

Einflüsse auf das Fahrvermögen selbstfahrender Land- und Transportmaschinen und Methoden ihrer Ermittlung

Dozent Dr.-Ing. K. Queitsch, KDT/Dipl.-Ing. H. Schulz, KDT

Verwendete Formelzeichen	
c_R	kN/mm Federkonstante für Luftreifen
f_A	mm Hebelarm des Rollwiderstands
F_A	kN Antriebskraft am Rad
F_F	kN Verlustwiderstand am Fahrwerk
F_Q	kN Vertikalkraft am Rad
F_R	kN Rollwiderstand
F_S	kN Seitenkraft
F_U	kN Umfangskraft, Summe am Fahrwerk
F_W	kN Gesamtwiderstand am Fahrwerk
F_Z	kN Zugkraft
F_A', F_R'	kN Kräfte an schräglaufenden Rädern
F_S'	kN Kräfte an schräglaufenden Rädern
i_K	— Übersetzungsverhältnis der Kraftübertragung
M_d	Nm Motordrehmoment
M_i	kNm Antriebsdrehmoment am Rad
M_{s1}, M_{s2}	Nm Biegemomente an den Meßstellen
p_r	MPa Reifennendruck
r_0	m Reifenradius (unbelasteter Reifen)
r_w	m wirksamer Reifenradius zur Aufstandsfläche

S	—	Schlupf
t	s	Zeit
v_f	m/s	Fahrgeschwindigkeit
y_1, y_2	mm	Hebelarm
α	—	Schräglaufwinkel
Δt	s	Zeitintervall
Δy	mm	Längendifferenz
$\Delta \varphi$	rad	Winkeldifferenz
η_F	—	Fahrwerkwirkungsgrad
η_K	—	Getriebewirkungsgrad
φ	rad	Drehwinkel
κ	—	Zugkraftbeiwert
μ_K	—	Kraftschlußbeiwert
ρ	—	Rollwiderstandsbeiwert
ω	rad/s	Winkelgeschwindigkeit

1. Problemstellung

Industriemäßige Produktionsmethoden in der sozialistischen Landwirtschaft weiter zu vervollkommen, erfordert, Mechanisierung und Automatisierung der Produktionsprozesse systematisch fortzusetzen. In der Pflanzenproduktion ist der Einsatz selbstfahrender Land- und Transportmaschinen — der Begriff wird auch im Sinne von Traktor-Landmaschinen-Aggregaten angewendet — dominierend. Mit

zunehmender Größe und Leistungsfähigkeit derartiger mobiler Maschinen ergeben sich Probleme hinsichtlich der Einsatzsicherheit und des Erreichens einer größeren Witterungsunabhängigkeit. In der Landwirtschaft ist die Realisierung folgender Forderungen mit entscheidend für hohe Ernteerträge und verlustarme Bergung der Feldfrüchte bei niedrigen Produktionskosten:

- Erzielen eines kontinuierlichen Produktionsablaufs
- Einhalten agrotechnisch günstiger Termine auch bei ungünstigen Bodenbedingungen
- Vermeiden von Strukturschäden im Ackerboden durch Fahrwerke
- Erreichen eines minimalen Energieaufwands je Erzeugniseinheit.

In diesem Zusammenhang bilden die Wechselwirkungen zwischen Fahrwerk (hier auf Radfahrwerke bezogen) und nachgiebigem Ackerboden als Fahrbahn der selbstfahrenden Land- und Transportmaschinen einen begründeten Untersuchungsgegenstand.

