

# Abplattung, Auflagefläche und Tragfähigkeit der Traktorenreifen

Prof. Dr.-Ing. G. Komádi, Universität für Agrarwissenschaften, Landtechnische Fakultät, Gödöllő (Ungarische VR)

Die Einführung der Luftbereifung in der Landwirtschaft beeinflusste seinerzeit die weitere Entwicklung der Traktoren in bedeutendem Maß. Einerseits wurde ihr Anwendungskreis erweitert, andererseits das Herausbringen von Traktoren mit größerer Leistung gefördert. Eigentlich ermöglichte erst die fortgeschrittene Reifentechnik das Erscheinen der leistungsfähigen Universaltraktoren unserer Tage mit Motorleistungen von 200 bis 300 PS (147 bis 220 kW).

Der Luftreifen hat zweierlei Aufgaben: er trägt das Fahrzeug und ermöglicht außerdem durch sein Haften am Boden das Entfallen der zum Überwinden der Widerstände notwendigen Zugkraft bzw. Umfangskraft. Eines der Ziele der Traktorenentwicklung ist das Steigern des Zugvermögens und das Vermindern des Fahrwiderstands. Beides hängt einerseits von der Bodenart, andererseits vom Traktorreifen ab.

Forschungen über den Fahrwiderstand und das Entstehen der Umfangskraft untersuchen in erster Linie deren Beziehungen zum Boden. Dieser trägt als Fahrbahn das Fahrzeug und ermöglicht außerdem das Wirksamwerden der notwendigen Umfangskraft. Unerläßlich sind deshalb die Kenntnis der physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Bodens sowie der Kenngrößen der diese beeinflussenden Faktoren. Aber es wäre ebenso wichtig, auch die physikalisch-mechanischen Eigenschaften des mit dem Boden in unmittelbarer mechanischer Berührung stehenden Luftreifens sowie sein Verhalten unter verschiedenen Geländebedingungen zu kennen. Das letztere ist eine ziemlich schwierige Aufgabe, da der Reifen nicht als ein homogenes Material angesehen werden kann und sich seine Oberfläche nicht in einer Ebene abwickeln läßt. Außerdem wird er in verschiedenen Maßen und Formen hergestellt, so daß sein mechanisches Verhalten natürlich von der Herstellungsweise und auch von der Qualität des Materials abhängt. Diese Aufgabe kann deshalb nur annähernd gelöst werden.

## Rolle des Luftreifens beim Entstehen des Fahrwiderstands und beim Abstützen der Umfangskraft

Der Fahrwiderstand der auf Ackerböden rollenden Fahrzeuge hängt sowohl von der Größe der Radbelastung und den geometrischen Abmessungen des Fahrwerks als auch von der Tragfähigkeit des Bodens ab. Die letztere wird durch Bodendruckmessungen bestimmt, bei denen die Veränderung der Festigkeit vom Eindringen eines Stempels in den Boden gemessen und registriert wird. Es ist allgemein bekannt, daß die so gewonnenen Diagramme Funktionen der geometrischen Abmessungen des Stempelkopfes sind. Um das auszuschließen und die während der Versuche erhaltenen Daten verallgemeinern zu können, führten Bekker und später Saakjan die nachfolgenden Zusammenhänge zum Bestimmen der Beziehung zwischen Druck und Eindringtiefe in den Boden ein.

Nach Bekker:

$$p = (k_c/b + k_f) Z^n \quad \text{in } \text{kp/cm}^2 \quad (1)$$

Nach Saakjan:

$$p = k (Z/D)^n \quad \text{in } \text{kp/cm}^2 \quad (2)$$

$k_c$  Kohäsionsgrad des Bodens in  $\text{kp/cm} \cdot \text{cm}^n$

$k_f$  Reibungsgrad des Bodens in  $\text{kp/cm}^2 \cdot \text{cm}^n$

$Z$  Maß des Eindringens in den Boden in cm

$b$  Breite der Auflagefläche in cm

$D$  Durchmesser des Stempelkopfes in cm

$k$  eine von der Bodenart abhängige Konstante

Diese Zusammenhänge sind nur dann mit Erfolg anwendbar wenn die Auflagefläche konstant bleibt. In diesem Fall läßt sich nämlich anhand von Belastung und Auflagefläche der

