

Grundlagen der Landtechnik

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Herausgegeben mit Unterstützung durch die
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder,
Institut für Biosystemtechnik

Grundl. Landtechnik Bd. 38 (1988) Nr. 5, S. 137 bis 168

Ackerschlepper-Reifendynamik

Teil 3: Rolldynamik und Betriebsverhalten

Von Axel Kising und Horst Göhlich, Berlin*)

DK 631.372:629.11.012.55:625.032.4

Höhere Fahrgeschwindigkeiten führen bei Ackerschleppern zu Resonanzen aufgrund von Reifenerregermechanismen, die ursächlich auf Radunrundheiten, -unwuchten und die Reifenprofilierung zurückgeführt werden können.

Wegen der erheblichen Bedeutung dieser Erregermechanismen für die Fahrdynamik der Ackerschlepper [1, 2] werden nachfolgend die Ursachen und deren Auswirkungen bei verschiedenen AS-Reifen untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen beziehen sich auf die in Teil 2 vorgestellten Reifengrößen bzw. -typen.

1. Einleitung

Eine umfassende Bewertung von Ackerschlepper-Reifen hinsichtlich fahrsicherheitstechnischer und den Fahrkomfort betreffender Aspekte sollte neben den dynamischen Kenndaten Federsteifigkeit und Dämpfungsgrad [3, 4] auch Informationen über das Überrollverhalten und die Reifenerregung aufgrund von Radunrundheiten und -unwuchten sowie der Reifenprofilierung berücksichtigen.

Gerade in Bereichen höherer Geschwindigkeiten spielen diese Phänomene eine zunehmend wichtigere Rolle und bestimmen erheblich das Fahrverhalten. Zu einem gewissen Anteil korrelieren diese Größen dann mit den vertikaldynamischen Eigenschaften der großvolumigen Ackerschlepper (AS)-Reifen.

Für die Untersuchungen wurde der Flachbahnreifenprüfstand des Institutes für Landtechnik und Baumaschinen der TU Berlin eingesetzt [5].

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft wird für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens gedankt.

*) Dipl.-Ing. A. Kising war von 1983 bis 1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenkonstruktion, Institutsbereich Landtechnik und Baumaschinen, der TU Berlin; Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich ist Leiter dieses Institutsbereiches.

2. Resonanzen aufgrund von Reifenerregermechanismen

Mit dem Anstieg der Maximalgeschwindigkeiten von AS-Reifen kommt es bei bestimmten Fahrgeschwindigkeiten zu kritischen Resonanzzuständen, die bis zum Abheben des Fahrzeuges führen können, ohne daß eine Fahrbahnregung vorliegt.

Die Reifenprofilierung verursacht aufgrund der großen Anzahl von Profilstollen hochfrequente Schwingungsanregungen der Radachse. Sie sind weniger für die sicherheitstechnische Betrachtung als für den Fahrkomfort von Interesse.

2.1 Radunrundheiten und Rundlaufverhalten

Es muß prinzipiell zwischen den Unrundheiten des unbelasteten Rades, zusammengesetzt aus Felgen- und Reifenunrundheit, und dem Rundlaufverhalten eines unter Last abrollenden Rades unterschieden werden. Mit welchen Unrundheiten der AS-Räder im allgemeinen zu rechnen ist und wie sie sich auf das wirksame Abrollverhalten unter Last auswirken, soll nachfolgend geklärt werden.

Zur Aufnahme der radialen Radunrundheit wurde entsprechend Bild 1 mit Hilfe einer Meßuhr die Distanz von der Radachse zu bestimmten Felgen- und Reifenpunkten diskret und "äquiangular" über dem Reifendrehwinkel von 0 bis 2π gemessen.

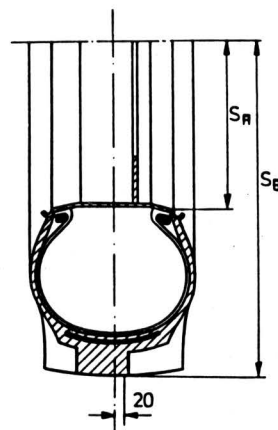


Bild 1. Meßpunkte am Felgenhorn und an der Reifenperipherie zur Ermittlung von Felgen- und Reifenunrundheit.

Das Rundlaufverhalten des unter Last abrollenden Rades wurde bei der Rollgeschwindigkeit von 5 km/h über den Abstand der Radachse von der Fahrbahnebene ermittelt. Die Festlegung der Geschwindigkeit erfolgte so, daß einerseits Anregungen aus dem Profileingriff bei noch niedrigeren Rollgeschwindigkeiten vermieden werden und andererseits Radunwuchten aufgrund der geringen Rotationskreisfrequenz sich dem Meßsignal nicht störend überlagern können.

Der am Reifenumfang gemessene Höhengschlag des Rades setzt sich aus Formfehlern von Reifen und Felgen zusammen. Je nachdem, in welcher Position der Reifen auf der Felge montiert ist, können sich die beiden Anteile verstärken oder abschwächen.

Im wesentlichen wurden drei unterschiedliche Formen von Radformfehlern festgestellt, die folgendermaßen definiert werden [6]:

- Lokale Unrundheit; verursacht durch eine Aus- oder Einbeulung des Reifenmaterials aufgrund zu langer Standzeiten unter Last oder ungleichmäßigen Stollenverschleiß
- Unrundheit 1. Ordnung; gekennzeichnet durch eine Exzentrizität mit sinusförmigem Verlauf bei einer Periode über dem Reifenumfang. Diese Form der Unrundheit wird verursacht durch zu große Fertigungstoleranzen von Felge und Reifen sowie durch ungenügende Zentrierung der Felge auf der Radnabe
- Unrundheit 2. Ordnung; gekennzeichnet durch einen sinusförmigen Verlauf mit zwei Perioden über dem Reifenumfang, Bild 2. Die Ursachen für diese Form der Unrundheit sind gleich denen der Unrundheit 1. Ordnung.