2. Fahrvermögen und Befahrbarkeit

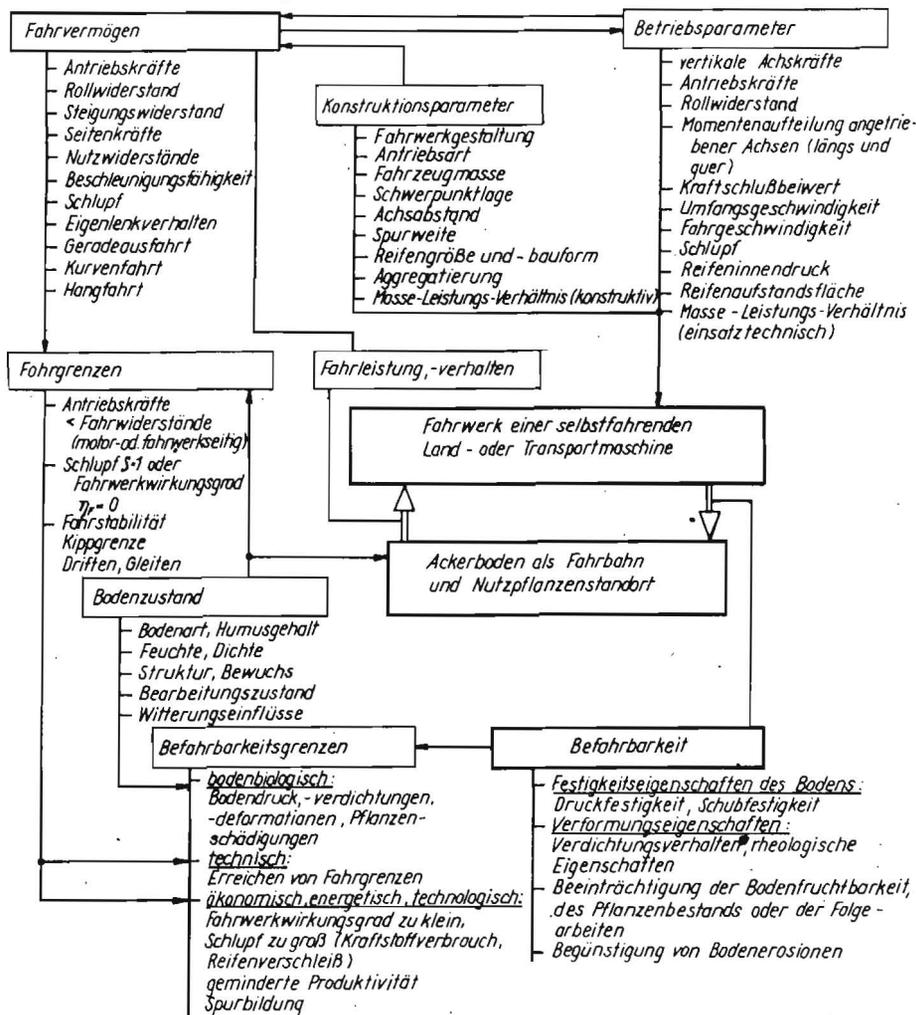
Die Einsatzsicherheit der selbstfahrenden Land- und Transportmaschinen wird durch das Fahrvermögen beurteilt, während von seiten des Bodens als Pflanzenstandort in Relation zu einem Fahrzeug die Befahrbarkeit einzuschätzen ist [1, 2]. Als Arbeitsgrundlage werden dazu folgende Definitionen vorgeschlagen:

Das Fahrvermögen von selbstfahrenden Land- und Transportmaschinen ist das Zustandekommen einer beabsichtigten Fahrbewegung. Die mögliche Fahrbewegung schließt ein, daß neben Roll-, Steigungs- und Beschleunigungswiderständen die an Arbeitsorganen entstehenden Nutz- und Verlustwiderstände (fahrzeugbezogen betrachtet, als aufzubringende Kräftesumme an der Landmaschine) aufgebracht werden.

Die Befahrbarkeit eines nachgiebigen Ackerbodens ist seine Eigenschaft, der Belastung des Fahrwerks einer selbstfahrenden Land- und Transportmaschine standzuhalten unter den Bedingungen, daß deren Fahrvermögen gewährleistet ist, eine unzulässige Veränderung des Bodenzustands oder der Nutzpflanzen vermieden wird.

Beide Beziehungen sind verschiedene Seiten der Wirkpaarung Fahrwerk-Boden (Bild 1). Das Fahrwerk wird in erster Linie durch seine Konstruktionsparameter und unter „normalen“ Einsatzbedingungen von vorausbestimmbaren Betriebsparametern nach Fahrleistung und Fahrverhalten bestimmt und bewertet. Damit im Zusammenhang steht das Fahrvermögen, wenn die Bedingungen sich soweit zum Ungünstigen verändern, daß Fahrvermögen, also Zustände der Nichtgewährleistung des Fahrvermögens, erreicht werden. Diese Situation wird primär durch den Boden als Fahrbahn und seinen Zustand beeinflusst. Fahrvermögen können sich einmal als „Havariefall“ ergeben, indem die übertragbaren Antriebskräfte die auftretenden Fahrwiderstände im Betrag unterschreiten (Fahrleistung gleich Null, „Steckenbleiben“) oder bedenkliche Situationen für die Fahr-

Bild 1. Systematische Übersicht der Einflußgrößen auf das Fahrvermögen einer selbstfahrenden Land- und Transportmaschine und die Befahrbarkeit von nachgiebigem Ackerboden.



