

Fahrgeschwindigkeitsmessung an landwirtschaftlichen Fahrzeugen

Von Karl-Heinz Mertins und Horst Göhlich, Berlin*)

DK 631.372:629.1.05:531.767

Für die Optimierung vieler Arbeiten mit Ackerschleppern, insbesondere bei der energetischen Optimierung der Bodenbearbeitung, sowie im Zusammenhang mit der Realisierung von Fahrerinformationssystemen und Regelvorgängen ist die Kenntnis der Fahrgeschwindigkeit notwendig. Während die Messung der Fahrgeschwindigkeit auf festen Fahrbahnen seit langem zufriedenstellend gelöst ist, befinden sich die Verfahren zur hinreichend genauen Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit bei den unterschiedlichen Feldarbeiten noch in der Entwicklung.

Diese Arbeit gibt zunächst eine Übersicht über die möglichen Meßverfahren und berichtet dann über Feldversuche mit den wichtigsten praktisch bedeutsamen Verfahren zur Bestimmung der wahren Fahrgeschwindigkeit. Dabei wird auf kostengünstige Verfahren hingewiesen und die Notwendigkeit der Weiterentwicklung bei berührungslosen Sensoren verdeutlicht.

1. Einleitung

Der optimale Einsatz von Schleppern und selbstfahrenden Arbeitsmaschinen, z.B. die optimale Ausbringung von Düng- oder Pflanzenbehandlungsmitteln, eine kraftstoffsparende Fahrweise, die Minimierung des Arbeitszeitaufwandes, die Maximierung der Nutzleistung oder auch nur die Messung und Registrierung der bearbeiteten Fläche, setzt in vielen Fällen eine Bestimmung der wahren Fahrgeschwindigkeit oder des zurückgelegten Weges voraus. Auch für die Ermittlung des Triebradschlupfs sind diese Meßgrößen notwendig.

Die bei Straßenfahrzeugen übliche Messung der Fahrgeschwindigkeit über die Drehgeschwindigkeit eines Rades oder einer mit einem Rad ständig verbundenen Welle ist für Ackerschlepper häufig zu ungenau. Gründe hierfür sind der bei Feldarbeiten auftretende sehr unterschiedliche Radschlupf sowie Schwankungen der wirksamen Rollradien der Räder.

Wird ein "fünftes" Rad vorgesehen, so ist insbesondere dessen Aufhängung oder Führung so zu gestalten, daß die Handhabung des Fahrzeugs nicht merklich eingeschränkt wird. Die im Geländebetrieb erforderlichen Federwege und auftretenden Radkräfte bedingen aufwendige Konstruktionen, so daß berührungslos arbeitende Meßverfahren mit elektronischer Meßwertverarbeitung und -anzeige erstrebenswert erscheinen [1]. Bei der Auswahl und Entwicklung eines Geschwindigkeitsmeßverfahrens für die serienmäßige Anwendung sind umfassende Aufwand/Nutzen-Analysen unabhängig, zu deren Unterstützung der folgende Beitrag einige Informationen bieten soll.

*) Dipl.-Ing. K.-H. Mertins ist wissenschaftlicher Assistent und Prof. Dr.-Ing. H. Göhlich ist Direktor im Institut für Maschinenkonstruktion, Bereich Landtechnik und Baumaschinen, der TU Berlin.

2. Geschwindigkeitsmeßverfahren

Ausgehend von der Definition der Geschwindigkeit

$$v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

kann die digitale Messung von $v(t)$ entweder auf eine Weginkrementmessung bei fester Abtastfrequenz ($\Delta t = \text{const.}$) oder auf eine Zeitinkrementmessung bei fest vorgegebenen Wegstrecken ($\Delta s = \text{const.}$) zurückgeführt werden. Auch eine Mischform beider Varianten ist möglich, jedoch ohne praktische Bedeutung. Zunehmend werden besondere physikalische Effekte zur Geschwindigkeitsmessung ausgenutzt, wobei hauptsächlich die Frequenzmeßverfahren zu erwähnen sind.

Ortsfeste, fahrbahngebundene Verfahren wie fest installierte Lichtschranken und Radarpeilstationen [2] sollen hier nicht betrachtet werden.

2.1 Messung mit einem Laufrad

Für ein schlupfflos rollendes, d.h. von Umfangskräften freies Rad, Bild 1a, gilt für die Vorwärtsgeschwindigkeit des Mittelpunkts

$$v = \omega_0 r_0 \quad (2)$$

Die Fahrgeschwindigkeitsmessung kann also bei bekanntem r_0 auf die Messung der Drehwinkelgeschwindigkeit eines Rades zurückgeführt werden:

$$v \sim \omega_0 \quad (3)$$

In der Praxis des landwirtschaftlichen Einsatzes ist es unmöglich, die Forderung nach Vernachlässigbarkeit der Umfangskräfte exakt zu erfüllen (Rollwiderstand, Lagerreibung, nachgiebiger Boden). Je nach Bodenbeschaffenheit wird daher am geschleppten Rad ein mehr oder minder bedeutsamer Bremsschlupf auftreten, der den Momentanpol MP vom Radaufstandspunkt weg verschiebt (Bild 1b). Der größere wirksame Radius r_1 führt bei gleicher Vorwärtsgeschwindigkeit des Radmittelpunktes zu einer verringerten Drehwinkelgeschwindigkeit ω_1

$$v = \omega_1 r_1; \quad \omega_1 < \omega_0 \quad (4)$$

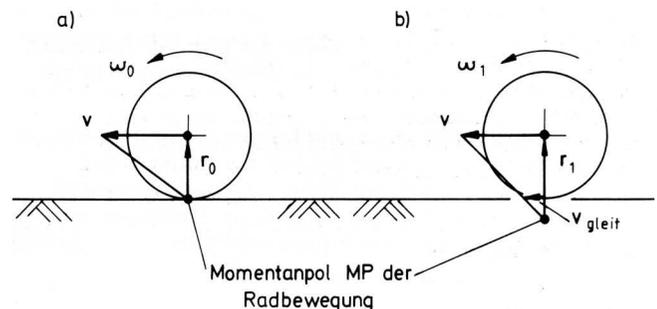


Bild 1. Kinematik des Rades; a) schlupfflos rollendes Rad, b) gezoogenes Rad mit Bremsschlupf.

Wird aus dieser Drehwinkelgeschwindigkeit in gleicher Weise wie zuvor (Gl. (3)) die wahre¹⁾ Fahrgeschwindigkeit bestimmt, so fällt deren Wert zu klein aus.