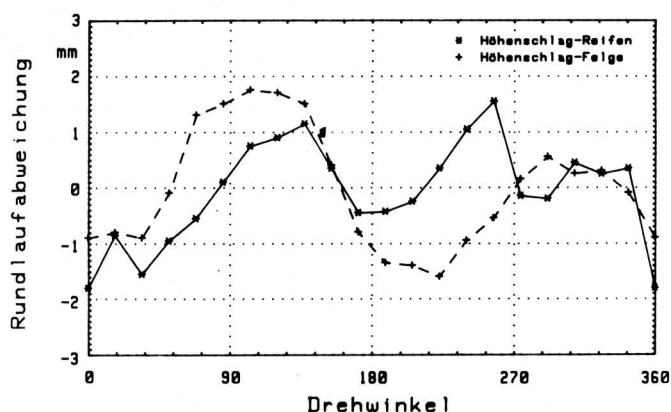


Bild 2. Rundlaufabweichung von Felge und Reifen als Funktion des Drehwinkels; Reifen AS 10 (18.4 R 38), unbelastet, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa.

Am Beispiel einer Unrundheit 2. Ordnung soll der Einfluß der Felge, des Reifens und der Radlast untersucht werden. Bild 2 zeigt den Höhengschlag von Felge und Rad als Funktion des Drehwinkels.

Es kann eine deutliche Wirkung der Felgenungleichförmigkeit auf den Höhengschlag des Rades festgestellt werden. Der Reifen folgt der Felgenform bis auf eine lokale Ausbeulung zwischen 180 und 270 Grad. Die Gleichförmigkeit des Reifens ist trotz des viskoelastischen Materials erstaunlich gut. Hierbei muß jedoch erwähnt werden, daß sich sämtliche Reifen im Neuzustand befanden.

Wie sich die Radungleichförmigkeit auf den unter Last abrollenden Reifen auswirkt, ist in Bild 3 dargestellt. Obwohl der mit etwa 15 kN belastete Reifen eine Latschfläche von annähernd 500 mm Länge aufweist und um 60 mm eingefedert ist, zeigt er weitgehend den gleichen charakteristischen Verlauf mit nahezu identischen Amplitudenwerten wie der unbelastete Reifen. Die angenommene integrierende Wirkung der Latschfläche wirkt sich demnach nicht bei Unrundheiten erster und zweiter Ordnung aus.

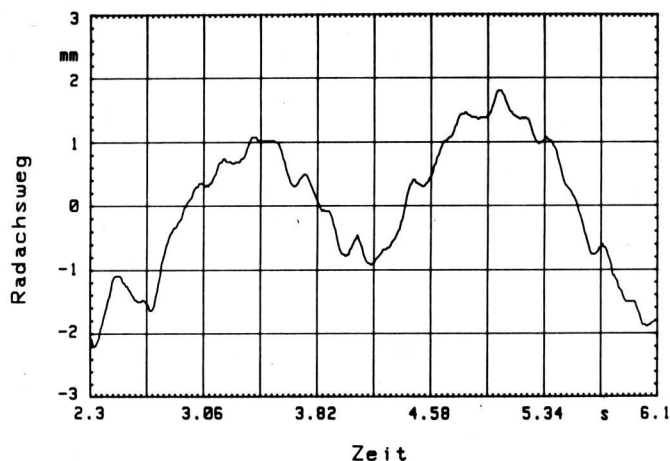


Bild 3. Rundlaufabweichung, dargestellt als Weg der Radachse senkrecht zur Fahrbahnoberfläche, als Funktion der Zeit; Reifen AS 10 (18.4 R 38), $m = 1560$ kg, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $v = 5$ km/h.

Für die untersuchten AS-Reifen sind in Bild 4 und 5 die maximalen Formabweichungen von Felge und Rad zusammengestellt. Die Schwankungsbreite wird dabei als Weg der Radachse senkrecht zur Fahrbahnoberfläche zwischen dem minimalen und maximalen Amplitudenwert definiert.

Bis auf die beiden AS-Frontreifen AS 4 und AS 6 kann die Felgenunrundheit als Hauptursache der Radunrundheit identifiziert werden. Bei den Radialreifen AS 4 und AS 6 allerdings ist die Reifengleichförmigkeit deutlich schlechter als die Felgengleichförmigkeit. Mit Schwankungsbreiten um 2 mm weisen die Fronträder AS 7 und AS 8 sowie die Hinterräder AS 2 und AS 12 relativ gute Werte auf. Alle übrigen Räder liegen im Bereich von 3–4 mm.

2.2 Auswirkung der Radunrundheiten und -unwuchten auf das vertikale Schwingungsverhalten

Radunrundheiten und -unwuchten führen bei bestimmten Rotationskreisfrequenzen durch Anregung des Gesamtsystems in der Eigenkreisfrequenz zu niederfrequenten Resonanzzuständen des Einmassenschwingersystems Reifen-Radschwinge. Infolgedessen kann es zu erheblichen Radlastschwankungen kommen, die sowohl die Fahrsicherheit beeinträchtigen als auch eine erhöhte Bauteilbeanspruchung zur Folge haben.

Die kritische Fahrgeschwindigkeit, bei der die Drehkreisfrequenz einer Unrundheit erster oder zweiter Ordnung mit der Eigenkreisfrequenz des Systems übereinstimmt, läßt sich auf einfache Weise rechnerisch ermitteln:

$$v_{\text{krit}} = \omega_0 R_{\text{dyn}}/j$$

mit

- j Grad bzw. Ordnung der Unrundheit
- ω_0 Eigenkreisfrequenz des Systems
- R_{dyn} dynamischer Rollradius.

Entsprechend dieser Beziehung steigen die kritischen Fahrgeschwindigkeiten mit dem Reifennendruck an, da der dynamische Rollradius und die Eigenkreisfrequenz des Systems zunehmen.

Sowohl bei den AS-Hinterrreifen als auch bei den AS-Frontreifen liegen die kritischen Fahrgeschwindigkeiten um 30 km/h beim Reifennendruck von $0,8 \cdot 10^5$ Pa und um 20 bzw. 40 km/h bei $1,6 \cdot 10^5$ Pa. Die Frontreifen haben zwar geringere Rollradien, andererseits aber wegen der geringeren Auslastung – verglichen mit den Hinterrreifen – eine höhere Eigenkreisfrequenz, so daß die höhere Eigenkreisfrequenz den kleineren Rollradius kompensiert.