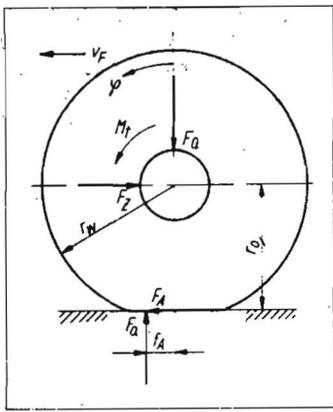


Bild 2. Kraft- und Bewegungsgrößen am Antriebsrad

sicherheit (Fahrstabilität, Kippgrenze) und damit unzulässige Gefährdungen für Personen und Arbeitsmittel entstehen [3].

Andererseits ist die Befahrbarkeit eine Bodeneigenschaft in bezug auf ein bestimmtes Fahrwerk unter dem Hauptgesichtspunkt, daß die Pflanzen nicht beschädigt und die Bodenfruchtbarkeit nicht gemindert werden. Pflanzenschäden sind unmittelbar feststellbar, während Minderungen der Ertragsfähigkeit nicht sofort und dann nur mittelbar im wesentlichen über physikalische Bodeneigenschaften bewertbar sind. Diesbezüglich wird die Wirkung eines Fahrwerks auf den Boden beurteilt, wobei Befahrbarkeitsgrenzen nach boden- und pflanzenbiologischen, technischen, technologischen, energetischen und ökonomischen Kriterien möglich sind. Die Befahrbarkeitsgrenzen sind bodenseitig kaum oder nur mit unzumutbarem Aufwand beeinflussbar. Das gleiche gilt auch für das Fahrvermögen und dessen Grenzen. Beeinflussbar bleiben

- konstruktive Auslegung und Rüstzustand eines Fahrwerks in Abhängigkeit von zu realisierenden Produktivitätskennwerten
- einstellbare Betriebsparameter
- Aggregatierung (Kombinieren von Antriebs- und Arbeitsmaschine bzw. -gerät)
- Entscheidung zum Fahren oder Unterlassen des Befahrens eines Bodens in ungünstigem Zustand.

Fahr- und Befahrbarkeitsgrenzen sind, wie zuvor dargelegt, boden- und fahrwerkabhängig, also standort- und maschinentypbezogen. Damit entsteht die Aufgabe, technisch-ökonomische Kriterien für Anwendungsrichtlinien zum optimalen Einsatz und für die Auslegung von Fahrwerken zu erarbeiten. Der boden-

biologischen Forschung ist die Aufgabe gestellt, fahrmechanisch verwertbare Grenzzustände und Kenngrößen für den Boden zu ermitteln, bei denen die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit gewährleistet ist. Der Boden als Pflanzenstandort und Fahrwerke zum Antrieb und zur Fortbewegung mobiler Maschinen stellen bezüglich ihrer optimalen Wirksamkeit diametral entgegenstehende Forderungen, die nur durch einen ausgewogenen Kompromiß zu brauchbaren Ergebnissen führen. Es könnte jedoch der Gedanke entstehen, Fahrwerke so auszulegen, daß die bodenbiologischen Forderungen vorrangig erfüllt werden. Technisch besteht dazu kein Hindernis. Es wäre aber betriebs- und materialökonomisch nicht vertretbar, da die ohnehin teure Baugruppe (etwa ein Viertel des Fahrzeugpreises) durch zusätzlichen Aufwand und Probleme der Lebensdauer die Produktionskosten stark belasten würde.

3. Größen zur Bewertung des Fahrvermögens

Theoretische Grundlagen und verfügbare Kennwerte sind gegenwärtig nicht ausreichend, um das Fahrvermögen analytisch zu bestimmen. Neben den zu erfassenden Bodenbedingungen, den Konstruktions- und Betriebsparametern von Radfahrwerken sind vor allem Schlupf, Rollwiderstand, die Kräfte am Antriebsrad und die Kenntnis der Nutzwiderstände von Bedeutung.