Der wirksame Radius oder Abrollumfang eines luftbereiften Rades ist zudem abhängig von der Radlast, dem Luftdruck und der Reifenbauart, Bild 2, sowie von anhaftenden Bodenteilchen. Der Radialreifen zeigt aufgrund seiner steifen Gürtelkonstruktion, die in Umfangsrichtung nur kleine Verformungen zuläßt, eine wesentlich geringere Abhängigkeit von den genannten Parametern als ein entsprechender Diagonalreifen.

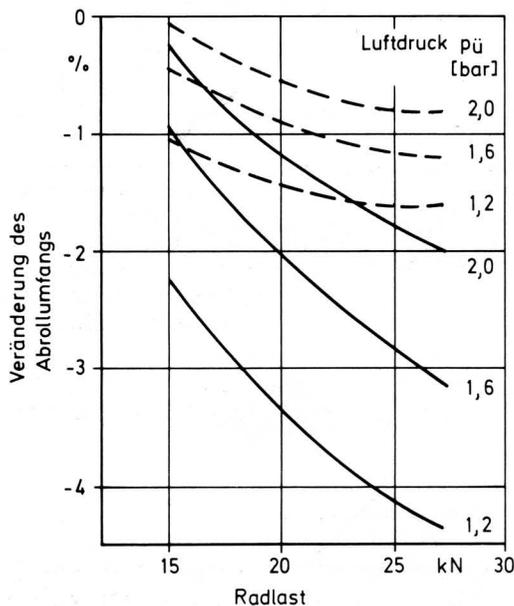


Bild 2. Veränderung des Reifenabrollumfangs in Abhängigkeit von der Radlast bei verschiedenen Luftdrücken, nach Tapp [3].

— 16.9-38 8 PR (Diagonal)
 --- 16.9R38 8 PR (Radial)

2.1.1 "Fünftes" Rad – Schlepprad

Insbesondere bei Brems- und Beschleunigungsmessungen im PKW-Versuchswesen ist das Schlepprad-Meßverfahren verbreitet. Am Nabenrand dieses leichten luftbereiften Rades angebrachte regelmäßige Marken (z.B. Lochscheiben, Zähne) laufen an einem Aufnehmer (z.B. Miniaturlichtschranke) vorbei, dessen Ausgangssignal einer Frequenzmessung zugeführt wird [2, 4].

Schleppräder sind für Fahrten auf ebenem, festem Untergrund gut geeignet, sofern ein Federbein mit Dämpfung das Abheben vom Boden bei höheren Geschwindigkeiten (> 2,5 m/s) zuverlässig verhindert. Beim Reversieren sollte eine Ausrückvorrichtung das Rad anheben, um Beschädigungen zu vermeiden. Drexl [5] hat für Feldversuche mit Schleppern eine Anordnung gewählt, bei der das Schlepprad in der Spur des rechten Vorderrades lief und auf nachgiebiger Fahrbahn eine auf den mittleren Wert der Kalibrierung bezogene Meßgenauigkeit im Bereich von + 0,4 % bis - 0,3 % erzielte. Über Einsatzerfahrungen mit einem robust gebauten "fünftes" Rad am Schlepper berichten Tompkins u. Wilhelm [6]. Danach war die Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit des mit einer Ballastmasse beschwerten luftbereiften Rades bei extrem rauen Bodenoberflächen, wie beispielsweise gegrubbertem trockenem Lehm, fragwürdig.

¹⁾ Als "wahre" Fahrgeschwindigkeit wird hier die jeweilige zu bestimmende Vorwärtsgeschwindigkeit des Schleppers bezeichnet. "Wahr" wird damit in anderem Sinne verwendet als in Normen der Meßtechnik (z.B. DIN 1319).

2.1.2 Vorhandenes nichtangetriebenes Fahrzeugrad

Bezüglich der Meßeinrichtung unterscheidet sich diese Variante nicht von derjenigen unter 2.1.1. Doch kann man hier ein äußerst robustes nichtangetriebenes Schleppervorderrad oder Lauftrad eines gezogenen Geräts nutzen, so daß von der mechanischen Beanspruchung her ein Feldeinsatz mit erheblichen Bodenebenenheiten ohne weiteres möglich ist. Häufig haben aber speziell die gelenkten Räder erhebliche Seitenkräfte abzustützen. Seitenkräfte bedingen Seitenschlupf und dieser wiederum Umfangsbremsschlupf; die Geschwindigkeitsmessung wird fehlerhaft.

Als günstiger können, nicht zuletzt wegen ihres größeren Radius, grobstollige AS-Reifen von angetriebenen Vorderrädern gelten. Diese Meßanordnung ergibt in der Praxis immer dann Sinn, wenn es durch ausreichende Zugkraftreserven möglich ist, ohne Unterbrechung des Fahrzustandes den Vorderachsantrieb intermittierend abzuschalten. Außer der wahren Fahrgeschwindigkeit kann man dabei auch den Schlupf der nun allein wirkenden hinteren Triebäder ermitteln. Diese Werte stehen in einem beschreibbaren Verhältnis zum mittleren Schlupf aller Triebäder und zur wahren Fahrgeschwindigkeit bei eingeschaltetem Vorderachsantrieb.

Als weitere Anwendungsfälle wären leichtere Arbeiten wie Pflege- und Pflanzenbehandlungsarbeiten zu nennen, bei denen eine Nutzung der Triebkraft der Vorderräder nicht zwingend erforderlich ist.

2.2 Messung mit einem Scheibensech

Pflüge sind häufig mit einem oder mehreren Scheibensechen ausgestattet, um beispielsweise beim Einarbeiten einer Pflanznarbe eine sauber geschnittene Furchenwand zu erzielen und somit gute Abrollbedingungen für die furchenseitigen Räder des Schleppers zu gewährleisten. Von den im unbearbeiteten Boden ablaufenden Sechen wird angenommen, daß ihre Umfangsgeschwindigkeit gleich der Fahrgeschwindigkeit ist [7]. Träfe diese Annahme zu, so böte sich eine weitere Möglichkeit der Meßwerterfassung mit sehr guter Eignung für raue Betriebsbedingungen.

2.3 Zeitkorrelationsmeßverfahren (optisch)

Der Vollständigkeit halber ist auch das Prinzip der Korrelationsmeßtechnik zu erwähnen. Es wird noch nicht in der Landtechnik angewendet, da eine kostenmäßig akzeptable Realisierung bisher nicht gelungen ist.