Flächeneinheitsdruck ausrechnen und mit Hilfe der vorstehenden Gleichungen das Maß des Eindringens in den Boden bestimmen. Wenn sich aber durch die Lasteinwirkung die Auflagefläche wie z. B. beim Luftreifen, ändert, wäre zum Bestimmen des Einsinkens noch eine Gleichung erforderlich. Es muß daher die Veränderung der Auflagefläche der Reifen in Abhängigkeit von ihrer Belastung bekannt sein.

Das auf dem Boden rollende Rad stützt sich durch die Wirkung des Drehmoments am Boden ab, verformt ihn in geringem Maße und schert ihn dann ab. Die Summe der entlang der Auflagefläche des Reifens entstehenden elementaren Scherkräfte ergibt die umsetzbare Umfangskraft. Eine zum Bestimmen der Umfangskraft allgemein anwendbare Beziehung lautet nach Jánosi-Hanamoto und eigenen Forschungen:

$$F_u = (A c + \mu G) \left[ 1 - \frac{K_{red}}{\sigma l} \left( 1 - e^{-\frac{\sigma l}{K_{red}}} \right) \right] \quad (3)$$

Die wirksame Umfangskraft wird folglich einerseits durch Bodenfaktoren, wie Kohäsion  $c$ , Reibungszahl  $\mu$  und reduzierte Scherverformungsveränderliche  $K_{red}$ , andererseits durch das Traktorgewicht  $G$  und durch geometrische Abmessungen, wie Auflagefläche  $A$ , Auflagenlänge  $l$  sowie durch den Schlupf  $\sigma$  bestimmt. Die auf die Treibräder entfallende Belastung wird nach der vorstehenden Gleichung durch die Bodenreibung, die Auflagefläche durch die Kohäsion wirksam.

In diesem Zusammenhang ändert sich bei einem Fahrwerk mit Luftreifen die Größe der Auflagefläche ebenfalls proportional mit der Belastung. Demzufolge ist zum Bestimmen der mit einem Luftreifen zu entwickelnden Umfangskraft nicht nur die Kenntnis der mechanischen Kennzahlen des Bodens notwendig, sondern es muß auch die Veränderung der Auflagefläche des Luftreifens in Abhängigkeit von der Belastung bekannt und auch mathematisch auszudrücken sein.

Diese Erwägungen sowie das Bestreben, daß die für den Fahrwiderstand und die Umfangskraft ausgearbeiteten Beziehungen tatsächlich anwendbar sein sollen, veranlaßten den Lehrstuhl für Traktoren und Automobile der Universität für Agrarwissenschaften in Gödöllő, Versuchsreihen mit Luftreifen durchzuführen und die Parameter zu bestimmen, die deren Verhalten auf Ackerböden beeinflussen.

## Ergebnis der Reifenuntersuchungen

Diese Versuche wurden auf einer Betonfahrbahn mit 10 verschiedenen Treibradreifentypen unterschiedlicher Abmessungen durchgeführt:

9—24	Cordatic	PR-4	11—28	Cordatic	PR-6
9—36	Cordatic	PR-6	12—38	Ja-166	PR-6
10—28	Cordatic	PR-6	13—30	Cordatic	PR-6
10—28	Record	PR-6	14—28	Barum	PR-6
11—28	Record	PR-6	15—30	Cordatic	PR-6

Bei jedem einzelnen Luftreifentyp wurden die Daten aus dem Katalog registriert und die geometrischen Abmessungen des Reifens bestimmt; nach gleichmäßig abgestufter Belastung ergaben sich entsprechend veränderte Reifenabplattungen. Im weiteren wurden bei ebenfalls verschiedenen Belastungswerten Abdrücke der Auflagefläche abgenommen und ihre Abmessungen registriert. Die Versuche wurden bei verschiedenem Reifeninnendruck von 0,4 bis 1,6  $\text{kp/cm}^2$  durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsserie sind in den Bildern 1 und 2 für einen Reifentyp veranschaulicht, gleiche Diagramme wurden für alle Reifen ermittelt.