Die maßgebliche Kraft zum Sichern des Fahrvermögens ist die Antriebskraft angetriebener Räder. Sie wird normalerweise in einer Größe aufgebracht, wie es eine erforderliche Zugkraft F_Z und die Summe der wirkenden Fahrwiderstände ΣF_F bedingen. Bezogen auf die übertragbare Umfangskraft am Antriebsrad gibt es demnach zwei Fahrgrenzen:

- bodenseitig

$$F_w > F_U \quad (1)$$
 oder

$$F_Z + \Sigma F_F > \Sigma F_Q \mu_K$$
- motorseitig

$$F_w > \frac{M_d i_K \eta_K}{r_w} \quad (2)$$

Zur bodenseitigen Bewertung des Fahrvermögens ist bekannt, daß der Kraftschlußbeiwert von Reifengröße, -bauform und Reifenaufstandsfläche abhängt, sich aber auch in Abhängigkeit von der Bodenart mit der vertikalen Radbelastung ändert [4, 5].

Aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht am Antriebsrad (Bild 2) ergibt sich die Antriebskraft F_A als auf den Boden übertragbare Reak-

tionskraft der äußeren am Fahrwerk angreifenden Kräfte bei vorhandener Vertikalkraft und notwendiger Bodenhaftung:

$$F_A = \frac{M_i}{r_w} - F_Q \frac{f_A}{r_w} \quad (3)$$

Durch Einsetzen der Beziehung

$$\frac{f_A}{r_w} = \rho$$

ergibt sich

$$\rho = \frac{M_i}{F_Q r_w} - \frac{F_A}{F_Q} = \mu_K - \alpha \quad (4)$$

Der Rollwiderstand mit

$$F_R = \rho F_Q \quad (5)$$

ist abhängig von Bodenzustand, Reifenparametern und wird auch vom Kraftschlußbeiwert, vom Schlupf und von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Die entstehende Reifenspür im Boden ist fahrwerk-, kräfte- und bodenzustandsabhängig und ein Maß für den Rollwiderstand. Die Reifenspür kann deshalb mit zur Bewertung sowohl des Fahrvermögens wie auch der Befahrbarkeit dienen. Großen Einfluß auf den Übertragungswirkungsgrad als Verhältnis von Fahrleistung $F_Z v_F$ und Antriebsleistung an der(n) Antriebsachse(n) $M_i \omega$ übt der Schlupf S aus:

$$\eta_F = \frac{F_A}{F_A + F_R} (1 - S) = \left(1 - \frac{\rho}{\mu_K}\right) (1 - S) \quad (6)$$

Der Schlupf ist ebenfalls von Konstruktions- und Betriebsparametern des Fahrwerks sowie vom Bodenzustand abhängig. Für den Dauereinsatz kann der Schlupf sowohl für das Fahrvermögen — bei $S = 1$ absolute Fahrgrenze — als auch für die Befahrbarkeit eine aussagefähige Bewertungsgröße darstellen. Der Betrag des Schlupfes ist außerdem ein mehrfach wirksames Kriterium für energie- und materialökonomische und technologische Wertungen im Produktionsprozeß [6].

Das Fahrvermögen wird vielfach unter solchen Bedingungen bewertet, daß eine gleichmäßige Achs- bzw. Radbelastung vorliegt und daß eine Arbeit bei Geradeausfahrt ausgeführt wird. Diese Bedingungen sind Grenzfälle und überwiegend nicht vorhanden, so daß bei fast allen landwirtschaftlichen Arbeiten Momente um die Vertikalachse, beispielsweise eines Traktors, auftreten, durch die Seitenführungskräfte am Fahrwerk hervorgerufen werden. Die durch Reifen- und Bodendeformation entstehenden Seitenführungskräfte halten die ursächlich am Fahrzeug auftretenden Seitenkräfte im Gleichgewicht [7].