Es ist davon auszugehen, daß der landwirtschaftlich genutzte Boden oder die Fahrbahn Strukturen aufweisen, die durch geeignete Aufnehmer erfaßbar sind. Beispielsweise wird die Reflexion eines auf den Boden gerichteten Lichtstrahls über einem Fototransistor während der Fahrt, entsprechend den ständig wechselnden Reflexionseigenschaften, einen stochastisch veränderlichen Strom erzeugen. Ordnet man zwei dieser Sensorsysteme in Fahrtrichtung hintereinander an, so wird der hintere Sensor nach einer charakteristischen Zeitverschiebung τ_1 ein ähnliches Signal empfangen wie der vordere. Diese Zeitverschiebung ist proportional zum Abstand der Sensoren voneinander und umgekehrt proportional zur Fahrgeschwindigkeit:

$$\tau_1 = \frac{d}{v} \quad (5)$$

Die Ähnlichkeit zweier Signale $k_1(t)$ und $k_2(t)$ wird durch die Kreuzkorrelationsfunktion beschrieben [8]:

$$K_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T k_1(t) k_2(t + \tau) dt \quad (6)$$

Der gesuchte Wert τ_1 findet sich an jener Stelle, an der $K_{12}(\tau)$ den Maximalwert aufweist, nämlich $K_{12}(\tau_1)$.

Abgesehen vom Rechenaufwand zur Bestimmung des Maximums der Kreuzkorrelationsfunktion und damit von τ_1 , reagiert ein solches System träge auf Geschwindigkeitsänderungen, und die optischen Aufnehmer wären bedenklich staub- und schmutzempfindlich.

2.4 Frequenzmeßverfahren

2.4.1 Geschwindigkeitsmessung mit Gittersensoren

Das Objekt Fahrbahn wird wiederum optisch auf ein Gitter abgebildet und die Meßinformation aus der Relativbewegung zwischen Bild und Gitter gewonnen. Das Gitter stellt dabei ein ortsfrequentes Filter dar, das aus der Objektstruktur die passende Ortsfrequenz herausfiltert, die wegen der Bewegung des Objekts relativ zum Sensor als entsprechende Zeitfrequenz auftritt. Diese Frequenz verändert sich proportional zur Relativgeschwindigkeit. Bei einem ausgeführten Gerät (Correxit, Firma Datron-Meßtechnik GmbH, Wetzlar (Lizenz Leitz)) besteht das Gitter aus nebeneinanderliegenden Prismenzeilen, und das auf benachbarte Zeilenstreifen fallende Licht wird von einer Feldlinse auf zwei räumlich getrennte Fotopempfänger gerichtet. Die von den Empfängern erzeugten zeitlich veränderlichen Signale sind bis auf eine Phasenverschiebung um π im Modulationsanteil identisch. Mit einem Differenzverstärker können diese Gegentaktanteile von den aus langsamen Helligkeitsänderungen und dem Gleichlichtanteil resultierenden Gleichlichtanteilen abgetrennt und separat verstärkt werden. Die Frequenz des Wechselsignalanteils ist die der Fahrgeschwindigkeit proportionale Meßgröße

$$f = v M/g \quad (7),$$

wobei M der Abbildungsmaßstab und g die Gitterkonstante ist.

Treten während der Messung Abstandsänderungen auf, und das ist im Geländebetrieb unvermeidlich, so erzeugt die auftretende Änderung des Abbildungsmaßstabes einen systematischen Fehler. Diesem Problem wird durch objektseitig telezentrische Auslegung des Strahlengangs begegnet, wobei die kleinen Blendenöffnungen eine Zusatzbeleuchtung erforderlich machen [9].

Gittersensoren werden als Präzisionsinstrumente im Kfz-Versuchswesen auf ebenen Fahrbahnen eingesetzt, kommen aber aus Kostengründen für eine breite praktische Anwendung nicht in Frage.

2.4.2 Dopplerfrequenzmeßverfahren

Der Dopplereffekt besteht bekanntlich darin, daß elektromagnetische oder akustische Wellen in ihrer Frequenz verändert werden, wenn Wellensender und -empfänger sich relativ zueinander bewegen. Die Frequenzdifferenz (Dopplerfrequenz) ist nach [10] für den allgemeinen Fall eines einzelnen fahrzeugfesten Sensorsystems gegeben durch

$$f_D = (2 v/\lambda) (\cos \gamma + \psi \sin \gamma) \quad (8).$$

Dabei ist λ die emittierte Wellenlänge, γ der Neigungs- oder Einfallswinkel der Verbindungslinie Sensor-Rückstreuzentrum RZ gegenüber der Horizontalen für einen Bezugszustand von Fahrzeug und Fahrbahn und ψ der Fahrzeugnickwinkel. Letzterer ändert sich mit dem Beladungszustand des Schleppers und den Reifeninnendrüken. Gl. (8) ist linearisiert und gilt somit nur für kleine Nickwinkel. Eine exakte Fehleranalyse auf der Basis geometrischer Betrachtungen zeigt, daß bei Einfallswinkeln üblicher Größenordnung (30° – 45°) bereits kleinere Änderungen des statischen Nickwinkels zu erheblichen Meßwertfehlern führen, Bild 3.

Durch Anordnung eines zweiten, entgegen der Fahrtrichtung orientierten Sensors ließe sich der Nickfehlerterm in Gl. (8) eliminieren, jedoch wären entsprechende Mehrkosten für diese "Janus-Konfiguration" aufzuwenden, Bild 4a.

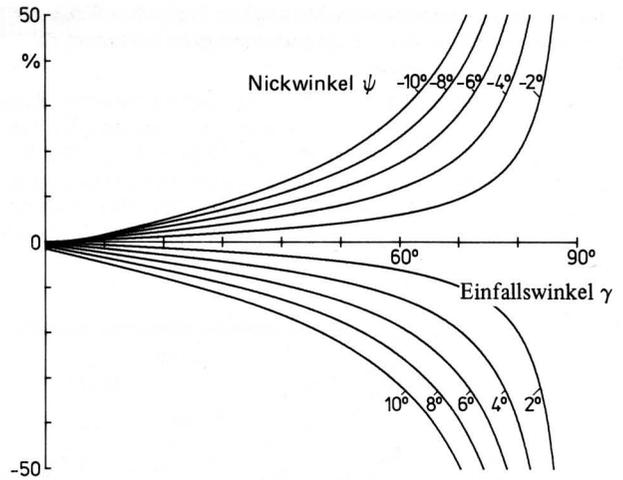


Bild 3. Fehler der Geschwindigkeitsmessung durch Nickbewegungen des Fahrzeugs, nach Jahns [11].