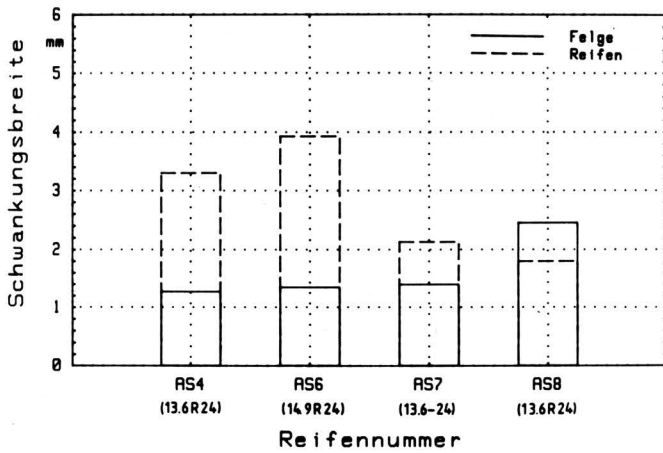


Bild 4. Maximale radiale Ungleichförmigkeit der AS-Fronträder, dargestellt als Schwankungsbreite zwischen Minimal- und Maximalwert des Abstandes Radachse/Fahrbahnoberfläche. Räder unbelastet, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa.

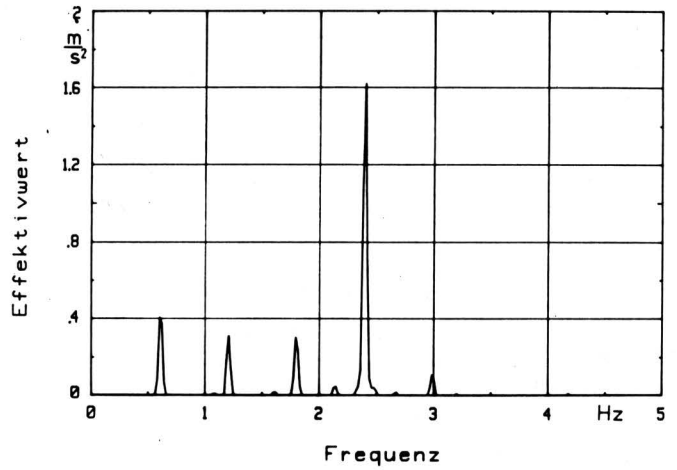


Bild 6. Beschleunigungsspektrum; AS 11 (13.6–38), $m = 1550$ kg, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $v = 10$ km/h.

Wird der Stoßfaktor für die verschiedenen Fahrgeschwindigkeitsstufen bei den Geschwindigkeiten ermittelt, bei denen sich Resonanzen einstellen, dann ergibt sich eine Übersicht der kritischen Geschwindigkeiten und der dazugehörigen Resonanzamplituden, **Bild 7**. In diesem Fall stimmt die Eigenfrequenz des Systems bei etwa 42 km/h mit der Drehkreisfrequenz der Reifenunrundheit 1. Ordnung überein. Hier treten deshalb die größten Radlaststoßfaktoren auf; der Reifen verliert beinahe den Bodenkontakt. Bei der Hälfte dieser Fahrgeschwindigkeit ist eine weitere Resonanzstelle vorhanden, die aber von untergeordneter Bedeutung ist.

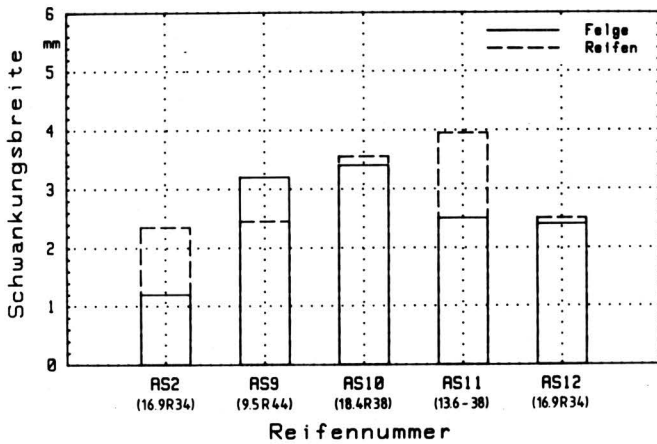


Bild 5. Maximale radiale Ungleichförmigkeit der AS-Hinterräder, dargestellt als Schwankungsbreite zwischen Minimal- und Maximalwert des Abstandes Radachse/Fahrbahnoberfläche; Räder unbelastet, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa.

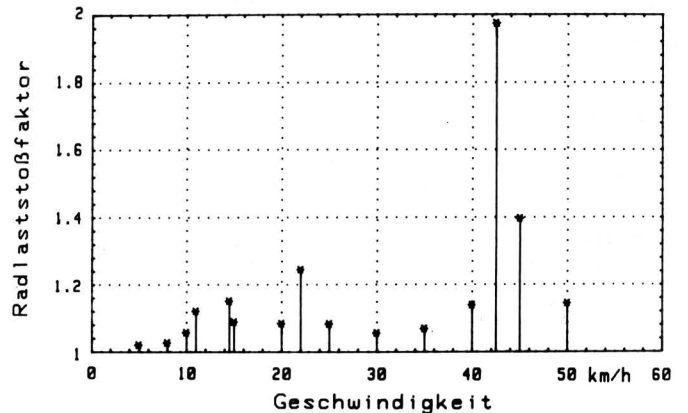


Bild 7. Radlaststoßfaktor als Funktion der Fahrgeschwindigkeit; Reifen AS 11 (13.6–38), $m = 1550$ kg, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa.

Bild 8 und 9 ermöglichen einen Vergleich der maximalen Radlaststoßfaktoren der untersuchten AS-Reifen bei zwei verschiedenen Reifeninnendrucken.

Die Erhöhung des Reifeninnendruckes von $0,8 \cdot 10^5$ Pa auf $1,6 \cdot 10^5$ Pa führt zu einem starken Anstieg der dynamischen Radlast und damit der Stoßfaktoren. Die Ursachen hierfür liegen in der größeren dynamischen Federsteifigkeit, der geringeren Latschlänge in Verbindung mit einer Zunahme lokaler Unrundheiten des Reifens durch herausstehende Einzelstellen und dem Anstieg der kritischen Fahrgeschwindigkeiten aufgrund der Zunahme des dynamischen Rollradius. Da jede Unrundheit eine unsymmetrische Verteilung der Radmasse bedeutet, bewirkt sie auch meist eine Unwucht, die in Abhängigkeit von der Rollgeschwindigkeit – trotz des größeren dynamischen Rollradius – stark zunimmt.

Das Weg-Frequenzspektrum eines AS-Reifens bei der Fahrgeschwindigkeit von 10 km/h, **Bild 6**, verdeutlicht eine weitere Eigenschaft periodisch einlaufender Reifenunrundheiten oder -unwuchten.