Bild 3. Einfluß der Seitenkraft auf Rollwiderstand und Antriebskraft:
a) antreibendes Rad
b) gezogenes Rad

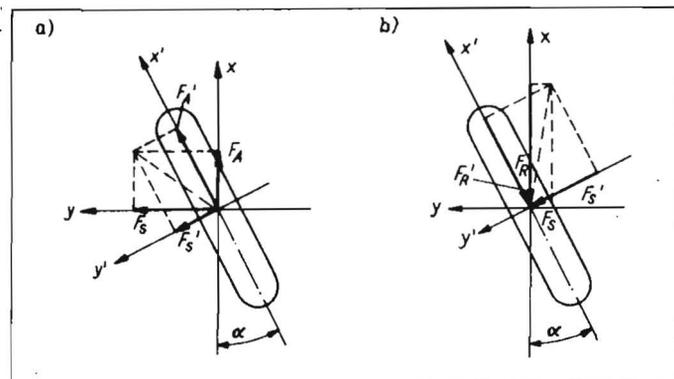
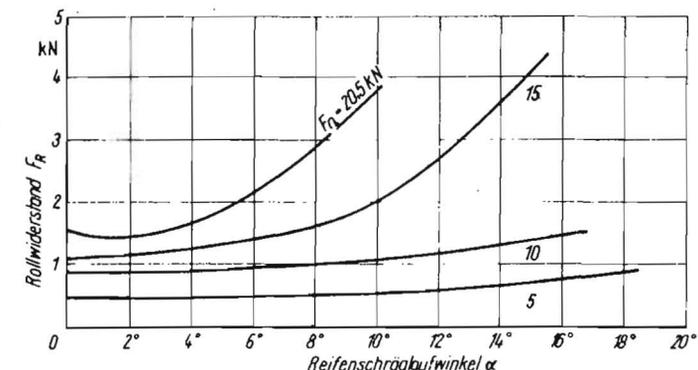


Bild 4. Veränderung des Rollwiderstands des Reifens 16—20 ($p_i = 0,45 \text{ MPa}$) in Abhängigkeit von Reifenschräglauf (Seitenkraft) und Vertikalbelastung (Radlast); relative Bodenfeuchte 6%



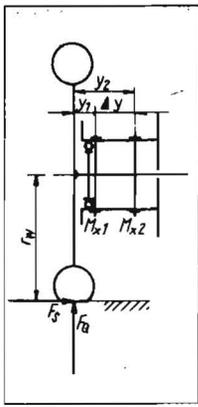


Bild 5. Achskräfte und Meßgrößen am Antriebsrad

Bei verschiedenen Arbeitsprozessen der Pflanzenproduktion sind dauernd Seitenkräfte aufzunehmen [8]. Neben dem dadurch bedingten Fahrzeugschräglauf wird auch das Fahrvermögen nachteilig beeinflusst. Seitenkräfte entstehen außerdem durch

- unterschiedliche Bodenzustände an beiden Fahrwerkseiten
- unterschiedliche Radkräfte links und rechts (dynamische Kräfte)
- verschiedene Reifeninnendrucke und unsymmetrische Masseverteilung
- Kurvenfahrt
- Hangabtriebskräfte, z. B. bei Schichtlinienfahrt
- geometrische Verhältnisse am Fahrwerk.

Wird das Fahrvermögen nach einer freien Antriebs- oder Zugkraft bewertet, so ist einleuchtend, daß senkrecht zur Fahrtrichtung wirkende Seitenkräfte die mögliche Antriebskraft in Bewegungsrichtung der Räder verringern (Bild 3a). Bei nicht angetriebenen Rädern erhöhen auftretende Seitenkräfte den Rollwiderstand bei zunehmendem Reifenschräglauf (Bild 3b). Die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Seitenführungskraft, Schräglaufwinkel, Reifenrückstellmoment, Radlast und Reifeninnendruck ist in Form von Schräglauflinien möglich [7].

Die auf die Fahrtrichtung bezogenen Kräfte am antreibenden und an einem nicht angetriebenen schräglaufenden Rad lassen sich nach [9, 10] aus den auf die Radebene bezogenen Kräften für einen Schräglaufwinkel α berechnen (s. Bild 3):

— antreibendes Rad

$$F_A = F_A' \cos \alpha - F_S' \sin \alpha \quad (7)$$

$$F_S = F_A' \sin \alpha + F_S' \cos \alpha \quad (8)$$

— nicht angetriebenes Rad

$$F_R = F_S' \sin \alpha + F_R' \cos \alpha \quad (9)$$

$$F_S = F_S' \cos \alpha - F_R' \sin \alpha. \quad (10)$$

Zu erkennen ist, daß beim Wirken von Seitenkräften das Fahrvermögen von Aggregaten durch abnehmende Antriebskräfte und Vergrößern der Rollwiderstände (Bild 4) verringert wird [11]. Weitere Betrachtungen zu Seitenkräften sind in [12] ausgeführt.