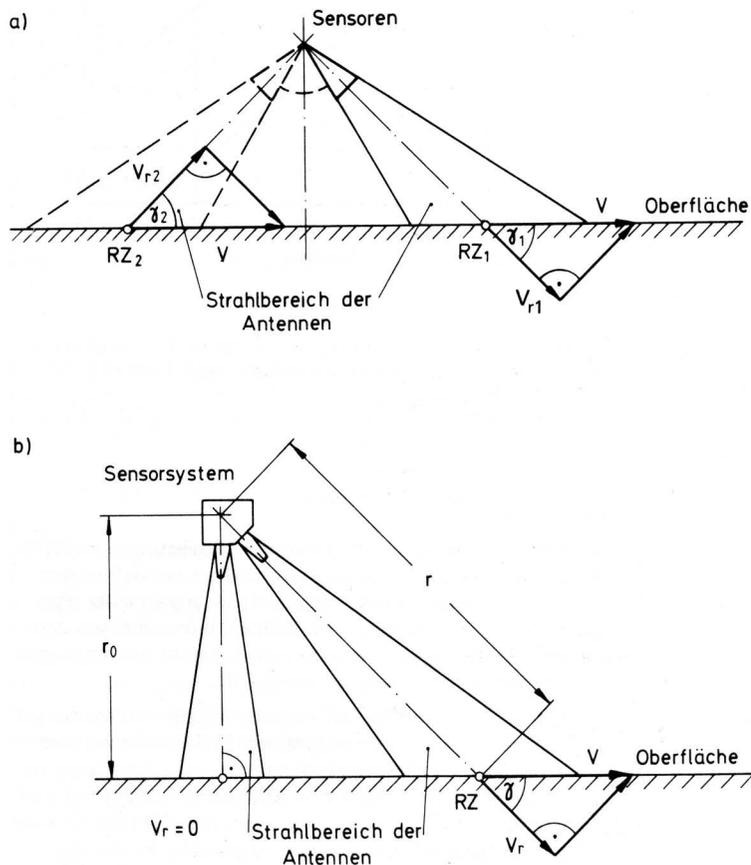


Bild 4. Schematische Darstellungen von Doppler-Sensorsystemen zur Fahrgeschwindigkeitsmessung; a) "Janus-Konfiguration" zweier Dauerstrich-Sensoren, b) Dauerstrich-Frequenzmodulations-system.

Für Präzisionsmeßzwecke ist ein System mit ebenfalls zwei Sensorantennen bekannt, von denen die eine senkrecht zur Fahrbahnoberfläche gerichtet ist und die andere wie gewohnt nach vorn weist, Bild 4b. Die Fahrgeschwindigkeit wird mit der Beziehung

$$v = v_r / \sqrt{1 - (r_0/r)^2} \quad (9)$$

ermittelt, indem die senkrecht stehende Antenne den zur Dopplerverschiebung null gehörenden Orthogonalabstand r_0 erfaßt, während die nach vorn gerichtete Antenne Wertepaare für r und v_r liefert [12]. Der geometrische Ort des Rückstreucentrums, der von der Oberflächenbeschaffenheit abhängt [10], wird somit erfaßt und hat keinen Einfluß auf das Meßergebnis. Ebenso bleiben Höhenschwankungen ohne Einfluß, wenn zwischen den beiden Sensorköpfen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Abstand so hin- und hergeschaltet wird, daß beide Strahlbereiche jeweils denselben Oberflächenausschnitt beleuchten.

Um sowohl Abstände als auch Geschwindigkeiten messen zu können, ist eine Frequenzmodulation der kontinuierlich emittierten Wellen vorgesehen. Die erforderlichen Rechen- und Steueralgorithmen sind praktisch nur durch den Einsatz hochentwickelter Mikroelektronik zu realisieren.

Die Anwendung von Geschwindigkeitsmeßverfahren mit Laserlichtquellen wird hier nicht beschrieben, da hinreichend kostengünstige Laserquellen in absehbarer Zeit nicht erhältlich sein dürften. Eine Zusammenstellung möglicher Anwendungsverfahren findet sich im Rahmen einer Übersicht über die verschiedenen Geschwindigkeitsmeßverfahren bei *Jahns* [11].

2.4.2.1 Ultraschall-Anwendung

Für eine Einrichtung zur Optimierung der Nutzleistung bei Planiermaschinen ist in den USA ein Ultraschall-Geschwindigkeitsaufnehmer mit einer Sendefrequenz von 39 kHz entwickelt und getestet worden [13]. Der eng begrenzte Meßbereich von 0,8–8 km/h und eine nicht kompensierte Temperaturabhängigkeit von ca. 2,5 % im Bereich normal auftretender Umgebungstemperaturen zeigen die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung, wenn die Meßaufgabe mehr als nur tendenzielle Informationen über den Geschwindigkeitsverlauf erfordert [14].

2.4.2.2 Radar-Anwendung

Doppler-Geschwindigkeitsaufnehmer auf der Basis elektromagnetischer Wellen im Radar-Bereich werden international seit einigen Jahren auch für landwirtschaftliche Anwendungsfälle angeboten [15, 16]. Man kann folglich davon ausgehen, daß dieses Wirkprinzip bezüglich der Funktionsfähigkeit und kostengünstigen Verfügbarkeit weit entwickelt ist. Über mehrjährige Betriebserfahrungen bei unterschiedlichen Einsatzbedingungen liegen zur Zeit noch keine Berichte vor.

3. Feldversuche

Um Aufschluß über die Genauigkeit und Anwendbarkeit der wichtigsten zuvor dargestellten Meßverfahren zu erhalten, wurden Feldversuche unter Einhaltung realistischer Randbedingungen durchgeführt. Versuchsträger war ein 55 kW-Standardschlepper mit zuschaltbarem Allradantrieb, zeitweilig an der Frontachse ausgerüstet mit Reifen für nicht angetriebene Räder (AS-Front) und zeitweilig mit 3furchigem Anbaudrehpflug. Die untersuchten Fahrgeschwindigkeiten erstreckten sich, sofern nicht arbeitstechnische und leistungsmäßige Grenzen maßgebend waren, auf den Hauptarbeitsbereich in Anlehnung an *Renius* [17].

3.1 Versuchsdurchführung

Alle untersuchten Aufnehmersysteme wiesen digitale Ausgangssignale auf, deren Zeitfrequenz die Geschwindigkeitsinformation beinhaltet. Daher konnten Summierzähler eingesetzt werden, um die von den Aufnehmern über einer definierten Wegstrecke erzeugte Impulszahl zu ermitteln. Zur Bestimmung der mittleren wahren Fahrgeschwindigkeit dienten eine am Schlepper befestigte Lichtschranke und zwei im Abstand von 10 bis 25 Metern in den Boden

gesteckte Rundstäbe zur Unterbrechung des Strahlengangs. Diese Unterbrechungen riefen Start/Stop-Signale für einen Zeitzähler und die Summierzähler hervor.

