

- [5] *Stahl, T., Th. Freye u. H.D. Kutzbach:* Automatic control of cleaning fan speed to reduce sidehill losses. ASAE-Paper-No. 81-1617.
- [6] *McGechan, M.B. u. C.A. Glasgey:* The benefits of different speed control systems for combine harvesters. *J. agric. Engng. Res.* Bd. 27 (1982) Nr. 27, S. 537/52.
- [7] *Eimer, M.:* Untersuchungen zur Durchsatzregelung am Mäh-drescher. Habilitationsschrift Univ. Göttingen 1973.
- [8] *Schueller, J.K., M.P. Mailänder u. G.W. Krutze:* Combine feedrate sensors. *Trans. ASAE* Bd. 28 (1985) Nr. 1, S. 2/5.
- [9] *Bernhardt, G.:* Grundsätzliche Überlegungen zu Automati-sierungskonzeptionen für Mähdrescher. *Agrartechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 1, S. 23/26.
- [10] *Freye, Th. u. H.D. Kutzbach:* Verminderung der Körnerver-luste von Mähdrescher-Reinigungsanlagen im Hangbetrieb durch Regelung des Luftstroms. *Grundl. Landtechnik* Bd. 29 (1979) Nr. 4, S. 105/108.
- [11] *Freye, Th.:* Untersuchungen zur Trennung von Korn-Spreu-Gemischen durch die Reinigungsanlage des Mähdreschers. Diss. Univ. Hohenheim 1980, Forschungsbericht des Ar-beitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft (MEG) Nr. 47.
- [12] *Kutzbach, H.D. u. W.H. Grobler:* Regelung einer Mähdre-scher-Reinigungsanlage. Tagungsbericht 10. Internat. Kongress des CIGR, Budapest 1984, Nr. 1–5, S. 221/28.
- [13] *Berner, D., W.H. Grobler u. H.D. Kutzbach:* Sensoren zur Messung der Körnerverluste von Mähdreschern. *Grundl. Landtechnik* Bd. 35 (1985) Nr. 4, S. 127/32.
- [14] *Heucke, H.:* Piezoresistive Drucksensoren. *EJ Information, "Und-oder-nor-Steuerungstechnik"*, Nr. 11/83, S. 27.
- [15] *Piezoresistive Druckaufnehmer; Funktionsbeschreibung und Datenblatt des Sensor Typ PD 2.* Fa. Keller-Druckmeßtech-nik, Güglingen.
- [16] *Z8 Microcomputer. Preliminary Technical Manual.* Best. Nr. 03-3047-02; Zilog.
- [17] *Z8671 Single-Chip BASIC Interpreter. BASIC/DEBUG Software Reference Manual.* Best. Nr. 03-3149-02; Zilog.

Grundlagen zur Geschwindigkeitsmessung auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen

Von Hermann Speckmann und Gerhard Jahns,
Braunschweig-Völkenrode*)

Mitteilung aus dem Institut für landtechnische Grundlagenforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode

DK 631.372:631.3.076:531.76

Arbeitserfolg und Effizienz der eingesetzten Betriebsmittel sind bei vielen Außenarbeiten, insbesondere aber bei den verschiedenen Verteilarbeiten, unmittelbar abhängig von der Genauigkeit, mit der Fahrgeschwindigkeit und Fahrweg erfaßt und zur Steuerung und Regelung des Prozesses genutzt werden. Nach einem kurzen Überblick über Geschwindigkeitsmeßverfahren werden die für die Landwirtschaft spezifischen Einsatzbedingungen erläutert und die Anforderungen an geeignete Verfahren unter besonderer Berücksichtigung der Radar-Dopplerverfahren zusammengestellt. Die Ergebnisse vergleichender Messungen unter praxisgerechten Bedingungen werden in einer folgenden Arbeit dargestellt.

1. Einleitung

Wirtschaftliche Gründe und Gesichtspunkte des Umweltschutzes geben Anlaß, den Einsatz der landwirtschaftlichen Betriebsmittel wie Saatgut, Pflanzenbehandlungs- und Düngemittel immer wieder zu überprüfen und ihre Effizienz durch einen nach Menge und Zeitpunkt gezielteren Einsatz zu verbessern. Diese ständige Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktionsverfahren richtet sich sowohl auf den Produktionsprozeß als Ganzes wie auch auf die eingesetzten einzelnen Arbeitsverfahren.

Eine Möglichkeit der Optimierung der Arbeitsverfahren liegt in der Anwendung weiterentwickelter Prozeßsteuerungen und -regelungen, wofür zwei Voraussetzungen gegeben sein müssen: zum einen die Kenntnis der jeweiligen Produktionsfunktionen und zum anderen die Verfügbarkeit geeigneter kostengünstiger Sensoren zur Erfassung der maßgebenden physikalischen Größen. Für den Betrieb fahrender Arbeitsmaschinen kommt den Größen Fahrgeschwindigkeit und Fahrweg eine herausragende Bedeutung zu, da sie wichtige Führungsgrößen für viele Arbeitsprozesse der Außenwirtschaft sind. Fehler bei ihrer Messung beeinträchtigen unmittelbar den Arbeitserfolg und die Effektivität der eingesetzten Betriebsmittel. Dies gilt besonders für alle Verteilarbeiten wie beispielsweise für das Ausbringen von Saatgut, Düngern und Pflanzenschutzmitteln.

*) *Dipl.-Ing. H. Speckmann und Dr.-Ing. G. Jahns sind wiss. Mitarbeiter am Institut für landtechnische Grundlagenforschung (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Batel) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode.*

Ziel dieser Arbeit ist es, Kriterien für die Eignung von Geschwindigkeitsmeßverfahren speziell für den Einsatz auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen zu finden. Dazu werden, ausgehend von einem Überblick über Verfahren der Geschwindigkeitsmessung, die Aufgaben der Geschwindigkeitsmessung im Rahmen unterschiedlicher Zielsetzungen analysiert, die aus den Aufgaben sich ergebender Anforderungen an die Meßtechnik abgeleitet und die für die Gestaltung der Meßgeräte wesentlichen Umgebungsbedingungen genannt. Da landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen sich auf sehr unterschiedlichen Fahrbahnen bewegen, wird mit Hilfe eines einfachen Modells exemplarisch für zwei Geschwindigkeitsmeßverfahren untersucht, wie die Fahrbahneigenschaften das Ergebnis der Messung beeinflussen.

Die Richtigkeit der hier dargestellten theoretischen Erkenntnisse wurde überprüft durch vergleichende Messungen mit verschiedenen Geschwindigkeitsmeßverfahren im Feldeinsatz, über die in einem nachfolgenden Aufsatz berichtet wird.

2. Übersicht über Verfahren der Geschwindigkeitsmessung

Für die Messung der Fahrgeschwindigkeit landwirtschaftlicher Fahrzeuge kommen berührende und berührungslose Geschwindigkeitsmeßverfahren in Frage [1], aus deren großer Zahl hier nur die wichtigsten kurz skizziert werden sollen.

2.1 Berührende Geschwindigkeitsmeßverfahren

Merkmal der berührenden Meßverfahren ist, daß ein fahrzeugfester Rotationskörper z.B. ein Rad kraft- oder formschlüssig auf dem überfahrenen Untergrund abrollt. Bei konstantem Rollradius und bei bekanntem Schlupf ist dann die Winkelgeschwindigkeit der Drehbewegung ein Maß für die Fahrgeschwindigkeit.