Da jede periodische Funktion, die beschränkt und stückweise stetig ist, nach *Fourier* aus einer Summe harmonischer Funktionen besteht, wird das System auch durch die ganzzahligen Vielfachen der Grundharmonischen angeregt, soweit diese vorliegen. Die Amplituden der höherharmonischen Anregungssignale nehmen mit dem Frequenzabstand zur Grundharmonischen ab, regen aber dennoch beim Zusammentreffen mit der Eigenkreisfrequenz das System an.

Wegen des periodischen Verlaufs der Radlast wurde zur Beurteilung der Fahrsicherheit und Bauteilbeanspruchung der Radlaststoßfaktor n_R aus den Maximalwerten der Schwingungsamplituden entsprechend [1] berechnet. Nimmt der Stoßfaktor den Wert 0 an bzw. überschreitet er in der Gegenphase den Wert 2, dann verliert das Rad den Bodenkontakt.

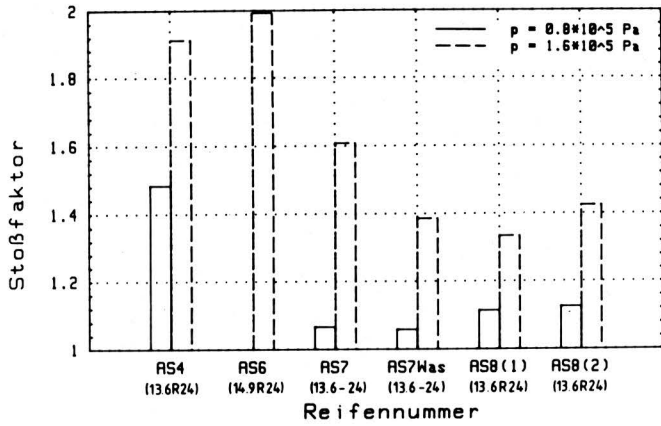


Bild 8. Maximale Radlaststoßfaktoren der AS-Frontreifen für zwei Werte des Reifeninnendruck; Radlast $m = 800$ kg.

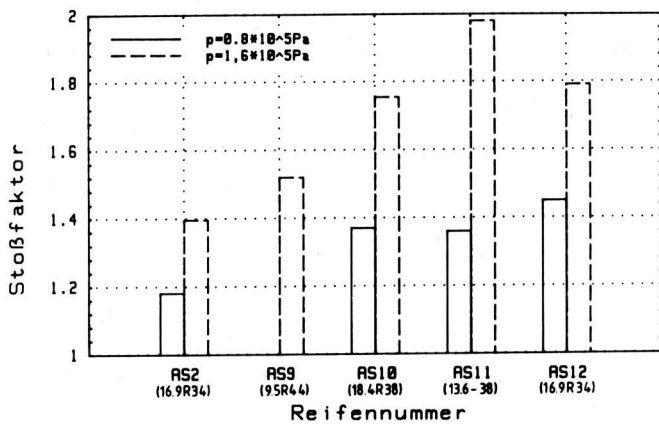


Bild 9. Maximale Radlaststoßfaktoren der AS-Hinterreifen für zwei Werte des Reifeninnendruck; Radlast $m = 1300$ kg.

Vergleicht man die Radlaststoßfaktoren der AS-Front- und -Hinterreifen, so stellt man fest, daß die Reifen AS 4 und AS 6 einerseits sowie AS 11 und AS 12 andererseits die größten Werte erreichen und nur geringfügig von einem Abheben entfernt sind. Dies korreliert eindeutig mit der Größe der Formabweichungen in radialer Richtung. Gleichzeitig ist aber auch die Art der Unrundheit von Bedeutung. Eine Unrundheit 1. Ordnung, d.h. eine Exzentrizität, regt den Reifen erheblich stärker an (z.B. AS 9, AS 11, AS 12) als eine lokale Unrundheit mit einzeln aus dem Reifenumfang hervorstehenden Profilelementen (z.B. AS 2).

Der Radialreifen AS 10 mit einer Unrundheit 2. Ordnung wiederum zeigt, daß trotz der größeren Unrundheitsamplitude geringere Resonanzamplituden auftreten als beim Reifen AS 12 mit einer Unrundheit 1. Ordnung. Die niedrigere kritische Fahrgeschwindigkeit hat den Vorteil einer höheren Reifendämpfung und stärkerer Einfederung aufgrund geringerer Fliehkraftwirkung.

Eine Wasserfüllung von 75 % beim Diagonalreifen AS 7 verbesserte das Resonanzverhalten wegen der größeren Radmasse und der stabilisierenden Wirkung des "Wasserrings" im Geschwindigkeitsbereich bis 45 km/h. Es konnte aber beobachtet werden, daß oberhalb 45 km/h starke Resonanzen auftraten, die sich erst nach längerer Betriebsdauer bei einer konstanten Rollgeschwindigkeit schlagartig einstellten und nur durch ein Herabsetzen der Fahrgeschwindigkeit auf 30 km/h wieder zum Abklingen gebracht werden konnten. Die Wasserfüllung scheint hier in Interaktion mit der Systemeigenfrequenz zu treten und so zu einem instabilen Systemverhalten beizutragen.

Wie man durch eine geringfügige Veränderung der Felgenunrundheit die dynamischen Radlasten beeinflussen kann, zeigt der Radialreifen AS 8. Eine Vergrößerung der Formabweichung um 0,5 mm bewirkt einen Anstieg des Stoßfaktors insbesondere bei hohem Reifeninnendruck.

2.3 Hochfrequente Anregung durch die Reifenprofilierung

Die grobstollige schaufelförmige Bauweise der Einzelprofile von AS-Reifen führt wegen der großen Anzahl von Profilelementen bereits bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zu relativ hochfrequenten Anregungen der Fahrzeugachse und des Fahrzeugaufbaus. Dadurch treten an Teilen der Fahrzeugkarosserie störende Vibrationen und Geräuschtentwicklungen auf. Für den Fahrzeugführer wirken sich diese Phänomene nachteilig insbesondere hinsichtlich des Fahrkomforts aus.

Welchen Einfluß die Profilform und -höhe sowie der Reifenaufbau auf die Intensität dieser hochfrequenten Schwingungsanregungen haben, soll nachfolgend dargestellt werden.

Bei der Bewertung der Frequenzspektren muß zunächst das Systemeigenverhalten der Radschwinge als Kontinuumschwinger berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck wurde die Radschwinge mit eingebautem Rad stoßförmig angeregt und das Frequenzantwortspektrum dargestellt.

