräglauflenden Reifens

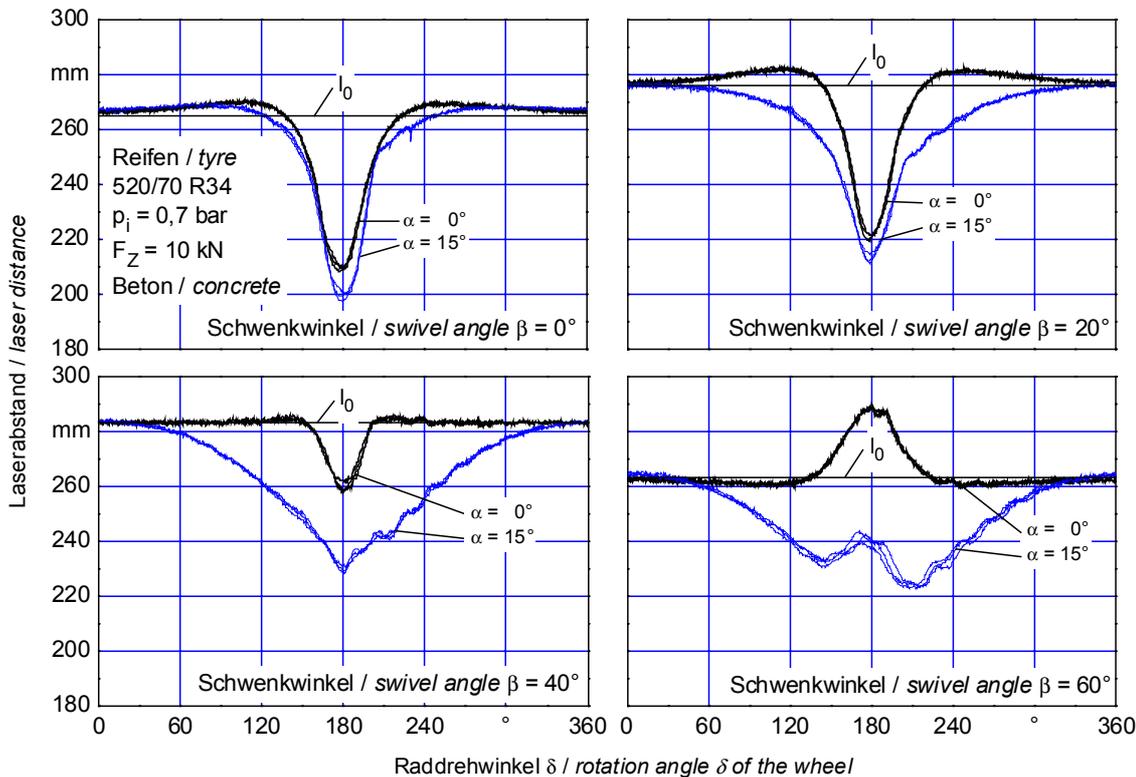


Bild 8: Einfluß des Schräglaufwinkels α auf die Verformung des Reifens

bekannte Problematik der Bestimmung des Schlupf-Nullpunktes zusätzlich erschwert [11]. Zukünftige Modelle sollten den Verformungszustand des Reifens berücksichtigen und eine Berechnung des inneren Rollwiderstandes ermöglichen.

Literatur

- [1] Grečenko, A.: Slip and drift model of the wheel with tyre on soft ground. Proceedings of the 3rd International Conference of ISTVS, Essen (1969) 2, S. 76-95.
- [2] Söhne, W.: Agricultural Engineering and Terramechanics. Journal of Agricultural Terramechanics (1969) Vol. 6, No. 4, S. 9-30.
- [3] Schmid, I.C.: Inflation pressure control to improve terrain-trafficability - a model for simulation. Proceedings of the 11th International ISTVS Conference, Lake Tahoe, USA, (1993)1, S.64-75.
- [4] Okello, J.A.: Prediction of the force distribution between the soil and a pneumatic wheel. Journal of Agricultural Engineering Research (1992) 51, S.249-262.
- [5] Bekker, M.G.: Off-the-Road Locomotion, Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1956.
- [6] • Armbruster, K.: Untersuchungen der Kräfte an schräglaufenden angetriebenen Ackerschlepperrädern. Dissertation Universität Stuttgart 1991, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 53.
- [7] • Barreilmeyer, Th.: Untersuchung der Kräfte an gelenkten und angetriebenen Ackerschlepperrädern bei Gelände- und Straßenfahrt. Dissertation Universität Stuttgart 1996, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr. 79.
- [8] Schwieger, H.: Verformung des Reifens und Anpassung an die Bodenoberfläche. Landtechnik 50 (1995) 6, S. 330-331.
- [9] Plessis du, H.L.M.: The static and dynamic deflection characteristics of a 18.4-38 tractor tyre on hard and deformable surface. AgEng (1994) 94-D-078, S. 1-10.
- [10] • Plessler, J.: Dynamisches Verhalten von Ackerschlepperreifen in Vertikal- und Längsrichtung auf fester Fahrbahn. Dissertation Universität Stuttgart 1997, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 14, Nr.83.
- [11] Barreilmeyer, Th.: Längs- und Seitenkräfte an Ackerschlepperrädern bei Gelände- und Straßenfahrt. Agrartechnische Forschung 3 (1997) H. 2, S. 99-108.

Autor

Dipl.-Ing. Volkmar Schlottter
Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik
Lehrstuhl Verfahrenstechnik in der Pflanzen-
produktion mit Grundlagen der Landtechnik
Garbenstr. 9
70599 Stuttgart
Tel.: +49/(0)711/459-2492
Fax: +49(0)711/459-2519
e-mail: vschlott@uni-hohenheim.de

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Heinz Dieter Kutzbach
Universität Hohenheim
Institut für Agrartechnik
Fachgebiet Verfahrenstechnik in der Pflanzen-
produktion mit Grundlagen der Landtechnik
Garbenstraße 9
70593 Stuttgart
Tel.: +49/(0)711/459-3200
Fax: +49(0)711/459-2519
e-mail: kutzbach@uni-hohenheim.de