In der Praxis ist aber weder der Rollradius konstant noch der Schlupf hinreichend genau erfaßbar. Bei Ackerschleppern und fahrenden Arbeitsmaschinen variiert der Rollradius durch Änderungen des Reifeninnendruckes, Verschleiß und veränderliche Radlasten, nicht zuletzt aber auch durch die plastisch-elastische Deformation der landwirtschaftlichen Fahrbahnen. Der Schlupf wiederum ist stark abhängig von den Eigenschaften der Reifen/Boden-Paarung, den Radumfangskräften und Radlasten. Er beträgt selbst dann, wenn die Umfangskräfte wie z.B. bei nichtangetriebenen Rädern von Ackerschleppern gering sind, auf landwirtschaftlichen Fahrbahnen noch 2–3 %, in Extremfällen bis zu 6 % (auf trockenem Asphalt etwa 0,5 %) [2]. Aus diesen Gründen muß bei der Bestimmung der Fahrgeschwindigkeit aus der Winkelgeschwindigkeit nichtangetriebener Führungsräder auf landwirtschaftlichen Fahrbahnen mit entsprechenden Meßfehlern gerechnet werden. Treibende Fahrzeugräder [3] kommen aufgrund ihrer teilweise großen Radumfangskräfte und des daraus resultierenden Schlupfes und Meßfehlers erst recht für die Messung nicht in Betracht.

Steht wie z.B. bei allradgetriebenen Ackerschleppern kein antriebsfreies Fahrzeugrad zur Verfügung, so kann die Verwendung eines zusätzlichen Rades in Form eines Peiselerrades oder eines nichtgetriebenen Geräterades eine Alternative darstellen. Besonders dann, wenn es in der von den Fahrzeugrädern erzeugten Spur geführt wird, können entscheidende Verbesserungen und meßtechnisch befriedigende Ergebnisse erwartet werden. Soll ein zusätzliches "fünftes" Rad (Peiselerrad) keine arbeitstechnischen Handhabungsprobleme z.B. beim Rangieren des Fahrzeuges liefern, so ist der Aufwand für einen betriebssicheren und robusten Aufbau erheblich.

Die Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit aus der Ab- oder Aufspulgeschwindigkeit von am Boden fixierten Seilen oder Leitungen bleibt Versuchszwecken bzw. Sonderfällen wie bei der Geschwindigkeitsmessung von Beregnungseinrichtungen vorbehalten [4, 5].

2.2 Berührungslose Geschwindigkeitsmeßverfahren

Zu den berührungslosen Meßverfahren werden alle Verfahren gezählt, bei denen mit Hilfe eines Strahles die Oberfläche der Fahrbahn abgetastet wird, um daraus die Fahrgeschwindigkeit zu bestimmen.

Bei den nach dem Dopplerprinzip arbeitenden Verfahren mit Hilfe von Ultraschallwellen [6], elektromagnetischen Mikrowellen (Radar) [7 bis 15] oder monochromatischem Licht (Laserstrahlen) [16] wird die durch die Bewegung hervorgerufene Frequenzverschiebung zwischen dem ausgesandten und dem wieder empfangenen Strahl gemessen. Diese Frequenzverschiebung ist direkt proportional zur Fahrgeschwindigkeit, soweit die Fahrgeschwindigkeit sehr klein ist gegenüber der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Meßstrahlen.

Meßsysteme, die nach dem Korrelationsverfahren [17, 18] arbeiten, bestimmen generell die Laufzeiten von Meßsignalen, die von zwei oder mehr Aufnehmern zeitverschoben von gleichen Punkten der Fahrbahnoberfläche gewonnen werden. Aus den definierten Abständen der Signalaufnehmer und den Laufzeiten läßt sich die Fahrgeschwindigkeit errechnen. Aufwendige Verfahren arbeiten mit einer Bildabtastung durch elektronische Kameras. Einfache Systeme begnügen sich mit der Abtastung einzelner Bildpunkte z.B. mit Photozellen. In beiden Fällen erfolgt eine anschließende Auswertung mit Hilfe eines Rechners.

Bei Verfahren, die mit Hilfe der Ortsfrequenzfilterung [18, 19, 20] arbeiten, wird die Oberfläche auf einem Strichgitter abgebildet. Bei einer Relativbewegung einer hinreichend strukturierten Oberfläche orthogonal zur Gitterrichtung empfängt ein hinter dem Gitter angeordneter Photoempfänger ein moduliertes Signal, dessen Frequenz proportional zur Geschwindigkeit des Fahrzeuges ist. Die beiden zuletzt genannten Meßverfahren arbeiten mit inkohärentem Licht, entweder mit Tageslicht oder mit dem Licht von Glühlampen.

Alle bisher genannten berührungslos arbeitenden Meßverfahren erfordern keine Installation oder Vorbereitung auf dem Feld oder der Fahrbahn. Sollten aber in Zukunft z.B. bei Intensivkulturen Leitsysteme verwendet werden, so ist es möglich, die Leitsysteme zur Geschwindigkeitsmessung zu nutzen, z.B. dadurch, daß die Position des Fahrzeuges in hinreichend kurzen zeitlichen Abständen gemessen und daraus die Geschwindigkeit errechnet wird. Für diesen Zweck würde sich eine Vielzahl der für eine automatische Fahrzeugführung vorgeschlagenen Leitsysteme [21, 22] eignen.

3. Anforderungen an Geschwindigkeitsmeßverfahren für fahrende landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen

Um die Eignung der Meßverfahren für den Einsatz auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen zu beurteilen, ist von den Aufgaben auszugehen, für die ein derartiges Verfahren eingesetzt werden soll. Daneben sind aber auch die Anforderungen zu untersuchen, die von den Umgebungsbedingungen her an diese Meßsysteme zu stellen sind.

3.1 Analyse der Aufgaben für Geschwindigkeitsmeßverfahren

3.1.1 Anzeige der Fahrgeschwindigkeit

Bei vielen Arbeitsvorgängen etwa bei Transportarbeiten, Fahrten zum Feld und Hofarbeiten bestimmt die Fahrzeuggeschwindigkeit zwar den Zeitaufwand für die Arbeitserledigung, doch wird die Arbeitsqualität nicht durch exaktes Einhalten einer bestimmten Fahrgeschwindigkeit beeinflusst. Es genügt hier die Anzeige der Fahrgeschwindigkeit zur Überwachung von Grenzwerten, beispielsweise von zulässigen Höchstgeschwindigkeiten.

An die hierfür eingesetzten Meßverfahren werden nur geringe Anforderungen hinsichtlich des Auflösungsvermögens, der Meßtoleranzen, der Reproduzierbarkeit sowie des Zeitverhaltens des Meßsignals gestellt. Die Entwicklung oder der Einsatz hochwertigerer

Meßverfahren als bisher wäre ausschließlich für diesen Zweck nicht zu rechtfertigen. Eine geeignete eindeutig ablesbare Form der Anzeige ist von entscheidendem Vorteil und mit geringen finanziellen Mitteln zu erreichen.

3.1.2 Ermittlung flächenbezogener Betriebsdaten

Die in der Außenwirtschaft als Grundlage für die Steuerung und Überwachung des Betriebsablaufs erforderlichen Betriebsdaten, wie z.B. der Betriebsmittel- oder Zeitbedarf, sind größtenteils flächenbezogen. Die Ermittlung der Fläche erfolgt dabei aus der Arbeitsbreite und dem zurückgelegten Weg, wobei der Weg durch Integration der Fahrgeschwindigkeit über der Zeit bestimmt werden kann. Das Auflösungsvermögen und das Zeitverhalten des Geschwindigkeitsmeßsystems sind für diese Aufgaben unkritisch. Doch die Integration der Fahrgeschwindigkeit über große Zeiträume erfordert Meßverfahren mit geringen Meßtoleranzen.