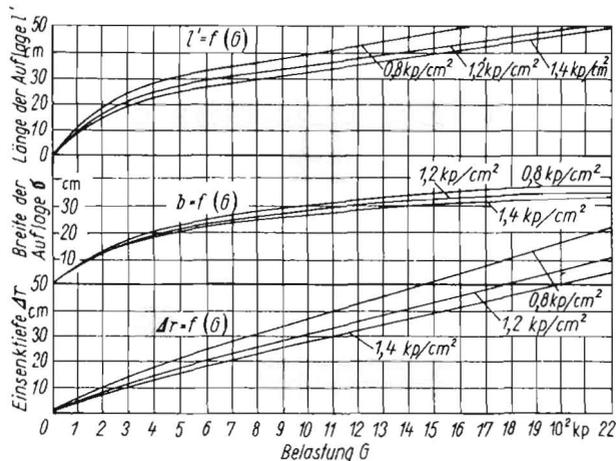


Bild 1. Veränderung der Abplattung  $\Delta r$ , der Länge  $l$  und der Breite  $b$  der Auflagefläche des Luftreifens in Abhängigkeit von seiner Belastung: Reifentyp 18,4/15-30, Fahrbahn Beton

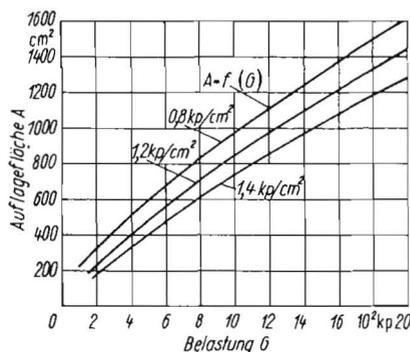


Bild 2. Veränderung der Auflagefläche  $A$  des Luftreifens in Abhängigkeit von der Radbelastung: Reifentyp 18,4/15-30, Fahrbahn Beton

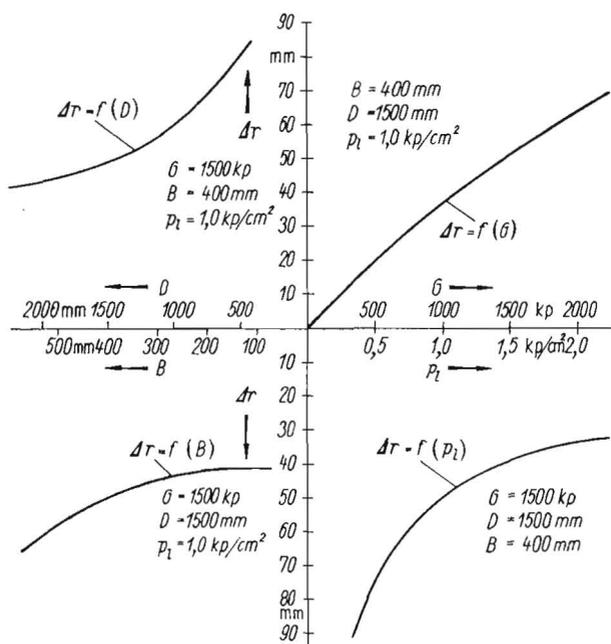


Bild 3. Veränderung der Reifenabplattung in Abhängigkeit von Belastung, Durchmesser, Breite und innerem Luftdruck

## Auswertung der Versuche

Durch Auswerten der bei den Versuchen gewonnenen Daten und Diagramme wurde ein auch mathematisch bestimmbarer Zusammenhang gesucht zwischen der Belastung und den geometrischen Abmessungen des Reifens, seiner Abplattung, der Länge und Breite seiner Auflage und deren Fläche. Die dabei gefundenen Beziehungen sind:

Reifenabplattung

$$\Delta r = C_1 \frac{G^{0,85}}{B^{0,7} D^{0,43} p_1^{0,6}} K \quad \text{in mm;} \quad (4)$$

$C_1$  Konstante (bei Normalreifen 150, bei Radialreifen 193...236)

$K$  Korrekturfaktor =  $15 \cdot 10^{-4} B + 0,42$

$G$  Radbelastung in kp

$B$  Reifenbreite in mm

$D$  Reifendurchmesser in mm

$p_1$  innerer Reifenluftdruck in  $\text{kp/cm}^2$

Breite der Auflagenfläche

$$b = C_2 B p_1^{-0,14} \left( 1 - e^{-\frac{G}{0,4 G_{\min}}} \right) \quad \text{in cm;} \quad (5)$$

$C_2$  Konstante (bei Normalreifen mit schmaler Felge 0,87, mit breiterer Felge im Fall eines Radialreifens 0,90)

$B$  Reifenbreite in cm

$G_{\min}$  die kleinste Tragfähigkeit des Reifens nach Katalogangabe in kp

Länge der Auflage

$$l = 1,7 \sqrt{(D - \Delta r) \Delta r} \quad \text{in cm;} \quad (6)$$

$D$  Außendurchmesser des Reifens in cm

$\Delta r$  Abplattung des Reifens in cm

Auflagenfläche

$$A = (l - b) b + \frac{b^2 \pi}{4} \quad \text{in cm}^2 \quad (7)$$

Länge eines gleichwertigen Rechtecks

$$l_{glw} = A/b \quad \text{in cm} \quad (8)$$

Die Abplattung des Reifens hängt von der Belastung ab (Bild 3) und ändert sich entsprechend den Versuchsdaten und den diese beschreibenden mathematischen Zusammenhängen nach einer Kurve, die nur geringfügig von einem linearen Verlauf abweicht. Zu steigenden Reifenbelastungen gehören wachsende Reifenabplattungen. Die Vergrößerung des Reifendurchmessers und des Luftdrucks vermindern die Reifenabplattung in unterschiedlichem Maß.

Die Änderung der Breite der Auflagenfläche ist mit guter Annäherung durch eine Exponentialfunktion zu beschreiben. Der größte Wert der Auflagenbreite ist gleich der Breite der Lauffläche des Traktorreifens. Das ist derzeit 87 bis 90 Prozent der gesamten Reifenbreite, abhängig vom Reifen- und vom Felgentyp.

Die Länge der Auflagenfläche ist aufgrund des durch Abplattung, halbe Auflagenlänge und Raddurchmesser dargestellten Dreiecks zu bestimmen. In Wirklichkeit muß der theoretisch gewonnene Wert infolge der Steife des Reifens mit dem Faktor 1,7 korrigiert werden.

Die Auflagenfläche des Reifens ist anfangs — bei kleinen Belastungen — eine regelmäßige Ellipse. Später ändert sie sich zu einem gestreckten Pantoffel, der aus einem Rechteck und aus zwei vorn und hinten angrenzenden Halbkreisen besteht. Mit Rücksicht darauf, daß sich durch die bei Traktoren auftretenden Radbelastungen diese Form von vorn herein ausbildet, wurde für sie die Gl. (7) benutzt, wobei der kleine Fehler vernachlässigt wird, der bei geringen Belastungen durch die Ellipsenfläche entsteht. Weil in der die Umfangskraft angegebenden Gl. (3) auch die Auflagenfläche eine Rolle spielt, wird diese als die Länge eines äquivalenten Rechtecks bestimmt.

Bei den in die Versuche einbezogenen Reifen wurde auch die Gesamtfläche der Profilstollenabdrücke ermittelt. Die Stollenflächen machen 20 bis 26 Prozent der gesamten Auflagenfläche aus, so daß mit einem Mittelwert von  $A_p = 0,23 A$  gerechnet werden kann.