3.2 Versuchsauswertung

Als Beurteilungskriterium wurde die relative Empfindlichkeit s_{rel} benutzt, das heißt die Empfindlichkeit $s_i(v_i)$ wird auf einen für das jeweilige Meßverfahren zu definierenden Nennwert der Empfindlichkeit s_{nenn} bezogen. Es sei ξ eine beliebige, die Aufnehmercharakteristik bezeichnende Funktion, deren Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit v hier hauptsächlich interessiert. Dann soll gelten:

$$s_i(v_i) = \frac{\partial \xi}{\partial v_i} \quad (9)$$

und

$$s_{rel}(v_i) = \frac{s_i(v_i)}{s_{nenn}} \cdot 100 \% \quad (10)$$

Diese Funktion gibt Aufschluß über die Linearität und die Parameterabhängigkeit der verschiedenen Meßverfahren. Abweichungen vom Nennwert können als relative Meßfehler interpretiert und aus den folgenden Diagrammen in Abhängigkeit von der wahren Fahrgeschwindigkeit und für verschiedene Kalibrierbedingungen entnommen werden. Der jeweilige Nennwert resultiert entweder aus geometrischen Betrachtungen oder Herstellerangaben.

Des Weiteren wurde für wiederholte Messungen beim Pflügen auf ein und demselben Feld bei unveränderten technischen Parametern der Variationskoeffizient

$$V = \frac{|\sigma|}{\bar{s}} \cdot 100 \% \quad (11)$$

berechnet. In den Diagrammen erscheint er in Form der Ellipsenachse in Ordinatenrichtung und beschreibt den zufälligen Fehler des jeweiligen Meßverfahrens. Die Ellipsenachse in Abszissenrichtung gibt die Standardabweichung der in den Versuchen gefahrenen Geschwindigkeit an. Sie sagt lediglich etwas über die Versuchsbedingungen aus und grenzt den Bereich ein, aus dem die Stichproben entnommen werden konnten. Beim Pflügen war der mögliche Geschwindigkeitsbereich nach unten durch die geforderte Qualität des Wendevorgangs und nach oben durch die verfügbare Motorleistung eingegrenzt. Pflugbreite und -tiefe blieben unverändert. Nichts spricht jedoch dagegen, die angegebenen Streubereiche als gültig für den gesamten Hauptarbeitsbereich anzunehmen.

3.3 Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Drehwinkelgeschwindigkeit angetriebener Räder ist leicht zu messen, kann jedoch selbst bei unveränderten technischen Parametern und gleichbleibender Arbeitsaufgabe (Pflügen) wegen großer Streuungen des Schlupfs nicht als momentaner Schätzwert für die wahre Fahrgeschwindigkeit angesehen werden, **Bild 5**. Es läßt sich aber zeigen, daß zur Optimierung der Flächenleistung eines auf hohen Laufwerkwirkungsgrad ballastierten Schleppers dieses vereinfachte Meßverfahren ausreicht. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch, daß der mittlere Schlupf im betrachteten Betriebsbereich nur unwesentlich von der Fahrgeschwindigkeit abhängt. Hierfür sind einerseits der geringe Anstieg des Zugkraftbedarfs über v und andererseits ein steiler Verlauf der Kurve des Triebkraftbeiwerts über dem Schlupf maßgebend.

Nichtangetriebene Vorderräder mit Längsprofil zeigen ein Verhalten, das stark von der Achslast und den Abrollbedingungen – etwa Furchenwandreibung und Seitenkraftabstützung beim Pflügen – abhängt, **Bild 6**. Großvolumige Reifen mit AS-Profil liefern eine Empfindlichkeit, deren Größe in nahezu idealer Weise unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist, und haben auch beim Arbeitseinsatz auf dem Acker geringe Streuungen. Auffällig ist auch hier der Einfluß der Achslast und des Luftdrucks, **Bild 7**, vgl. auch **Bild 2**.

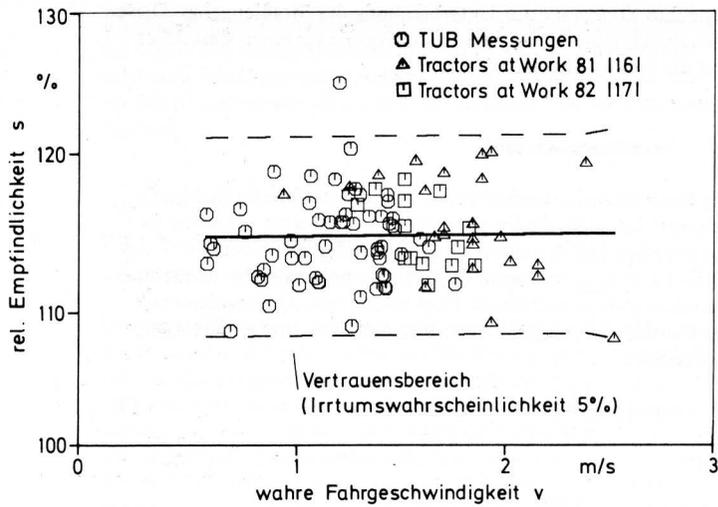


Bild 5. Relative Empfindlichkeit der Geschwindigkeitsermittlung über die Drehwinkelgeschwindigkeit angetriebener Räder beim Pflügen mit konstanter Arbeitstiefe. Alle Messungen der TU Berlin beziehen sich auf ein Fahrzeug. Die Meßpunkte nach [18] und [19] bezeichnen unterschiedliche Schlepper/Pflug-Kombinationen mit verschiedener Arbeitsbreite.

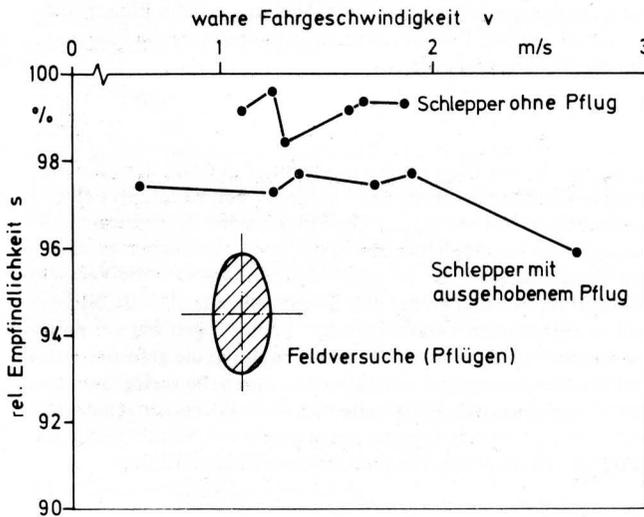


Bild 6. Relative Empfindlichkeit der Geschwindigkeitsermittlung über die mittlere Drehwinkelgeschwindigkeit von beiden nichtangetriebenen Vorderrädern; Reifen für nichtangetriebene Räder (7.50-18 AS-F, $p_{ij} = 2,0$ bar).