Für diesen Einsatzfall muß das Geschwindigkeits- bzw. Wegsignal nicht nur angezeigt werden, sondern es muß zur Flächenermittlung mit weiteren Meßgrößen und Steuersignalen verknüpft werden können. Die derzeit verwendeten Geschwindigkeitsmeßverfahren genügen diesen Anforderungen im allgemeinen nicht.

3.1.3 Messung der Fahrgeschwindigkeit zur Prozeßoptimierung

Eine steigende Bedeutung kommt der Fahrgeschwindigkeit bei der Optimierung von Arbeitsprozessen zu. Im einfachsten Fall läßt sich die Effektivität und Betriebssicherheit der Arbeitserledigung z.B. des Pflügens steigern durch Überwachen der Fahrgeschwindigkeit oder des Schlupfes hinsichtlich des Überschreitens vorgegebener Grenzwerte. Für diese Aufgabe muß das Meßverfahren möglichst schnell den Geschwindigkeitsänderungen folgen. Auflösungsvermögen und Meßtoleranzen sind von geringerer Bedeutung.

Bei Verteilungsaufgaben — Säen, Düngen in fester oder flüssiger Form, Ausbringen von Pflanzenbehandlungsmitteln und Bewässern — ist die Fahrgeschwindigkeit bzw. der Fahrweg die entscheidende Führungsgröße für die Verteilgenauigkeit und damit die Arbeitsqualität. Da hierbei Fehler in der Geschwindigkeitsmessung direkt zu Fehlern in der Arbeitsqualität führen, sind hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit, das Auflösungsvermögen und die Meßtoleranzen zu stellen. Zusätzlich kann sich die Dynamik der Geschwindigkeitsmessung auf die Stabilität der nachgeschalteten Regelkreise auswirken, so daß als Idealfall eine verzögerungsfreie Messung anzustreben ist. Andernfalls ist das Zeitverhalten des Meßsystems den Anforderungen der nachgeschalteten Regelkreise anzupassen.

3.1.4 Bewertung

Für Geschwindigkeitsmeßgeräte, die lediglich der Anzeige dienen, lassen sich nur geringe Kosten vertreten. Für Geschwindigkeitsmeßgeräte, die vielseitig zur Regelung verschiedener Arbeitsprozesse und Anbaugeräte dienen, kann ein höherer Preis angesetzt werden. Der Nutzen einer zusätzlichen Geschwindigkeitsmeßeinrichtung ist dabei immer in Zusammenhang mit dem spezifischen Arbeitseinsatz zu sehen, so daß sich ein allgemeines Kosten/Nutzen-Verhältnis nicht definieren läßt. Außerdem bewegen sich die Preise für elektronische Meßgeräte stetig abwärts. Deshalb soll auf den Kostenaspekt nicht weiter eingegangen werden.

3.2 Meßbereich, Auflösungsvermögen und Meßtoleranz

Der notwendige Meßbereich der hier angenommenen Geschwindigkeitsmeßverfahren leitet sich ab aus dem Geschwindigkeitsbereich, in dem fahrende landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen eingesetzt werden. Aus Bild 1, das für Mitteleuropa die Einsatzzeiten für Ackerschlepper aufgetragen über der Fahrgeschwindigkeit zeigt [23], läßt sich ein Bereich von 4–12 km/h (ca. 1–3,5 m/s) ablesen, der überwiegend benutzt wird. Der Meßbereich sollte jedoch größer sein und mindestens von 1–36 km/h reichen.

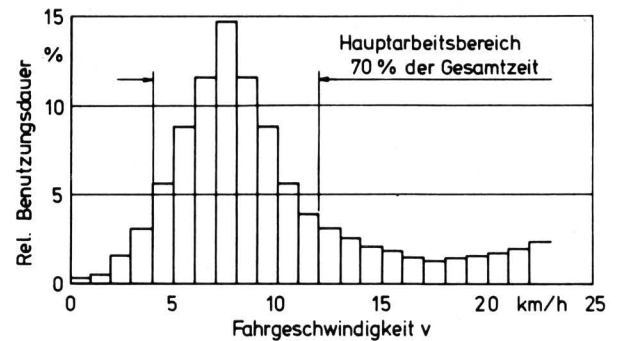


Bild 1. Relative Benutzungsdauer der Fahrgeschwindigkeiten von Ackerschleppern in Mitteleuropa; nach Renius [23].

Fordert man z.B. für Sägeräte eine Wegauflösung von 1 cm, so bedingt dies ein Auflösungsvermögen des Geschwindigkeitsmeßverfahrens von 0,01 m/s. Auch die Meßtoleranzen der Geschwindigkeitsmeßverfahren müssen für alle Betriebsbedingungen deutlich kleiner werden, als sie bisher sind. Als obere Grenzwerte können $\pm 2\%$, bezogen auf den Meßwert in einem Bereich von 1–10 km/h, angesehen werden. Für den darüber hinausgehenden Bereich bis 36 km/h ist der Meßfehler kleiner als $\pm 0,2$ km/h zu halten.

3.3 Zeitliches Verhalten

Neben den genannten Anforderungen an ein Geschwindigkeitsmeßsystem sind weitergehende, das zeitliche Verhalten des Meßverfahrens bestimmende Bedingungen zu stellen. Definiert man die zu messende Fahrgeschwindigkeit als die Relativgeschwindigkeit des Fahrzeuges parallel zur Fahrbahnoberfläche in Fahrtrichtung, so soll ein ideales Meßverfahren nur diese Komponente der Fahrzeugbewegungen messen, und dies möglichst ohne zeitliche Verzögerung.

Je nach Art des Meßverfahrens werden im Meßsignal jedoch auch andere Geschwindigkeitskomponenten erfaßt. So messen die berührungslos mit "Strahlen" arbeitenden Verfahren die Geschwindigkeit, mit der sich die fahrzeugfeste Sende/Empfangs-Einheit in Richtung auf den Ort der Reflexion auf der Fahrbahn bewegt. Diese Geschwindigkeit ist zwar überwiegend von der gesuchten Fahrgeschwindigkeit abhängig, enthält daneben aber auch Geschwindigkeitskomponenten aus Nick-, Roll- und Wankbewegungen des Fahrzeuges und aus Abstandsänderungen des Meßsystems zur reflektierenden Fahrbahnoberfläche, die von Bodenunebenheiten hervorgerufen werden. Je nach Befestigungsort des Meßsystems am Fahrzeug resultieren daraus mehr oder weniger große augenblickliche Abweichungen der von dem Meßsystem angezeigten Geschwindigkeit von der zuvor definierten Fahrgeschwindigkeit. Auf nähere Einzelheiten wird am Beispiel des Doppler-Verfahrens mit Hilfe von Radarwellen in Abschn. 4 eingegangen.