Eine Übereinstimmung der Eigenfrequenzen der Radschwinge mit den Anregungsfrequenzen der Profilelemente konnte nicht festgestellt werden. Dennoch treten die von den Reifen stammenden Störanregungen im Spektrum um so stärker in Erscheinung, je näher sie bei einer Eigenfrequenz der Radschwinge liegen.

Mit dem System Radschwinge ist ein qualitativer Vergleich unterschiedlicher AS-Reifen möglich, wenn die Versuchsbedingungen konstant gehalten werden.

Der typische Verlauf der spektralen Leistungsdichte der Radachsbeschleunigung eines Radialreifens ist in Bild 10 dargestellt. Charakteristisch zeigt sich eine geschwindigkeitsabhängige Verschiebung der Resonanzstellen. Diese Resonanzen liegen nicht wie zunächst vermutet bei der Stolleneingriffsfrequenz, sondern bei der halben Stolleneingriffsfrequenz. Sie werden durch das wechselseitige Einlaufen der rechts und links von der Radmittelebene angeordneten Profilstellen verursacht.

Bei niedrigen Rollgeschwindigkeiten erzeugte dieser Effekt deutliche Wankbewegungen des Systems Radschwinge, die aufgrund eines gewissen Lagerspiels an der Schwingeneinspannung ermöglicht wurden.

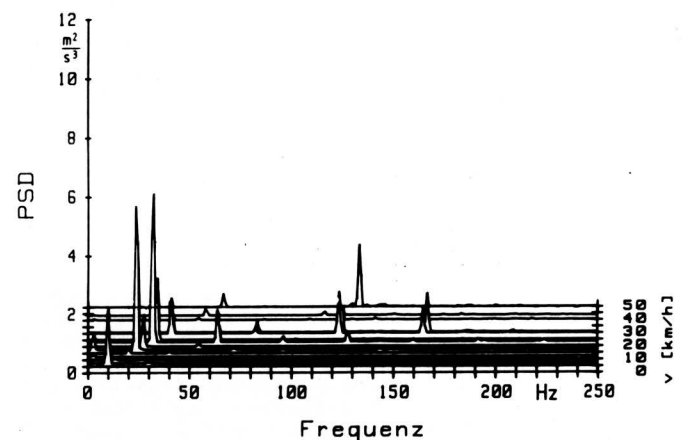


Bild 10. Spektrale Leistungsdichte (PSD) der Radachsbeschleunigung für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten; Reifen AS 8 (13.6 R 24), $m = 968$ kg, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, Auflösung $\Delta f = 1,5$ Hz, Ordinatenursprung auf $v = 0$ km/h bezogen.

Der relativ steife Gürtel des Radialreifens unterdrückt weitgehend die vertikal wirkende Stolleneingriffsfrequenz der nacheinander einlaufenden Profilelemente. In gleichem Sinne wirkt auch die Überdeckung der Profilelemente in der Radmitte.

Mit der Rollgeschwindigkeit v , dem dynamischen Rollradius R_{dyn} und der Stollenzahl n läßt sich die Stolleneingriffsfrequenz wie folgt berechnen:

$$f_{\text{Sto}} = \frac{v}{2 \pi R_{\text{dyn}}} n.$$

Die periodische Stollenanregung führt ferner zu höherharmonischen Anregungsfrequenzen, die bei einem ganzzahligen Vielfachen der Grundharmonischen liegen. Sie sollen wegen der geringeren praktischen Bedeutung nicht Gegenstand der weiteren Betrachtungen sein.

Verringert man den Reifeninnendruck, dann reduzieren sich die Resonanzspitzen beim Radialreifen nur geringfügig. Auch dieser Effekt wird durch die stabilisierende Wirkung des Reifengürtels erklärbar. Größere radiale Profilverchiebungen können bei der Variation des Reifeninnendruckes nicht auftreten.

Ganz anders verhält sich im Vergleich zum Radialreifen ein Diagonalreifen gleicher Größe, **Bild 11**. Die Intensitätsmaxima bei der halben Stolleneingriffsfrequenz sind doppelt so hoch und im Bereich der eigentlichen Stolleneingriffsfrequenz treten zusätzliche Resonanzen auf.

Das Fehlen eines Reifengürtels bei dem Diagonalreifen läßt eine ballige Reifenoberfläche entstehen, wodurch die einzelnen Profilstollen stärker aus dem Umfang herausstehen und beim Durchlaufen der Latschfläche als stoßförmige Anregung wirken. Wegen des erheblich steiferen Aufbaus der Reifenseitenwand werden diese Stollenanregungen stärker auf die Radachse übertragen als beim Radialreifen.

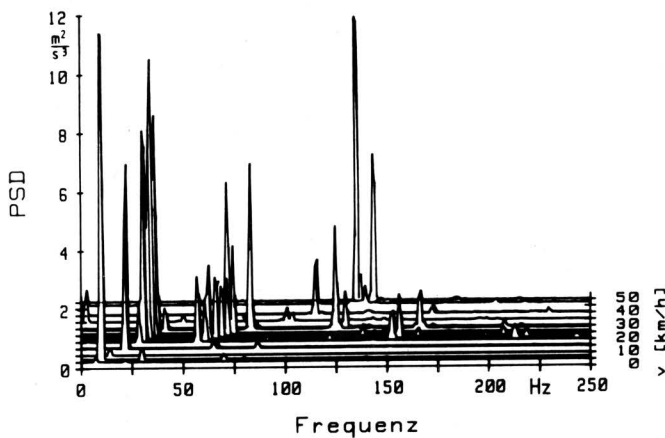


Bild 11. Spektrale Leistungsdichte (PSD) der Radachsbeschleunigung für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten; Reifen AS 7 (13.6–24), $m = 962$ kg, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, Auflösung $\Delta f = 1,5$ Hz, Ordinatenursprung auf $v = 0$ km/h bezogen.

Ein interessantes Phänomen ergibt sich, wenn der Diagonalreifen zu 75 % seines Innenvolumens mit Wasser gefüllt wird, **Bild 12**. Es zeigt sich, daß die vertikale Resonanz bei der Stolleneigenfrequenz stark reduziert wird. Die Trägheitswirkung des Wasserrings im Reifen führt zu einer gürtelähnlichen Stabilisierung.