Die Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Werten waren relativ gering, sie schwankten zwischen 0 und 11 Prozent. Auch bei einem Vergleich der berechneten Reifenabplattungswerte mit den Daten nach DIN 7807 blieben die Abweichungen in einem für die Praxis annehmbaren Rahmen.

### Bestimmen der Tragfähigkeit

Die Gl. (4) zum Beschreiben des Zusammenhangs zwischen der Reifenbelastung und der Abplattung ermöglicht auch das rechnerische Bestimmen der Tragfähigkeit. Erfahrungsgemäß ist die Abplattung  $\Delta r$  des Luftreifens (durch die Wirkung der Belastung) ein gegebener Teil der Höhe  $H$  des Reifenprofils:

$$\Delta r/H = k \quad \text{oder} \quad \Delta r = k H$$

Das Verhältnis zwischen der Höhe des Reifenquerschnitts und der Reifenbreite hängt von der Reifenbauart ab:  
 $H/B = C$ .

Dann wird

$$\Delta r = k C B = \frac{C_1 G^{0,85} K}{B^{0,7} D^{0,43} p_1^{0,6}}$$

oder

$$k C B^{0,7} D^{0,43} p_1^{0,6} = C_1 G^{0,85} K$$

$$G = \left( \frac{k C}{C_1} \right)^{1/0,85} \left( \frac{B^{0,7} D^{0,43} p_1^{0,6}}{K} \right)^{1/0,85}$$

Demnach beträgt die Tragfähigkeit:

$$T_K = G = \left( \frac{k C}{C_1} \right)^{1,18} \left( \frac{B^{0,7} D^{0,43} p_1^{0,6}}{15 \cdot 10^{-4} B + 0,42} \right)^{1,18}$$

$$T_K = F B^{2,0} D^{0,51} p_1^{0,7} \left( \frac{1}{15 \cdot 10^{-4} B + 0,42} \right)^{1,18} \quad \text{in kp}$$

Hier sind  $B$  und  $D$  in mm,  $p$  in  $\text{kp}/\text{cm}^2$  einzusetzen. Bei der großen Mehrheit der normalen Diagonalreifen sind  $k = 0,15$ ,  $C_1 = 150$  und  $C = 0,87$ . Somit wird  $F = 239 \cdot 10^{-6}$ . Bei Radialreifen sind größere Abplattungen zulässig, es tritt ein anderes Verhältnis  $H/B$  auf, so daß  $F = 270 \cdot 10^{-6}$  wird.

Die berechneten Tragfähigkeiten eines Normalreifens und eines Radialreifens bei verschiedenem Reifeninnendruck entsprechen verhältnismäßig gut den Katalogwerten.

### Bestimmen der Anzahl der Gewebelagen

Die Lagenanzahl PR der Gummireifen beeinflußt nach unseren Versuchen das Maß der Abplattung nicht, begrenzt aber die maximale Tragfähigkeit des Reifens. Eine Untersuchung der Tragfähigkeit verschiedener großer Traktorreifen aufgrund der Katalogdaten ergab die Erkenntnis, daß die Reifen abhängig von Breite, Lagenanzahl, Durchmesser-Breiten-Verhältnis, in Gruppen einzureihen sind:

$T_{K\max}/B$ PR	wenn	D/B
0,75		3,5
0,79		3,5 ··· 4,5
0,83		4,5 ··· 5,5

Zum Beispiel ergeben sich für einen normalen Traktorreifen 15—30:

Belastungsgrenze	Lagenanzahl
2000 bis 2085 kp	PR = 6
2085 bis 2415 kp	PR = 8

Aufgrund der Katalogangaben beträgt das Verhältnis zwischen Durchmesser und Reifenbreite  $D/B = 1550/456 = 3,4$ ; somit wird

$$PR = \frac{T_{K\max}}{B \cdot 0,75} = \frac{2085}{456 \cdot 0,75} = 6,09 \quad \text{also 6 Lagen, bzw.}$$

$$PR = \frac{2415}{456 \cdot 0,75} = 7,1 \quad \text{also 8 Lagen.}$$

### Literatur

- DIN 7807: Treibradreifen auf Breittreifen für Ackerschlepper und Ackermaschinen. Ausgabe Januar 1967.
- Pirelli: Additional sheet to tyre handbook 1969.
- Sitkey, Gy.: Traktor gumikerekék jellemzői és az abroncsoszás (Die Charakteristiken der Traktorenräder und ihrer Bereifung). Járűművek. Mezőgazdasági Gépek 16 evf. 1969, 2. szám.
- János, Z.; Hanamoto, B.: The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. First Intern. Conf. on the Mechan. of Soil-Vehicle Systems. Torino: Saint Vincent 1961.
- Komádi, Gy.: Bestimmung der physikalischen Bodenkennwerte aufgrund der Zusammenhänge zwischen Scherdiagramm und Zugkraftcharakteristik. Landtechn. Forschg. (1965) Nr. 16. A 9684

## Fremdsprachige Importliteratur

Aus dem Angebot des Leipziger Kommissions- und Großbuchhandels (LKG) 701 Leipzig, Postfach 520, haben wir für unsere Leser die nachstehend aufgeführten Neuerscheinungen ausgewählt. Bestellungen sind an den Buchhandel zu richten. Dabei ist anzugeben, ob sich der Besteller u. U. mit einer längeren Lieferzeit (3 bis 6 Monate) einverstanden erklärt, wenn das Buch erst im Ausland nachbestellt werden muß.

Poljakow, W. S. u. a.: Handbuch über Kupplungen

Leningrad 1974. 352 S. mit 268 einfarb., z. T. ganzs. Abb. u. Tab., 14,0 cm × 21,5 cm, Lw.

NK 31-73/10 7,05 Mark

Beschreibungen moderner, im Maschinenbau viel verwendeter Konstruktionen mechanischer, pneumatischer und elektromagnetischer Verbindungskupplungen sowie neuartiger, progressiver Konstruktionen sind in dem Buch enthalten.

Interessentenkreis: Maschinenbaukonstruktoren

Bestell-Nr. IX C-8382

Isd-wo Maschinostrojénije In russischer Sprache

Semjonow, S. A.: Die Herausbildung des Ackerbaus

Leningrad 1974. 320 S. mit 60 einfarb. Abb., 16,5 cm × 26,0 cm, KE.

SK 1-73/130 10,60 Mark

Die Entstehung und die frühen Entwicklungsetappen der landwirtschaftlichen Tätigkeit des Menschen werden anhand umfangreicher archäologischer, ethnographischer, historischer und botanischer Quellen dargestellt. Im Zusammenhang mit der Entwicklung des Ackerbaus erläutert der Autor ausführlich agrotechnische Fragen und die Herstellung landwirtschaftlicher Geräte.

Bestell-Nr. VII F-2584

Isd-wo Nauka In russischer Sprache

Die Zuverlässigkeit komplizierter technischer Systeme

Artikelsammlung. Kiew 1974. 136 S. mit einfarb. Abb. u. Tab., 14,7 cm × 21,5 cm, Br.

NK 24-73/128 4,00 Mark

Die Artikel dieses Bandes behandeln Aufgaben über das Entstehen von Zufallsprozessen und mehrdimensionalen Normalverteilungen sowie Fragen der statistischen Festigkeitstheorie von Werkstoffen bei langzeitiger Einwirkung zufälliger Belastungen. Untersucht werden auch die Wahrscheinlichkeitseigenschaften der Belastungen und die Tragfähigkeit von Konstruktionen.

Interessentenkreis: Ingenieure

Bestell-Nr. VII B-6861

Isd-wo Nauk. dumka In russischer Sprache

AK 9424