Betrachtet man die zusätzlichen Geschwindigkeitskomponenten im normalen Einsatz der Fahrzeuge, so bleibt festzuhalten, daß der Integralwert dieser Komponenten Null ergibt, da andernfalls das Fahrzeug die Fahrspur (seitlich oder in der Höhe) verlassen würde. Daher läßt sich das Signal für die definierte Fahrgeschwindigkeit gewinnen, indem z.B. aus dem Meßsignal ein gleitender Mittelwert gebildet wird. Für die Mittelwertbildung ist zu beachten, daß der Streubereich des Geschwindigkeitssignals, also der Bereich kurzzeitiger Abweichungen vom Mittelwert, grundsätzlich um so größer ist, je kleiner die Zeitkonstante für diese Mittelung gewählt wird. Im Interesse eines gleichförmigen Geschwindigkeitssignals bei konstanter Fahrgeschwindigkeit ist daher eine große Zeitkonstante anzustreben, während andererseits zu fordern ist, daß das Meßsignal Geschwindigkeitsänderungen beim Beschleunigen und Verzögern hinreichend schnell folgen soll.

Für die Abschätzung der zulässigen Zeitkonstanten ist deren Einfluß auf den zeitlichen Verlauf des Meßsignals zu untersuchen. Dazu dient ein einfaches Rechenmodell (Tiefpaß 1. Ordnung), für das die Ergebnisse als Geschwindigkeitsverlauf und als Quotient aus der angezeigten und der wahren Geschwindigkeit (hier als Arbeitsgüte bezeichnet) in Bild 2 und 3 dargestellt sind. Angenommen wurde hier eine konstante Beschleunigung von 1 m/s^2 bzw. 2 m/s^2 bei einem Anfahrvorgang im Geschwindigkeitsbereich von $0-1 \text{ m/s}$ (jeweils links im Bild) und beim Beschleunigen von 1 m/s auf 2 m/s (jeweils Bildmitte und rechter Bildteil). Als Zeitkonstanten wurden $0,1; 0,2; 0,4$ und $0,8 \text{ s}$ angenommen. Der Einfluß der Zeitkonstanten zeigt sich hier deutlich durch die Abweichungen im Verlauf von wahrer und angezeigter Geschwindigkeit. Er bewirkt, daß mit steigender Zeitkonstante während einer länger werdenden Fahrstrecke nicht die ideale Arbeitsgüte erreicht wird. Beim Anfahrvorgang ist hierbei der Einfluß der unterschiedlichen Fahrzeugbeschleunigung von untergeordneter Bedeutung.

Beim Beschleunigen von einer Ausgangsgeschwindigkeit auf eine höhere Endgeschwindigkeit (hier von 1 m/s auf 2 m/s) fällt die Arbeitsgüte kurzfristig, um dann asymptotisch in den Idealwert einzulaufen. Dabei ist das Absinken der Arbeitsgüte mit steigender Zeitkonstante stärker ausgeprägt. Größer werdende Beschleunigungen führen ebenfalls zum stärkeren Absinken der Arbeitsgüte. Der mit fehlerhafter Arbeitsgüte zurückgelegte Fahrweg ist dabei umgekehrt proportional zur Beschleunigung. Unter Berücksichtigung der Fahrdynamik landwirtschaftlicher Fahrzeuge, bei denen im normalen Betrieb von einer maximalen Beschleunigung von 2 m/s^2 auszugehen ist, erscheint eine Zeitkonstante von maximal $0,2 \text{ s}$ noch vertretbar. Da jedoch mit wachsender Geschwindigkeit während der Übergangszeit eine größer werdende Fahrstrecke zurückgelegt wird, ist eine Mittelungszeit des Meßsignals anzustreben, die umgekehrt proportional zur Fahrgeschwindigkeit ist.

Die zuvor abgeleiteten Anforderungen an Geschwindigkeitsmeßverfahren für die Abschn. 3.1 erläuterten unterschiedlichen Zielsetzungen sind in Tafel 1 zusammengefaßt.

3.4 Umgebungsbedingungen für Geschwindigkeitsmeßverfahren in der Landwirtschaft

Die Eignung der Geräte hängt neben den meßtechnischen Eigenschaften von ihrem Verhalten gegenüber den harten physikalischen und chemischen Umgebungsbedingungen in der Landwirtschaft ab. Da sie im allgemeinen am Fahrzeug fest installiert sind, müssen sie sowohl den im Winter als auch den im Sommer auftretenden Temperaturschwankungen standhalten. Nach Tafel 2 ist an Kraftfahrzeugen mit Temperaturen im Bereich von -40 °C bis $+120 \text{ °C}$ zu rechnen. In diesem Temperaturbereich müssen die Geräte mit der installierten Elektronik arbeitsfähig sein, und das Meßverfahren darf durch schnelle Änderungen der Temperaturen in diesen Größenordnungen nicht beeinflusst werden. Denkt man z.B. an Meßverfahren, die mit Ultraschall arbeiten, so ist zu beachten, daß die Schallausbreitungsgeschwindigkeit sehr stark von der Lufttemperatur abhängt. Eine Kompensation dieses Einflusses durch Messung der Lufttemperatur an einem Ort ist hier nicht ausreichend, da insbesondere bei leistungsstarken Maschinen sich durch die Abgabe der Motorabwärme in die Umgebung Temperaturfelder ausbilden, bei denen infolge der Luftbewegungen in der Nähe des Fahrzeuges mit schnellen zeitlichen Änderungen der Temperaturen und großen örtlichen Temperaturgradienten zu rechnen ist.

Zusätzlich müssen die Meßgeräte und das Meßverfahren der Feuchte der Umgebungsluft standhalten. Der Feuchtebereich erstreckt sich hierbei von extrem trockenen Klimaten bis hin zur Sättigung der Umgebungsluft. Die Geräte werden Einflüssen durch Spritzwasser, Säuren, Laugen und organische Verbindungen ausgesetzt.

Mechanische Belastungen durch Schwingungen treten bis zu Beschleunigungen von 10 g und Frequenzen von bis zu 60 Hz an den für die Gerätebefestigung geeigneten Punkten auf. Hinzu kommen Stoßbeschleunigungen mit noch höheren Amplituden. Des Weiteren können Verschmutzungen durch Staub oder Schlamm die Funktion des Meßverfahrens beeinträchtigen.

Da die Elektronik der Meßgeräte im allgemeinen von der Batterie des Fahrzeuges, also vom Bordnetz, versorgt wird, muß sie im Bereich der auftretenden Spannungsschwankungen arbeitsfähig bleiben. Im Normalfall, also beim Ladebetrieb während des Laufs des Motors, werden in einer 12 V -Anlage Spannungen bis zu 16 V erreicht. Andererseits kann durch das Einschalten größerer Verbraucher die Spannung kurzfristig bis auf 6 V absinken. Hinzu kommt, daß das Bordnetz durch Störspannungen mit Spannungsspitzen von einigen Hundert Volt verseucht ist. Die eingesetzten Stromversorgungselemente sind daher gegen diese hohen Störspannungen zu sichern.

Landwirtschaftliche Fahrzeuge werden sehr häufig unter Überlandleitungen betrieben, und bei diesen Hochspannungsleitungen treten elektrische Feldstärken bis 20 kV/m auf. Wegen dieser elektrischen Felder und zusätzlicher magnetischer Felder müssen die Geräte so konzipiert sein, daß sie eine ausreichende elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) besitzen und einsatzfähig bleiben. Prüfvorschriften für elektronische Geräte auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen werden z.Zt. von der ASAE erarbeitet.