Doch sollte daraus nicht geschlossen werden, daß ein wassergefüllter Diagonalreifen sich ähnlich verhält wie ein Radialreifen, denn stärkere Abrollgeräusche weisen auf größere Profilverformungen in der Latschfläche und damit auf höheren Verschleiß hin, und die Wasserfüllung kann bei hohen Geschwindigkeiten zu plötzlichem Aufschwingen führen.

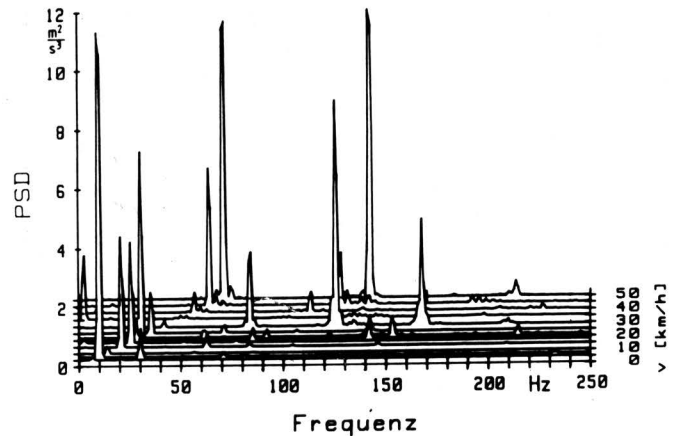


Bild 12. Spektrale Leistungsdichte (PSD) der Radachsbeschleunigung für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten; Reifen AS 7 (13.6–24) mit 75 % Wasserfüllung, $m = 1070$ kg, $p = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, Auflösung $\Delta f = 1,5$ Hz, Ordinatenursprung auf $v = 0$ km/h bezogen.

Die beim Grünlandreifen AS 12 (16.9 R 34) um 30 % geringere Stollenhöhe führte im Vergleich zum sonst baugleichen Standardreifen AS 2 (16.9 R 34) zu einer Halbierung der Intensitätsmaxima. Somit ist die Stollenhöhe eine weitere wichtige Einflußgröße für das Komfortverhalten eines AS-Reifens.

3. Überrollverhalten

Die Antwort des Reifens beim Überfahren eines diskreten Hindernisses gibt Auskunft über das Schluckverhalten bei stoßförmiger lokaler Beanspruchung des Reifenlatsches [7, 8].

Für die AS-Frontreifen wurde ein Hindernis mit einem Querschnittsprofil von 48 mm Höhe und 80 mm Breite ausgewählt, um zu einer möglichst realistischen Beanspruchung zu gelangen. Das Hindernis darf nicht zu schmal dimensioniert sein, damit es nicht von dem Zwischenraum zweier Stollenelemente aufgenommen werden kann.

Bei der Versuchsdurchführung wurde darauf geachtet, daß die Hindernisse exakt quer zur Fahrtrichtung auf das Metallband aufgelegt wurden. Mindestens drei Einzelversuche dienten jeweils zur Sicherung der Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse.

Die Radschwinge konnte sich entsprechend einem Einmassenschwingersystem frei bewegen. Aus den Maxima der Zeitfunktionen von Radlast und Achsweg wurden der Schluckgrad und der Radlastfaktor berechnet.

Das Überrollverhalten eines AS-Reifens zeigt **Bild 13** am zeitlichen Verlauf des Radachsweges senkrecht zur Fahrbahnoberfläche. Beim Passieren des Hindernisses wird die Radschwinge angehoben und schwingt anschließend mit der Eigenfrequenz des gedämpften Systems aus.

Den Schluckgrad als Funktion der Fahrgeschwindigkeit zeigt für zwei unterschiedliche Werte des Reifeninnendruckes **Bild 14**. Es ergeben sich charakteristische, degressiv ansteigende Kurvenverläufe.

Der Schluckgrad ist relativ klein, wenn die Rollgeschwindigkeit niedrig ist und der Reifen einen hohen Innendruck aufweist. Im Geschwindigkeitsbereich bis 20 km/h steigt der Schluckgrad dann stark an. Bei noch höheren Geschwindigkeiten tritt eine Art Sättigungszustand insbesondere bei dem höheren Reifendruck ein; der Schluckgrad erhöht sich mit zunehmender Geschwindigkeit dann nur noch geringfügig.

Während der Reifen bei geringen Rollgeschwindigkeiten überwiegend von dem Hindernis angehoben wird, bewirkt die Trägheit von Rad- und Aufbaumasse bei höheren Geschwindigkeiten eine zunehmende Verformung der Reifenseitenwand und der Profilelemente. Die Beanspruchungszeit verkürzt sich erheblich.

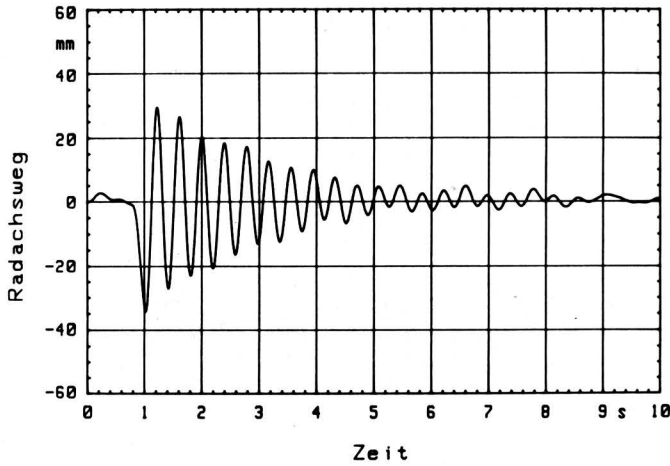


Bild 13. Zeitlicher Verlauf des Radachsweges senkrecht zur Fahrbahnoberfläche beim Überrollen eines Hindernisses 48 mm x 70 mm, Reifen AS 8 (13.6 R 24), $m = 968 \text{ kg}$, $p = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $v = 10 \text{ km/h}$.