Bei entsprechendem Kalibrieraufwand ist dieses Verfahren für Versuchs- und Forschungsaufgaben gut geeignet.

Für eine breite praktische Anwendung bei Bodenbearbeitungsvorgängen scheinen dagegen Scheibenseche prädestiniert zu sein. Wichtig ist, daß das Meß-Sech frei von Seitenkräften gehalten wird. Es darf also nicht an seinem angestammten Platz seitlich des Pflugkörpers verbleiben, wo es beim Wendevorgang des Erdbalkens lateral an die Furchenwand gedrückt wird. Die Eindringtiefe kann im Bereich von etwa 10-25 % des Sechdurchmessers variieren, ohne das Meßergebnis signifikant zu beeinflussen. Erwartungsgemäß ist der Kalibrierfaktor für das gezahnte Sech geringfügig größer als beim glatten, **Bild 8**. Als Meßaufnehmer am Scheibensech hat sich eine Kombination aus mitdrehenden Permanentmagneten und feststehendem Hallelement bewährt, deren Materialkosten vernachlässigbar klein sind. Wird das Sech geräteseitig angebracht, so ist ein Signalübertragungskabel mit Steckkupplung erforderlich.

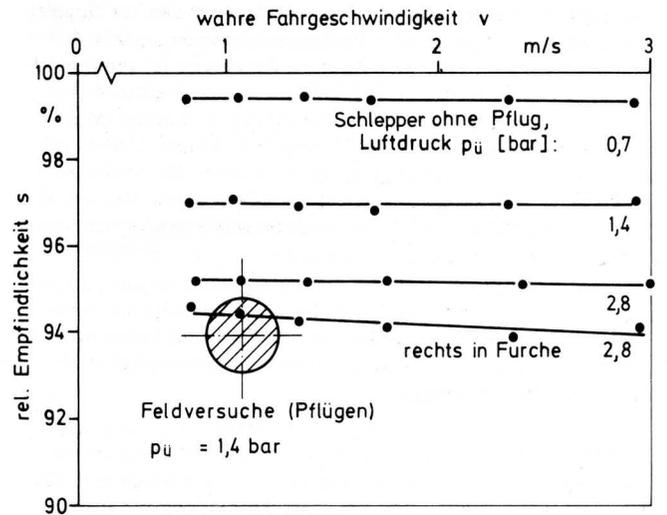


Bild 7. Relative Empfindlichkeit der Geschwindigkeitsermittlung über die mittlere Drehwinkelgeschwindigkeit von beiden nichtangetriebenen Vorderrädern; Reifen für Treibräder (11.2-24 AS).

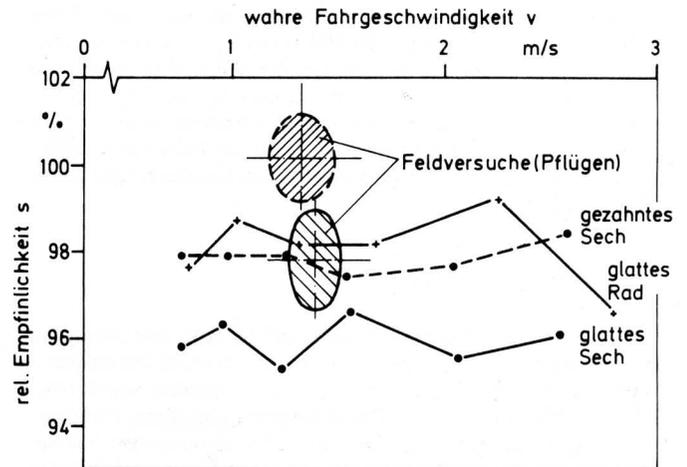


Bild 8. Relative Empfindlichkeit der Geschwindigkeitsermittlung über die Drehwinkelgeschwindigkeit von Scheibensechen ($d = 0,5$ m, angeordnet ca. 1 m vor dem letzten Pflugkörper) und eines unbereiften Stützrades.

Das untersuchte Radargerät war vorn am Schlepper außermittig befestigt, so daß es bei Arbeit mit einem Drehpflug entweder landseitig ausgerichtet war oder die Pflugfurchen abtastete. Im zweiten Fall, bei dem von einer gleichmäßigeren Reflexionsfläche ausgegangen werden kann, ergaben sich beim Pflügen geringere Meßwertstreuungen und eine unterschiedliche Empfindlichkeit, **Bild 9**. Meßfahrten ohne bzw. mit ausgehobenem Pflug ergaben einen deutlichen Anstieg der Empfindlichkeit für Geschwindigkeiten unter 1 m/s und, vermutlich hervorgerufen durch Nickschwingungen, im höheren Geschwindigkeitsbereich ansteigende Streuungen. Auf Flächen mit windbewegten Gras- und Junggetreidebeständen waren sowohl während der Fahrt als auch im Stand zufällig auftretende Meßwertverfälschungen zu beobachten, was in besonderen Anwendungsfällen die Eignung des Geräts einschränken könnte. Vor dem Einsatz von Radargeräten ist zudem die Frage der Zulässigkeit ihrer Frequenzen mit der Deutschen Bundespost zu klären, siehe auch [1].

Bild 10 bietet einen Vergleich der Variationskoeffizienten und **Tafel 1** faßt die wesentlichen Erkenntnisse aus den Versuchen in Form einer Bewertungsmatrix zusammen.