4. Analyse zweier Meßverfahren und Modellbetrachtungen

Da der zeitliche Verlauf der angezeigten Geschwindigkeit und die Meßtoleranz von Geschwindigkeitsmeßverfahren in der Landwirtschaft von den Geräteeigenschaften und in stärkerem Maße von den Einflußgrößen der Fahrbahnoberflächen und Fahrzeugbewegungen in anderer als der Fahrtrichtung bestimmt werden, sollen exemplarisch für zwei Verfahren diese Einflüsse näher untersucht werden.

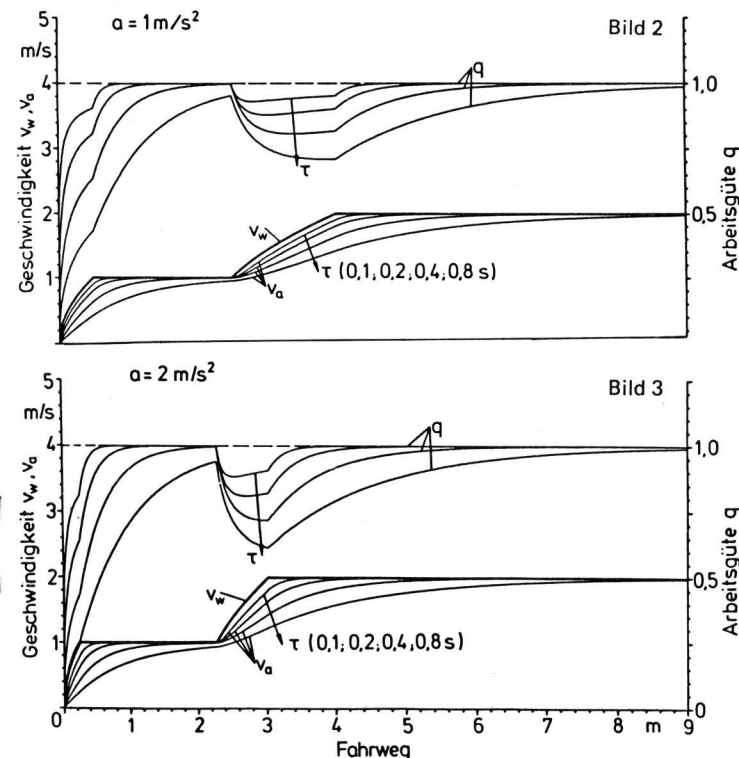


Bild 2 und 3. Wahre (v_w) und angezeigte Geschwindigkeit (v_a) sowie Arbeitsgüte $q = v_a/v_w$ in Abhängigkeit vom Fahrweg bei Meßverfahren mit unterschiedlichen Zeitkonstanten τ der Mittelwertbildung (errechnete Werte, Tiefpaß 1. Ordnung) für das Anfahren (links) und das Beschleunigen von 1 m/s auf 2 m/s .

Bild 2: Beschleunigung $a = 1 \text{ m/s}^2$

Bild 3: Beschleunigung $a = 2 \text{ m/s}^2$

Aufgabenbereich	Einsatzbeispiele	Meßbereich	Meßtoleranz	Auflösung	Zeitkonstanten (bei Fahrge- schwindigkeits- änderungen)	Zusatzbedingungen
reine Anzeige	Hofarbeiten, Fahrten zum Feld Transportarbeiten	5–36 km/h ¹⁾	0–5 % (v.E.) ²⁾	≤ 0,25 km/h (< 1 % v.E.)	≤ 2 s (ausreichend für "ruhige" Anzeige)	übersichtliche "ruhige" Anzeige
weg- u. flächenbez. Betriebsdaten	Feldbestellung Pflege-, Ernte-, Transportarbeiten (ohne Regelung nach der Ge- schwindigkeit)	2,5–36 km/h	± 2 % (v.S.)	≤ 0,05 km/h ⁴⁾	≤ 1 s	numerische Anzei- ge des Integral- wertes
Prozeßoptimierung Grenzwerte	Schlupfbegrenzung bei schwerer Bo- denbearbeitung, Antiblockiersystem	2,5–36 km/h ¹⁾	± 4 % (v.S.)	≤ 0,1 km/h ⁴⁾	≤ 0,2 s	weiterverarbeit- bares Meßsignal, z.B. in elektrischer Form
Führungsgröße	Säen, Spritzen, Düngen usw.	1 (1,8)–20 km/h ⁶⁾	± 2 % (v.S.) ± 0,2 km/h ³⁾	≤ 0,036 km/h (= 0,01 m/s) ⁵⁾	≤ 0,2 s	Weiterverarbeit- bares Meßsignal, z.B. in elektrischer Form

(v.E.) vom Endwert; (v.S.) vom Sollwert, Meßwert

1) Für Transportfahrzeuge: Meßbereich bis über 70 km/h

2) In loser Anlehnung an Vorschriften für Pkw-Tachometer

3) Die jeweils kleinere Toleranzgrenze sollte über den Meßbereich eingehalten werden

4) Grenzwert der Auflösung als Produkt aus Meßbereichsuntergrenze und Maximaltoleranz

5) Für Weginkremente von 1 cm erforderliche Auflösung

6) Meßbereichsuntergrenze 1,8 km/h für Meßtoleranz ± 2 % (v.S.) und Auflösung 0,036 km/h

halbfett Anforderungen an ein universelles Geschwindigkeitsmeßverfahren

Tafel 1. Anforderungen an Geschwindigkeitsmeßverfahren mit unterschiedlicher Zielsetzung für fahrende landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen.

4.1 Gerätespezifische Einflüsse auf Meßfehler

Bei der Messung der Fahrgeschwindigkeit mit Hilfe eines berührenden Verfahrens in Form eines Peiselerrades wird von dem federnd befestigten, möglichst kräftefreien, zusätzlich angebautes Rad die Drehwinkelgeschwindigkeit der Abrollbewegung mit Hilfe von Winkelinkrementgebern festgestellt. Aus der resultierenden Impulsfrequenz und dem Radumfang kann die Geschwindigkeit bestimmt werden zu:

$$v(t) = 2 \pi r \, d\Omega/dt$$

bzw.

$$v(t) = 2 \pi r \, \Delta\Omega/\Delta t \quad (1)$$

Ω Drehwinkel

r Radius.

Bei diesen Messungen treten gerätetechnisch bedingte Fehler und Einflüsse auf. Durch Änderung des Radumfangs, z.B. als Folge unterschiedlichen Luftdrucks in den Reifen (Temperatur, Leck), werden Meßfehler hervorgerufen. Die Anzahl der Teilungen n des Winkelinkrementgebers über eine volle Radumdrehung in Verbindung mit dem Rollradius legt das Auflösungsvermögen des Meßsystems hinsichtlich des Weges fest:

$$\Delta s = 2 \pi r/n \quad (2)$$

Tafel 2. Physikalische Belastungen der Kraftfahrzeug-Elektronik, nach Ehlers [24].

Temperaturen	mech. Belastung	Versorgungsspannungen	Störspannungen
Innenraum -40 ... +60 °C	f: 0–60 Hz a: 0–1,5 g	12 V-Anlage (6–16 V)	T = 2 ms, $R_i = 10 \Omega$ -100 ... +40 V
Außenraum -40 ... +60 °C	f: 0–60 Hz a: 0–10 g		T = 0,1 μ s, $R_i = 50 \Omega$ -150 ... +100 V
Motor -40 ... +120 °C	f: 0–200 Hz a: 0–100 g		

Fertigungsbedingte Toleranzen in den Winkelinkrementen wirken sich besonders bei geringen Geschwindigkeiten in einer Streuung der Momentanwerte der gemessenen Geschwindigkeit aus, da das Meßsignal nicht mehr ausreichend zeitlich gemittelt wird. Weitere Einflüsse ergeben sich durch die eingesetzte Frequenzmessung und die Weiterverarbeitung des Meßsignals — z.B. bei Verwendung von Frequenz/Spannungs-Umsetzern zur Gewinnung eines analogen Geschwindigkeitssignals.