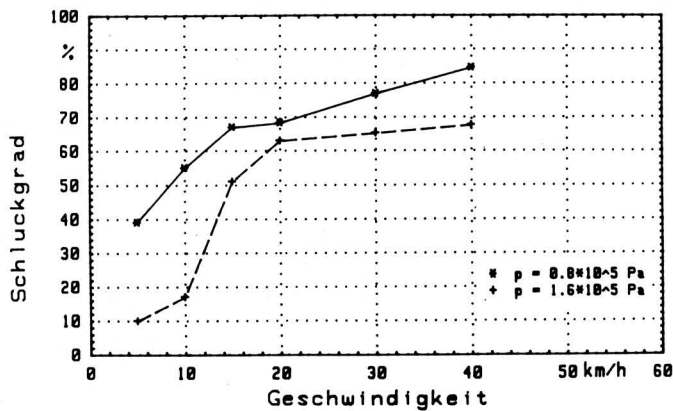


Bild 14. Schluckgrad beim Überrollen eines Hindernisses 48 mm x 70 mm als Funktion der Fahrgeschwindigkeit für zwei Werte des Reifeninnendruckes; Reifen AS 8 (13.6 R 24), $m = 968 \text{ kg}$.

Der Schluckgrad verschiedener AS-Frontreifen ist für mehrere Fahrgeschwindigkeiten in **Bild 15** zusammengestellt. Der Radialreifen AS 4 und der Diagonalreifen AS 7 haben die relativ größten Werte des Schluckvermögens. Während beim Radialreifen AS 4 hierfür die vergleichsweise niedrigste statische Federsteifigkeit verantwortlich gemacht werden kann, ist das größere Schluckvermögen des Diagonalreifens nur damit erklärbar, daß er aufgrund des Reifenaufbaus stärkere lokale Verformungen zuläßt.

Der Niederquerschnittsreifen AS 6 (14.9-24) zeigt wegen des breiten Gürtels und des kleinsten Höhen/Breiten-Verhältnisses das geringste Schluckvermögen. Weiterhin kann der um 15 % geringere Auslastungsgrad hierfür verantwortlich gemacht werden.

Der Verlauf des Radlaststoßfaktors weist im Geschwindigkeitsbereich zwischen 5 und 20 km/h ein ausgeprägtes Maximum auf, **Bild 16**, das durch die starke Anregung der Radschwinge verursacht wird. Mit zunehmender Geschwindigkeit verhindern die Massenträgheitskräfte stärkere Bewegungen der Radschwinge und reduzieren somit die dynamischen Radlasten. Bei dem Reifeninnendruck von $1,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ und der Rollgeschwindigkeit von 10 km/h hebt das Rad von der Fahrbahn ab.

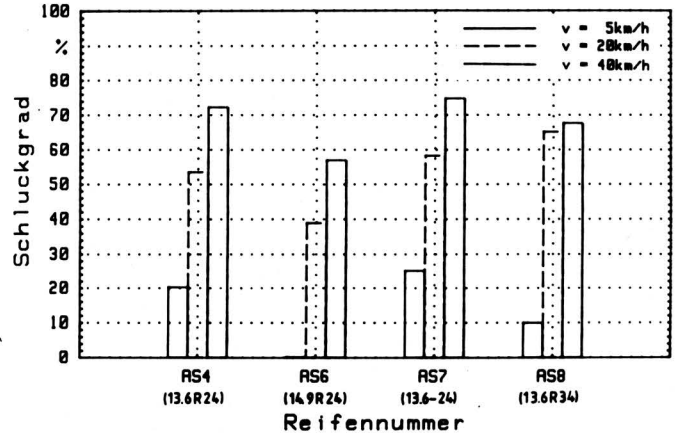


Bild 15. Schluckgrad von AS-Frontreifen bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten; $m = 800 \text{ kg}$, $p = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$.

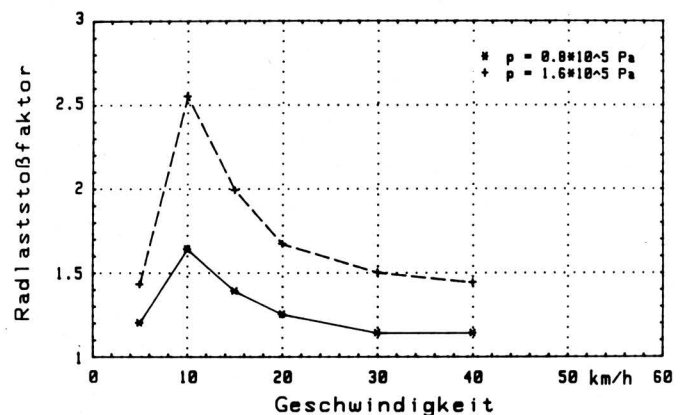


Bild 16. Radlaststoßfaktor als Funktion der Fahrgeschwindigkeit für zwei Werte des Reifeninnendruckes, Reifen AS 7 (13.6-24), $m = 952 \text{ kg}$.

Der Vergleich der Stoßfaktoren verschiedener AS-Frontreifen bei einer ausgewählten Rollgeschwindigkeit von 40 km/h zeigt, daß die beiden Radialreifen AS 6 und AS 8 die größten Werte aufweisen, **Bild 17**. Dies korreliert direkt mit dem geringeren Schluckgrad dieser beiden Reifen.

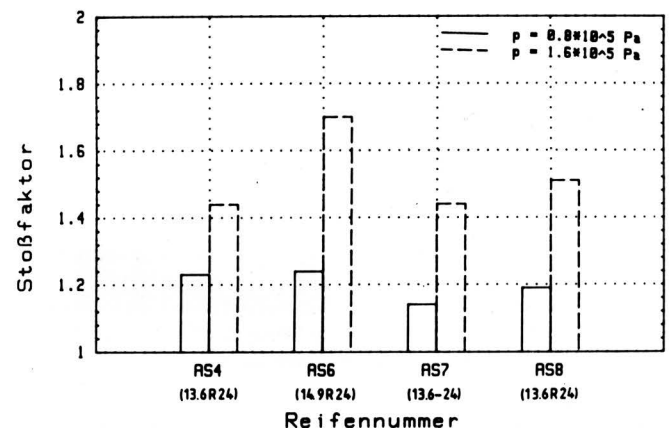


Bild 17. Radlaststoßfaktoren von AS-Frontreifen bei zwei Werten des Reifeninnendruckes, $m = 800 \text{ kg}$, $v = 40 \text{ km/h}$.

4. Zusammenfassung

Das rolldynamische Verhalten von AS-Reifen bestimmt wesentlich die Fahrsicherheit, den Fahrkomfort und die Beanspruchung von Felge, Achse und Fahrzeugaufbau im Bereich hoher Geschwindigkeit.