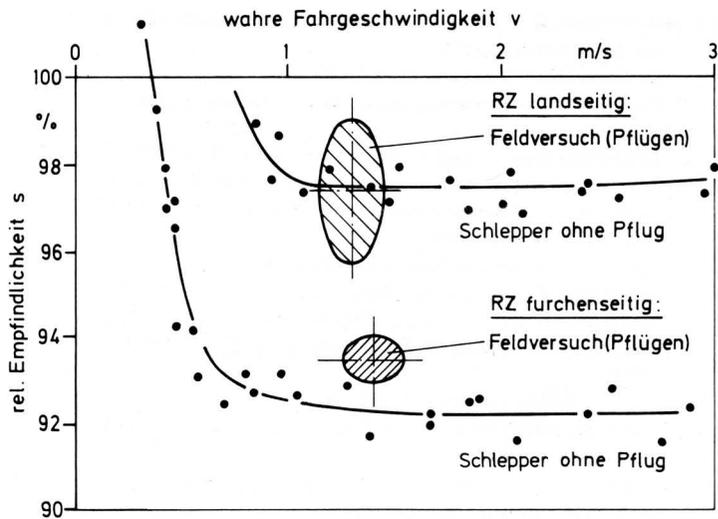


Bild 9. Relative Empfindlichkeit der Geschwindigkeitsermittlung mit der Dopplerfrequenz eines Dauerstrich-Radarsensors (Fa. Dickey-john Corp., Auburn, Ill.).
RZ Rückstrahlzentrum

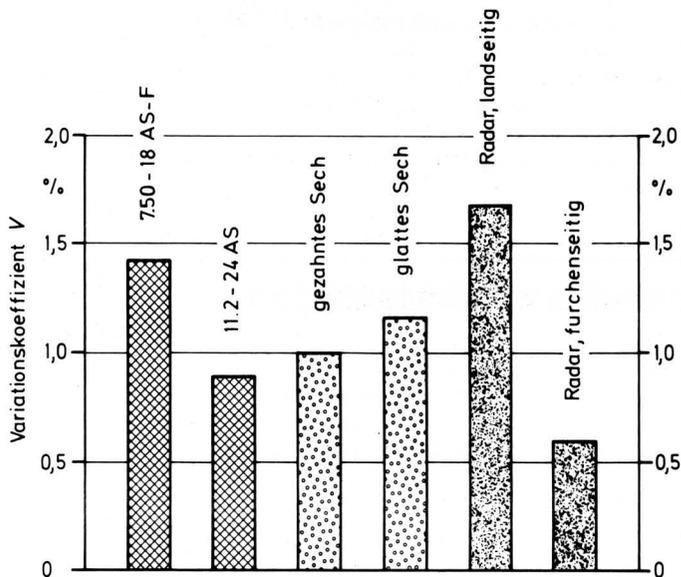


Bild 10. Variationskoeffizienten für die Empfindlichkeit der verschiedenen Geschwindigkeitsmeßverfahren, ermittelt in Feldversuchen (Pflügen, Stoppelfeld; Bodenart: lehmiger Sand).

4. Messung instationärer Geschwindigkeitsverläufe

Bei allen digitalen Verfahren, die auf der Messung von Drehwinkelgeschwindigkeiten beruhen, ist die Dynamik im wesentlichen durch das Zählverfahren und die zeitliche Auflösung durch die Anzahl der Impulse pro Wegstrecke bestimmt. Diese Verfahren bilden folglich praktisch verzögerungsfrei den wahren zeitlichen Verlauf der Fahrgeschwindigkeit ab.

Bei dem untersuchten Radargerät wird die Dopplerfrequenz mit Hilfe der PLL-Technik (phase-locked loop-Technik) ermittelt, wobei eine gute Stabilität aber auch Zeitverzögerungen zu erwarten sind. Um hierüber Aufschluß zu erhalten, wurden auf einer ebenen Asphaltstraße Anfahr- und Beschleunigungsversuche mit schnappen der Kupplung gefahren. Zum Vergleich wurden die Frequenzsignale des Radargeräts und der nichtangetriebenen AS-Vorderräder über Frequenz/Spannungswandler auf einen x,t-Schreiber gegeben. Ein Beispiel dieses Vorgangs ist Bild 11 zu entnehmen, das

Meßverfahren / Kriterium	Vorderräder		Scheibensech	Radars
	7.50-18 AS-F	11.2-24 AS		
Systemat. Meßfehler durch				
- Achslaständerung	o	o	++	+
- Luftdruckänderung	o	o	++	+
- Bodenänderung	o	+	+	o
Zufällige Meßfehler	-	++	+	+
Dynamik (für Regelungen)	+	+	+	-
Handhabung, Robustheit	+	+	o	+
Universeller Einsatz	+	o	o	+
Kosten	++	++	+	o

++ sehr gut
+ gut
o brauchbar
- schlecht

Tafel 1. Bewertungsmatrix für die untersuchten Geschwindigkeitsmeßverfahren.

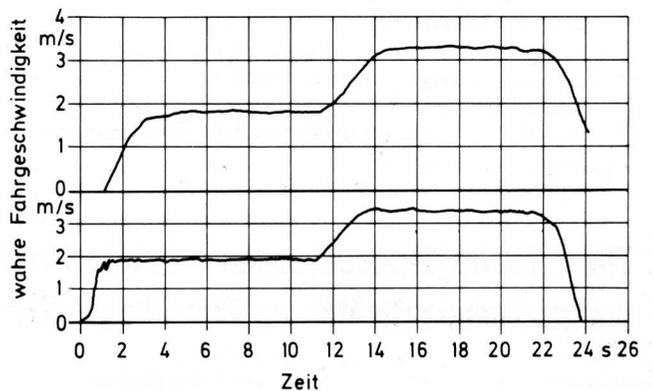


Bild 11. Zeitlicher Verlauf der Geschwindigkeitssignale bei einem Anfahrvorgang. Obere Kurve: Radarsensor; untere Kurve: nichtangetriebene AS-Räder.

für den Radarsensor eine Zeitverzögerung von 1,2 s ausweist. Dieser Wert ist, ebenso wie der aufgetretene Schleppfehler, für schnelle Regelvorgänge nicht akzeptabel.

5. Zusammenfassung

Anschließend an eine grobe Übersicht möglicher Meßverfahren zur Ermittlung der wahren Fahrgeschwindigkeit wird über Feldversuche mit den wichtigsten praktisch bedeutsamen Verfahren berichtet. Vom Standpunkt der Meßgenauigkeit kann die Erfassung der Drehwinkelgeschwindigkeit eines nichtangetriebenen Schleppvorderrades als unzureichend angesehen werden. Selbst bei großvolumigen Vorderradreifen sind Kalibrierversuche für die jeweilige Schlepper/Geräte-Kombination notwendig, um systematische Fehler zu reduzieren. Als recht günstig erweist sich im Rahmen von Bodenbearbeitungsvorgängen ein Scheibensech. Sofern es durch eine entsprechende räumliche Anordnung von Seitenkräften freigehalten wird, besteht ein gut reproduzierbarer Zusammenhang zwischen den geometrischen Abmessungen und dem wirksamen Radius. Der erforderliche Meßaufnehmer ist einfach und mit geringen Kosten herzustellen.