Bei der berührungslosen Messung der Fahrgeschwindigkeit mit einem Radar-Doppler-Meßgerät wird von einem auf dem Fahrzeug installierten Sender ein Radarstrahl unter definiertem Winkel gegen die Fahrbahn geschickt, Bild 4. Infolge der Rauigkeit des Untergrundes findet eine diffuse Reflexion dieses Strahls statt. Von dem reflektierten Strahl trifft nur ein Teil wieder auf einen Empfänger, der mit der gleichen Antenne arbeitet wie der Sender. Infolge der Geschwindigkeit des Fahrzeuges sind im Idealfall die ausgehenden und empfangenen Wellen frequenzverschoben entsprechend der Beziehung:

$$\Delta f = 2 f_0 \cos \beta v/c ; \quad c \gg v \quad (3)$$

mit:

- β Anstellwinkel
- c Lichtgeschwindigkeit
- f_0 Frequenz des Radaroszillators
- v Fahrgeschwindigkeit, Relativgeschwindigkeit zwischen Gerät und Boden.

Die auftretende Dopplerfrequenz Δf gibt also ein direktes Maß für die Fahrgeschwindigkeit. Auch bei diesem Meßverfahren treten gerätebedingte Meßfehler auf, die zum einen aus der temperatur- bzw. versorgungsspannungsbedingten Frequenzänderung des Mikrowellenoszillators entstehen, zum anderen können sich Fehler bei der Frequenzmessung oder bei der Weiterverarbeitung der Signale (z.B. Frequenz/Spannungs-Umsetzung) ergeben.

Das Auflösungsvermögen des Meßsystems hinsichtlich des Weges wird durch den Anstellwinkel der Antennen zum Boden und — entscheidender — durch die Frequenz des eingesetzten Mikrowellenoszillators bestimmt. Bei einem Anstellwinkel der Antennen von 45° und einer Radarfrequenz im Bereich von 9 GHz (einer Frequenz, die von der Deutschen Bundespost für Näherungsmelder freigegeben ist) ergibt sich eine Auflösung von ca. 2,5 cm pro Impuls, bei einer Frequenz im Bereich von 24 GHz (einer in handelsüblichen Geräten verwendeten Frequenz) liegt sie bei 1 cm pro Impuls.

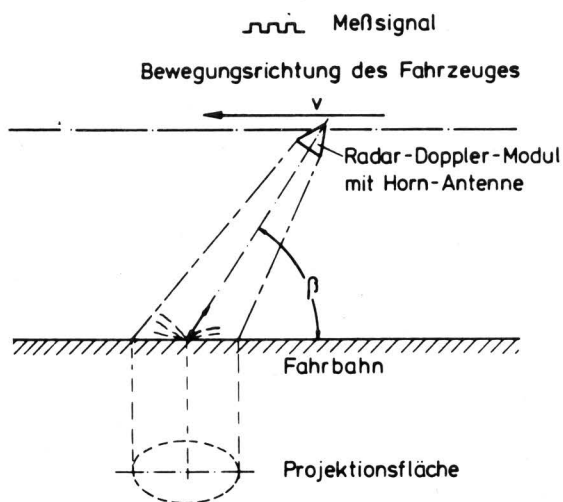


Bild 4. Prinzipskizze für die Geschwindigkeitsmessung mit einem Radar-Doppler-Gerät.

Da sich die hier beschriebenen gerätespezifischen Einflüsse auf Meßfehler durch Auswahl der Bauteile, durch entsprechende Fertigungstoleranzen der Gerätekomponenten usw. eliminieren bzw. kompensieren lassen und die gerätebedingten Einschränkungen nicht einsetzspezifisch sind, soll auf Maßnahmen zu ihrer Überwindung an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

4.2 Einfluß der Fahrbahnen auf die Geschwindigkeitsmessung

Entscheidender und meßtechnisch schwerer zu überwinden sind Meßfehler, die aus den sehr unterschiedlichen Eigenschaften landwirtschaftlicher Fahrbahnen in bezug auf Rauigkeit, Reflexionsvermögen, Festigkeit usw. resultieren. Ein für landwirtschaftliche Zwecke geeignetes Meßverfahren sollte auf allen Fahrbahnen, d.h. auf welligem, pflanzenbestandem Boden, aber auch auf glattem, festem Untergrund (im Extremfall auf nassem Asphalt), reproduzierbare eng tolerierte Meßwerte gleicher Genauigkeit liefern. Infolge der Oberflächenbeschaffenheit und unterschiedlicher Wirkungsmechanismen bei den Meßverfahren treten jedoch Abweichungen in den Meßwerten der Fahrgeschwindigkeit auf.

4.2.1 Ebene Fahrbahnen mit glatter und rauher Oberfläche

Beim Überfahren von Fahrbahnen mit glatter (z.B. nasse oder trockene Asphaltstraßen) oder rauher Oberfläche, wobei unter rauher Oberfläche kurze und flache Oberflächenunebenheiten im Bereich der Radarwellen (bis ca. 30 mm) zu verstehen sind, führt ein hinreichend schwingungsgedämpftes Fahrzeug nur sehr kleine Nick-, Wank- und Rollbewegungen usw. aus, da die Federung durch Reifen bzw. Achsfederung diese Unebenheiten ausgleicht. Mit einem schlupffrei abrollenden Peiselerrad würde auf diesen Fahrbahnen die Fahrgeschwindigkeit mit geringen Fehlern ermittelt.

Beim Radar-Doppler-Verfahren treten jedoch zwei die Messung beeinflussende Umstände auf. Je glatter ein Untergrund ist, umso mehr verschiebt sich das Verhältnis der diffus und total reflektierten Signalanteile hin zur totalen Reflexion. Da jedoch nur von den diffus reflektierten Strahlen ein Teil die Antenne wieder erreicht, verringert sich die Signalamplitude am Dopplermodul. Um eine für die Weiterverarbeitung ausreichende Amplitude zu erreichen, muß in diesen Fällen das Signal entsprechend höher verstärkt bzw. die Impulsauskopplstufe zur Messung der Dopplerfrequenz empfindlicher eingestellt werden. Die Verstärkung bzw. die Empfindlichkeit läßt sich jedoch nur soweit steigern, wie noch ein ausreichendes Signal/Rausch-Verhältnis des Radarmoduls und der nachgeschalteten Verstärker gewährleistet ist. Daher kann das Meßverfahren bei extremen, allerdings für den landwirtschaftlichen Einsatz nicht charakteristischen Fahrbahnsituationen (z.B. vereisten oder sehr nassen Oberflächen) versagen.

Hinzu tritt ein weiterer Effekt, der aus der Geometrie des Sende/Empfangs-Kegels der Radarantenne und der Rauigkeit der reflektierenden Oberfläche resultiert. Das Empfangssignal des Radarmoduls ergibt sich aus der Überlagerung verschiedener von der bestrahlten Oberfläche diffus reflektierter Signalanteile. Bei geringer Oberflächenrauigkeit überwiegen in der Amplitudenverteilung die Signalanteile, die steiler abgestrahlt und wieder empfangen werden [7], Bild 5. Damit wird die Verteilung der auftretenden Frequenzen enger, und der Mittelwert verschiebt sich hin zu niedrigen Werten. Mit zunehmender Rauigkeit der Oberfläche liefern flach abgestrahlte und empfangene Signalanteile ausreichende Signalamplituden, so daß die resultierende Frequenzverteilung breiter ausfällt und sich hin zu höheren Mittelwerten verschiebt.