4. Methoden zum Ermitteln von Bewertungsgrößen

Methoden zum Erfassen und Charakterisieren des Bodenzustands sind hinreichend bekannt und zeitaufwendig in der Anwendung. Für eine praktikable bodenseitige Bewertung des Fahrvermögens und der Befahrbarkeit in der landwirtschaftlichen Praxis sind als Entscheidungshilfe für den Maschineneinsatz und die technologische Planung einfach zu handhabende Methoden zu entwickeln oder bekannte Methoden [2] hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit zu untersuchen.

Fahrwerkseitig sind Kraft- und Bewegungsgrößen sowie geometrische Größen von wesentlicher Bedeutung zur Vorausbestimmung und Bewertung des Fahrvermögens [13].

Die vertikale Radkraft F_Q ist eine unter der Wirkung von Bodenebenenheiten, Gewichtskraft und dynamischen Widerstandskräften zeitlich veränderliche Größe. Sie ist am Achstrichter einer Antriebsachse eines Fahrzeugs als Biegemoment mit Hilfe einer Dehnmessstreifen-Halbbrücke in der Vertikalebene meßbar (Bild 5). Um den Einfluß von Seitenkräften zu erfassen, wird eine zweite Halbbrücke in einem Abstand Δy angeordnet. Aus den Biegemomenten M_{x1} und M_{x2} sind die Kräfte F_Q und F_S bestimmbar:

$$F_Q = \frac{M_{x2} - M_{x1}}{\Delta y} \quad (11)$$

$$F_S = \frac{M_{x2} y_1 - M_{x1} y_2}{r_w \Delta y} \quad (12)$$

Für den Fall, daß die Seitenkraft F_S nicht zu messen ist, kann F_Q direkt aus einer Differenzschaltung nach Gl. (11) gemessen werden.

Um die Größen nach den Gln. (3) und (4) bestimmen zu können, wird die Antriebskraft F_A nach gleichem Prinzip wie F_Q mit einer Dehnmessstreifen-Differenz-Vollbrücke in horizontaler Anordnung gemessen. An der Radnabe oder an der Antriebswelle ist das Antriebsdrehmoment M_t mit Hilfe einer Dehnmessstreifen-Vollbrücke meßbar.

Die Bestimmung des zeitlich sich ändernden wirksamen Reifenradius r_w kann aus der Vertikalkraft erfolgen, wenn der Reifeneinfederung eine lineare Federkennlinie zugrunde gelegt wird:

$$r_w = r_0 - c_R F_Q \quad (13)$$

Der Rollwiderstandsbeiwert ρ beträgt

$$\rho = \frac{M_t}{r_0 F_Q - c_R F_Q^2} - \frac{F_A}{F_Q} \quad (14)$$

Die Federsteife des Reifens muß für den interessierenden Bereich durch Kalibrierversuche ermittelt werden.

Der Schlupf kann nach

$$S = 1 - \frac{v_F}{\omega r_w} = 1 - \frac{v_F}{\omega (r_0 - c_R F_Q)} \quad (15)$$

ermittelt werden, wenn die Fahrgeschwindigkeit v_F mit Hilfe des Peißerrades, für die entsprechende Bodenart kalibriert, und die Winkelgeschwindigkeit ω des Antriebsrades mit einem Umlaufpotentiometer für den Drehwinkel φ über der Zeit t nach

$$\omega = \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} \quad (16)$$

für kleine Intervalle bestimmt wird.

Mit den gewonnenen Meßgrößen können Fahrwerkwirkungsgrad und Fahrzustandsgrößen, die über weitere Betriebsparameter Auskunft geben, berechnet werden.

Zum Ermitteln geometrischer Größen, wie Radspurtiefe und zugeordneter Bewegungsbahn festgelegter Punkte am Untersuchungsobjekt, sind fotooptische bzw. kinematografische Methoden [14] anwendbar.