Insbesondere die Reifenerregungen der grobstolligen und großvolumigen AS-Reifen aufgrund von fertigungstechnischen Toleranzen konnten als Hauptursache instabiler Reifenverhaltens identifiziert werden. Kritische Fahrzeugzustände lassen sich demnach nur durch eine Verbesserung des Rundlaufverhaltens von Felge und Reifen verhindern. Als besonders nachteilig haben sich in diesem Zusammenhang Unrundheiten 1. Ordnung, d.h. Exzentrizitäten erwiesen, da sie erst bei hohen Fahrgeschwindigkeiten und damit bei niedrigen Dämpfungswerten die Eigenfrequenz des Rad-Masse-Systems anregen.

Während die Radunrundheiten und -unwuchten vorwiegend im niederfrequenten Schwingungsbereich wirksam waren, regte die grobstollige Reifenprofilierung Rad und Teile des Fahrzeugaufbaus im hohen Frequenzbereich an. Hierbei handelte es sich in erster Linie um Resonanzerscheinungen aufgrund der halben und ganzen Stolleneingriffsfrequenz im Bereich bis 100 Hz. Diagonalfelgen regten die Fahrzeugachse erheblich stärker an als Radialreifen. Das bessere Komfortverhalten der Radialreifen ist auf die stärkere Entkopplung von Reifengürtel und Radachse aufgrund der weicheren Seitenwand sowie auf das gleichmäßige bandartige Einlaufen des Reifengürtels zurückzuführen. Es deutet sich ferner an, daß weitere Verbesserungen des Abrollverhaltens durch geeignete, in die Radmittelebene gebogene Stollenformen, durch niedrigere Stollenhöhen und eine gewisse Überdeckung der rechts- und linksseitigen Profilstollen erreicht werden können.

Mit dem Anstieg der Fahrgeschwindigkeiten werden die Überrolleigenschaften mit den Bewertungskriterien Schluckgrad und Radlaststoßfaktor hinsichtlich der Fahrsicherheit und Bauteilbeanspruchung immer wichtiger. Das Überrollverhalten ist insbesondere von den äußeren Einflußgrößen Reifeninnendruck, Radlast und Rollgeschwindigkeit abhängig. Ein hoher Auslastungsgrad, niedriger Reifeninnendruck und hohe Fahrgeschwindigkeiten führten

im allgemeinen zu großem Schluckvermögen, da das Rad-Masse-System aufgrund seiner Trägheit und der stoßförmigen Beanspruchung nur ungenügend reagieren konnte. Die Hauptverformung fand deshalb in einem lokal begrenzten Bereich in der Reifenseitenwand und den Profilstollen statt. Zwischen den Radialreifen und Diagonalfelgen konnten keine größeren Unterschiede festgestellt werden.

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Kenndatenermittlung von AS-Reifen für höhere Geschwindigkeiten als Basis numerischer Simulation. Vortrag bei der Internationalen Tagung Landtechnik, Braunschweig 1987.
- [2] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Dynamic properties of agricultural tyres. Vortrag AG-ENG, Paris 1988.
- [3] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Ackerschlepper-Reifendynamik, Teil 1: Fahrbahn- und Prüfstandsergebnisse. Grndl. Landtechnik Bd. 38 (1988) Nr. 3, S. 78/87.
- [4] *Kising, A. u. H. Göhlich*: Ackerschlepper-Reifendynamik, Teil 2: Dynamische Federungs- und Dämpfungswerte. Grndl. Landtechnik Bd. 38 (1988) Nr. 4, S. 101/106.
- [5] *Göhlich, H. u. A. Kising*: Flachbahnreifenprüfstand zur Kennwertermittlung von großvolumigen Traktor- und Baumaschinenreifen. Forschung aktuell 1987, Jg. 4, Nr. 16/77, S. 52/54.
- [6] • *Reimpell, J. u. P. Sponagel*: Fahrwerkstechnik: Reifen und Räder. Würzburg: Vogel-Buchverlag 1986.
- [7] • *Buschmann, H. u. P. Koeßler*: Handbuch für den Kraftfahrzeugingenieur. Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt 1972.
- [8] *Senger, G.*: Über dynamische Radlasten beim Überrollen kurzweiliger Unebenheiten durch schwere Luftreifen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Heft 187, 1967.

Trocknungs- und Befeuchtungskinetik von Gras in dünnen Schichten

Von Andreas Spittel, Paulinenaue*)

DK 664.8.047:633.1.004.12

Bei der Belüftungstrocknung von Halbheu in Bergeräumen wird das Gut je nach Richtung der treibenden Kraft – örtlich und zeitlich wechselnd – durch Entzug von Wasser getrocknet oder durch Kondensation befeuchtet. Die Ausdehnung der Trocknungs- und Befeuchtungszone und somit das Temperatur- und Feuchtigkeitsprofil im Haufwerk wird dabei wesentlich von der Geschwindigkeit des Wärme- und Wasseraustausches zwischen Trocknungsgut und umgebender Luft bestimmt. Der Beitrag stellt im Schrifttum verfügbare Versuchsergebnisse und die Ergebnisse eigener Trocknungs- und Befeuchtungsversuche an dünnen Grasschichten dar, die zur Modellierung der Belüftungstrocknung von Halbheu dienen können.

*) Dr.-Ing. A. Spittel ist Abteilungsleiter am Institut für Futterproduktion Paulinenaue der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.

1. Stand der Kenntnisse

Für die Computersimulation des Trocknungsprozesses von Halbheu in Belüftungsanlagen ist die Kinetik des Wasseraustausches zwischen Trocknungsgut und umgebender Luft eine notwendige Komponente [1].

Die analytische Berechnung der Trocknungsgeschwindigkeit von Gras mit einem Diffusionsmodell ist mit vertretbarem Aufwand und hinreichender Genauigkeit nicht möglich. Der Diffusionswiderstand des Blattes bzw. des Halmes von Gräsern ist in Diffusionsrichtung örtlich unterschiedlich, und auch die Verteilung des Wassers im Pflanzengewebe ist inhomogen. Die massebezogene Pflanzenoberfläche ist von Teil zu Teil verschieden und variiert zudem mit dem Entzug von Wasser. Deshalb wird die Trocknungsgeschwindigkeit experimentell durch Trocknen von Einzelteilen oder dünnen Schichten ermittelt.

Im klassischen Trocknungsversuch [2] werden die Temperatur, die Feuchte und die Geschwindigkeit der mit Überschuß strömenden Luft entsprechend den zu modellierenden Verfahrensbedingungen eingestellt und konstant gehalten. Die Gutfeuchte wird indirekt durch Wiegen der Gutmasse in Abhängigkeit von der Zeit bestimmt.