Ein analoges, anschauliches Beispiel ist die Reflexion eines Scheinwerferstrahls auf glatter bzw. welliger Wasseroberfläche, bei der einmal ein eng begrenztes, zum anderen ein weit aufgefächertes Abbild entsteht.

Entsprechend der Verschiebung der Mittenfrequenzen ändert sich auch das mit dem Radargerät gemessene Geschwindigkeitssignal. Mit Hilfe eng bündelnder Antennen und entsprechend gestalteter Impulsauskoppelstufen lassen sich die hier beschriebenen Einflüsse weitgehend reduzieren, so daß der resultierende Fehler im Bereich von $\pm 2\%$ gehalten werden kann.

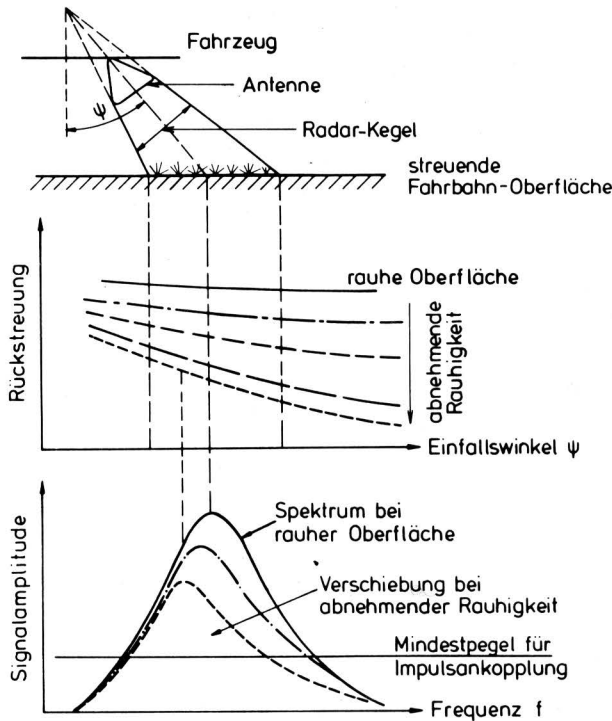


Bild 5. Einfluß der Fahrbahnoberfläche auf das Signalspektrum bei Geschwindigkeitsmessungen mit Radar; nach Hyltin u.a. [7].

4.2.2 Einfluß kurzweiliger Bodenunebenheiten

Andere Wirkungsmechanismen ergeben sich beim Überfahren kurzweiliger Bodenunebenheiten. Darunter sind Bodenwellen zu verstehen mit Amplituden im Bereich von einigen Zentimetern bis Dezimetern und Wellenlängen im Bereich 10–200 cm. Derartige Unebenheiten führen beim Radarmessverfahren zu laufenden Änderungen im Abstand zwischen Meßsystem und Reflexionsfläche und beim Peiselerrad zu schwankenden Fahrwegen, selbst wenn sich das Fahrzeug bei idealisiertem Fahrverhalten mit gleichbleibender Fahrgeschwindigkeit in einer Ebene über der Fahrbahn bewegt. In der Realität rufen die Bodenwellen jedoch zusätzliche Nick-, Wank- und Rollbewegungen des Fahrzeuges hervor, die sich zusätzlich auf die Geschwindigkeitsmessung auswirken.

Für eine qualitative Beschreibung des Verhaltens der beiden Meßverfahren bei den hier betrachteten Fahrbahnverhältnissen genügt es, von den Idealbedingungen auszugehen, bei denen sich das Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit in einer Ebene über der Fahrbahn bewegt. Dies gilt insbesondere bei Fahrbahnen mit stochastisch verteilten Unebenheiten. Ein hinreichend gedämpft gefedertes Fahrzeug, das kein ausgeprägtes Resonanzverhalten zeigt, führt beim Überfahren dieser Fahrbahn stochastische Nick-, Wank- und Rollbewegungen aus. Die Überlagerung der Fahrzeugbewegungen und der Einflüsse, die direkt von der Fahrbahn herrühren, läßt sich in einem Modell zur qualitativen Beschreibung dadurch berücksichtigen, daß eine andere Fahrbahn, die auch die Fahrzeugbewegungen beinhaltet, zugrunde gelegt und das Verhalten des Meßverfahrens bei gleichförmiger Bewegung des Fahrzeuges in der Ebene über dieser Fahrbahn betrachtet wird. Da aus der Überlagerung

wiederum eine Fahrbahn mit stochastisch verteilten Unebenheiten entsteht, kann zur qualitativen Beschreibung auch die ursprüngliche Bahn genommen werden, ohne eine Einschränkung der Allgemeingültigkeit der Aussage befürchten zu müssen.

Um das Verhalten der Meßverfahren unter extremen, im praktischen Einsatz kaum vorkommenden Bedingungen zu untersuchen, werden für das Rechenmodell zwei Fahrbahnen mit sinusförmig verlaufenden Fahrbahnprofilen ($H = H_0 \sin vt$) zugrunde gelegt. Das Verhalten bei realen, stochastischen Fahrbahnen wird mit dem Modell durch das Überfahren der rechten Spur der in ISO 5007 genormten Fahrbahn [25] simuliert. Für das Rechenmodell ist die Fahrbahn als Polygonzug mit äquidistanten Abständen auf der Fahrbahn längsachse von 2 cm (sinusförmige Fahrbahn) bzw. 16 cm (Normfahrbahn) angenähert, womit die Fahrbahn hinreichend genau beschrieben ist.

Das Modell für das Peiselerrad ergibt bei den Fahrbahnen mit unterschiedlichen sinusförmigen Fahrbahnprofilen (Fahrbahn 1: $H_0 = 5$ cm, Fahrbahn 2: $H_0 = 20$ cm) die in Bild 6 dargestellten errechneten Geschwindigkeiten. Da das Laufrad der Oberfläche der Fahrbahn folgt und damit einen größeren Weg als der in der Ebene bewegte angenommene Befestigungspunkt zurücklegt, ergibt sich bei diesem Meßverfahren grundsätzlich eine Erhöhung des Geschwindigkeitsmittelwertes. Es zeigt sich, daß bei der Fahrbahn 1 mit geringer Unebenheitshöhe kaum eine Welligkeit im errechneten Geschwindigkeitssignal v_1 auftritt. Auch der Mittelwert v_1 bleibt nahe an der vorgegebenen Fahrgeschwindigkeit von 1 m/s. Für die Fahrbahn 2 mit vierfach so großer Unebenheitshöhe zeigt sich eine deutliche Welligkeit (mit doppelter Grundfrequenz) im Geschwindigkeitsverlauf v_2 , und der Mittelwert v_2 steigt auf 1,0615 m/s an. Bild 7 zeigt den Verlauf des Geschwindigkeitssignals beim Überfahren der rechten Spur der in ISO 5007 [25] genormten Fahrbahn. Weil in diesem Fall die Amplitude der überlagerten stochastischen Fahrbahnüberhöhungen klein im Verhältnis zum gefahrenen Gesamtweg ist, tritt praktisch keine Erhöhung des Geschwindigkeitsmittelwertes auf.