5. Zusammenfassung

Zur Sicherung kontinuierlicher Produktionsabläufe in der industriemäßig produzierenden Landwirtschaft wird es beim Einsatz leistungsfähiger mobiler Maschinen zunehmend zum Erfordernis, unter ungünstigen Bodenverhältnissen das Fahrvermögen selbstfahrender Land- und Transportmaschinen zu gewährlei-

sten. Als konträre Forderung zum Fahrvermögen sind Maßnahmen zur Erhaltung und Steigerung der Bodenfruchtbarkeit zu ergreifen, indem Schädigungen der Bodenstruktur, der Pflanzen und der Bodenmikroben durch Fahrwerke mobiler Maschinen durch konstruktive sowie einsatztechnische Maßnahmen vermieden werden. Es sind Arbeitsdefinitionen zum Fahrvermögen und zur Befahrbarkeit formuliert und die Einflußgrößen dargestellt. Die zur Bewertung des Fahrvermögens und der Befahrbarkeit gezeigten Möglichkeiten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es gilt, ein geschlossenes System zum sicheren Einschätzen des Fahrvermögens und der Befahrbarkeit zu schaffen. Einige methodische Hilfsmittel zum Ermitteln von Bewertungsgrößen wurden dazu angegeben.

Literatur

- [1] Soucek, R.: Zu einigen Problemen von Theorie und Praxis in der Bodenbearbeitung. Vortrag auf der Mechanisierungstagung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vom 6. bis 8. Nov. 1979.
- [2] Winter, R.: Der Ackerboden als Fahrbahn für Maschinen der Pflanzenproduktion — Probleme und Entwicklungstendenzen. Vortrag auf der Mechanisierungstagung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vom 6. bis 8. Nov. 1979.
- [3] Rothe, J.: Fahrmechanik landwirtschaftlicher Fahrzeuge. In: Landwirtschaftliche Fahrzeuge und Krane. 3. Aufl. Berlin: VEB Dt. Landwirtschaftsverlag 1979.
- [4] Schulz, H.; Schettler, H.: Zum Masse-Leistungsverhältnis von selbstfahrenden Transport- und Landmaschinen. agrartechnik 29 (1979) H. 9, S. 403—406.
- [5] Franke, R.: Berichte über Landtechnik, Bd. 81. München: H. Neureuter-Verlag 1964.
- [6] Schulz, H.: Zum Schlupf beim Fahrzeugeinsatz. agrartechnik 28 (1978) H. 4, S. 184.
- [7] Zeranski, P.: Übertragung tangentialer Umfangs- und Seitenkräfte am Luftreifen. Kraftfahrzeugtechnik (1972) H. 11, S. 334—337.
- [8] Kollar, L.: Beitrag zur Automatisierung der Lenkung zweigliedriger allradgetriebener Aggregate auf nachgiebigem Boden. TH Magdeburg, Dissertation 1976.
- [9] Schwanghart, H.: Seitenkräfte an gelenkten Luftreifen in lockerem Boden. Grundlagen der Landtechnik (1967) H. 3, S. 105—114.
- [10] Steinkampf, H.: Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. Landbauforschung Völknerode, Sonderheft 27 (1975).
- [11] Maack, H.-H.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen über Lenkstabilität von Traktoren unter besonderer Berücksichtigung des Reifenschräglaufs. VEB Traktorenwerk Schönebeck, Forschungsabschlußbericht 1970 (unveröffentlicht).
- [12] Schulz, H.: Beeinflussung des Fahrvermögens von landwirtschaftlichen Aggregaten durch Seitenkräfte. Vortrag auf der Mechanisierungstagung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vom 6. bis 8. Nov. 1979.
- [13] Queitsch, K.: Zur Ermittlung von Meßgrößen für die Beurteilung des Fahrvermögens von Antriebsfahrzeugen. Vortrag auf der Mechanisierungstagung der Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg vom 6. bis 8. Nov. 1979.
- [14] Queitsch, K.: Beitrag zur Methodik kinematografischer Untersuchungen von Bewegungsvorgängen in der Landtechnik. Festschrift aus Anlaß des 75. Geburtstages von Heinrich Heyde. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg 1978, S. 67—87. A 2482