Für das untersuchte Radargerät ist das Kosten/Nutzen-Verhältnis derzeit noch unbefriedigend. Der unbestreitbare Vorteil der universellen Einsatzmöglichkeiten verliert an Wert, sobald es um Hofarbeiten, leichtere Pflegearbeiten und Erntevorgänge geht, bei denen Kriterien maßgebend sind, die nicht mit der wahren Fahr- geschwindigkeit unmittelbar korrelieren.

Für eine ausschließliche Nutzleistungsoptimierung ist die Erfassung und qualitative Anzeige einer Wellendrehzahl im Achsantrieb als erster Schritt ausreichend und empfiehlt sich zur Anwendung.

Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [1] *Fichtel, H. u. S.M. Ismail:* Untersuchungen zur Messung der Arbeitsgeschwindigkeit von Landmaschinen mit Hilfe eines Radargerätes. Grundl. Landtechnik Bd. 32 (1982) Nr. 4, S. 136/40.
- [2] *Steinbrenner, H. u. H.-J. Florus:* Über neue Methoden zur Messung von Beschleunigungsvorgängen an Fahrzeugen. Automobiltechn. Zeitschr.-ATZ Bd. 67 (1965) H. 1, S. 1/7.
- [3] *Tapp, D.R.F.:* Large four wheel drive tractors. Paper No. 3, Autumn Nat. Conf. of The Inst. of Agric. Eng., High Wycombe, 10th October 1978.
- [4] *Ehlers, K. u. R. Keitel:* Das fünfte Rad als genaues Meßgerät. Automobiltechn. Zeitschr.-ATZ Bd. 73 (1971) H. 1, S. 9/12.
- [5] *Drexl, H.-J.:* Ein Beitrag zur Leistungsübertragung von Ackerschleppern bei schwerem Zug. Diss. TU Berlin 1970.
- [6] *Tompkins, F.D. u. L. R. Wilhelm:* Instrumentation for measuring energy inputs to implements. ASAE-Paper No. 81-1575, St. Joseph 1981.
- [7] *Anisch, S.:* Abstützung der Seitenkräfte durch starre, passiv rollende Scheiben. agrartechnik Jg. 30 (1980) H. 9, S. 419/20.
- [8] ● *Wehrmann, W.:* Korrelationsmeßtechnik, ein neuer Zweig der Betriebsmeßtechnik. Grafenau/Württ.: expert-verlag 1980.
- [9] *Delingat, E.:* Berührungslose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn., Bd. VI (1976) Nr. 7, S. 249/57.
- [10] *Hyltin, T.M., T.D. Fuchser, H.B. Tyson u. W.R. Regueiro:* Vehicular radar speedometer. SAE-Paper 730125, New York 1973.
- [11] *Jahns, G.:* Geschwindigkeitsmeßverfahren für landwirtschaftliche Zug- und Arbeitsmaschinen. Unveröffentl. Bericht JA 10/1980 des Inst. f. landtechnische Grundlagenforschung der FAL, Braunschweig-Völkenrode 1980.
- [12] Präzisions-Mikrowellen-Sensor PSM. Unterlagen der Firma S-Team Elektronik GmbH, Kornwestheim (BRD) 1981.
- [13] *Goris, J.M. u. H.S. Benson:* Maximizing dozer work rate with draft power sensing systems. SAE-Paper 790510, Warrendale 1979.
- [14] *Benson, H.S.:* Persönliche Mitteilung. Januar 1980.
- [15] Unterlagen der Firma Dickey-john Corp., Auburn, Ill. (USA).
- [16] Unterlagen der Firma RDS Farm Electronics Ltd., Nailsworth (England).
- [17] *Renius, K.Th.:* Festlegung der Getriebeabstufung von Ackerschleppern nach Fahrgeschwindigkeitskollektiven. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 1, S. 7/15.
- [18] *Howe, S.D.:* Tractors at work. Power Farming Vol. 60 (1981) No. 10, S. 8/11.
- [19] Tractors at work '82. Power Farming Vol. 61 (1982) No. 11, S. 54.

Theoretische Untersuchungen zur optimalen Kombination von Allradsschleppern und gezogenen Geräten zur Bodenbearbeitung

Von Winfried Schäfer, Stuttgart-Hohenheim*)

DK 631.372:631.51

Hohe Flächenleistung und niedriger Energiebedarf werden bei gezogenen Geräten zur Bodenbearbeitung einerseits durch Verbesserung der Zugfähigkeit des Schleppers und Verminderung des Zugkraftbedarfs des Gerätes, andererseits durch eine sorgfältige Abstimmung der Betriebsparameter von Schlepper und Gerät erzielt. In diesem Beitrag wird ein Modell vorgestellt, das die Berechnung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination von Allradsschleppern und gezogenen Bodenbearbeitungsgeräten ermöglicht. Die Ergebnisse geben Aufschluß darüber, wie die vom Landwirt beeinflussbaren Größen: Nabenleistung, Schleppermasse, Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit im Sinne einer optimalen Kombination aufeinander abgestimmt werden müssen.

Vorliegender Beitrag beinhaltet die wesentlichen Ergebnisse der gleichnamigen Dissertation. Bericht: Prof. Dr.-Ing. A. Stoppel, Mitbericht: Prof. Dr.-Ing. H.D. Kutzbach.

*) *Dipl.-Ing. agr. W. Schäfer war Doktorand am Institut für Agrartechnik der Universität Hohenheim.*

Inhalt

1. Einleitung
2. Das Rechenmodell
 - 2.1 Annahmen und Voraussetzungen
 - 2.2 Mathematische Grundlagen
 - 2.3 Die Beziehungen zwischen Nabenleistung, Schleppergewicht, Arbeitsbreite und schlupfloser Geschwindigkeit
3. Die Ermittlung der zeit- und/oder energieminimalen Kombination von Allradsschlepper und gezogenem Bodenbearbeitungsgerät
 - 3.1 Nabenleistung und Arbeitsbreite gegeben
 - 3.2 Nabenleistung und Schleppergewicht gegeben
 - 3.3 Nabenleistung und schlupflose Geschwindigkeit gegeben
 - 3.4 Arbeitsbreite und Schleppergewicht gegeben
 - 3.5 Arbeitsbreite und schlupflose Geschwindigkeit gegeben
 - 3.6 Schleppergewicht und schlupflose Geschwindigkeit gegeben
4. Beurteilung der Ergebnisse
5. Zusammenfassung