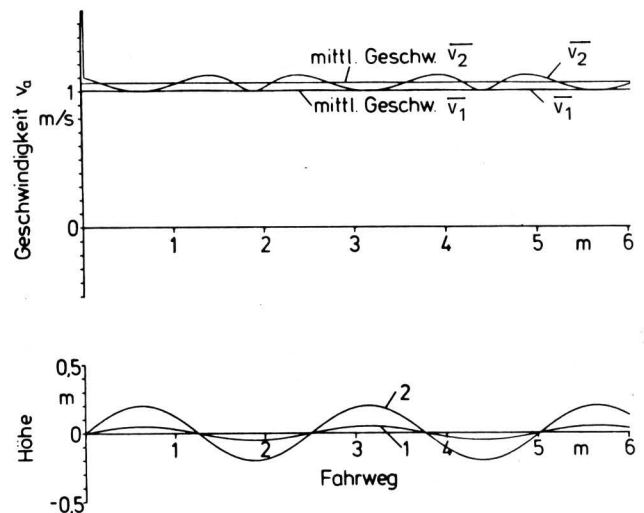


Bild 6. Mit einem Rechenmodell für ein Peiselerrad ermittelter Verlauf der angezeigten Fahrgeschwindigkeit v_a (oben) auf zwei sinusförmigen Fahrbahnen unterschiedlicher Amplitude (Fahrbahnprofil 1: $H_0 = 5$ cm, Fahrbahn 2: $H_0 = 20$ cm).

In Bild 8 und 9 sind die entsprechenden Verläufe für das Modell der Dopplermessung dargestellt. Die Wechselanteile im Geschwindigkeitssignal v_1 bzw. v_2 (einfache Grundfrequenz bei sinusförmiger Fahrbahn) fallen hier deutlich höher aus, jedoch bleibt der Geschwindigkeitsmittelwert $\bar{v}_1 = \bar{v}_2$ solange konstant, wie keine negativen Augenblickswerte im Meßsignal auftreten.

Zu den Ergebnissen des Radarmodells bleibt anzumerken, daß beim realen Meßverfahren, bei dem nicht (wie beim Modell angenommen) eine punktförmige Reflexion des Radarstrahles auftritt, die Amplituden des überlagerten Wechselanteils geringer ausfallen, da sich infolge der Überlagerung vieler Echos von der Reflexionsfläche ein Mittelungseffekt ergibt.

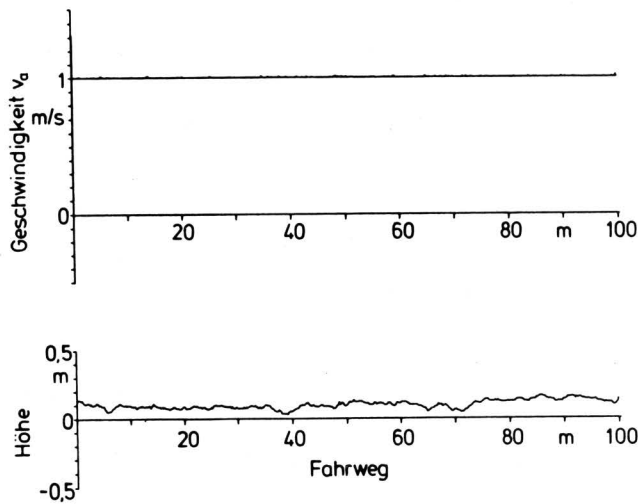


Bild 7. Mit einem Rechenmodell für ein Peiselertrad ermittelter Verlauf der angezeigten Fahrgeschwindigkeit v_a (oben) auf der rechten Spur der nach ISO 5007 genormten Fahrbahn (Fahrbahnprofil unten).

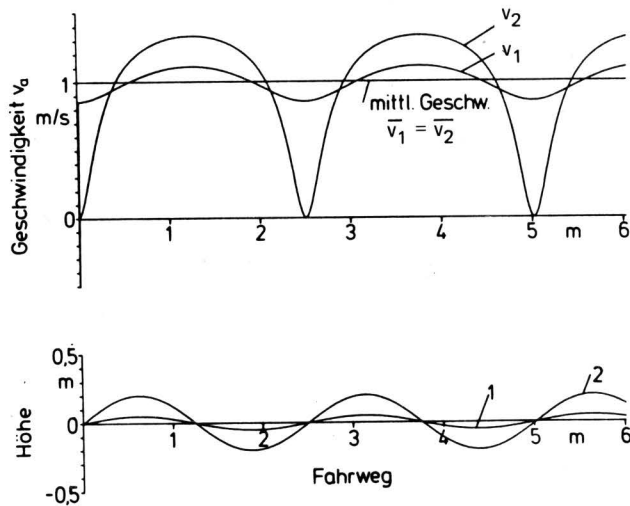


Bild 8. Mit einem Rechenmodell für ein Radarmessgerät ermittelter Verlauf der angezeigten Fahrgeschwindigkeit v_a (oben) auf zwei sinusförmigen Fahrbahnen unterschiedlicher Amplitude (Fahrbahnprofil unten, Fahrbahn 1: $H_0 = 5$ cm, Fahrbahn 2: $H_0 = 20$ cm).

4.2.3 Einfluß langer Bodenwellen

Lange Bodenwellen, worunter Bodenunebenheiten in Fahrtrichtung zu verstehen sind, deren Ausdehnung größer als mehrere Achsabstände ist, wirken sich nicht auf die Meßverfahren aus.

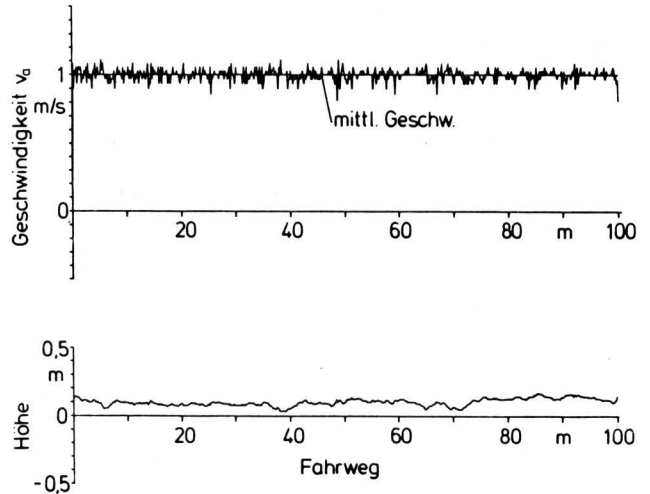


Bild 9. Mit einem Rechenmodell für ein Radarmessgerät ermittelter Verlauf der angezeigten Fahrgeschwindigkeit v_a (oben) auf der rechten Spur der nach ISO 5007 genormten Fahrbahn (Fahrbahnprofil unten).

4.3 Einfluß durch unterschiedliche Achslastverteilungen der Fahrzeuge

Ein weiterer wichtiger Einfluß, die unterschiedliche Achslastverteilung während der verschiedenen Arbeitseinsätze, betrifft vor allem den Ackerschlepper mit seinen verschiedenen Anbaugeräten. Die unterschiedlichen Achslasten führen zu entsprechenden Einfederungen des Fahrzeuges und damit zu unterschiedlichem Anstellwinkel β des fahrzeugfest installierten Meßgerätes gegenüber der Fahrbahn. Da nach Gl. (3) die gemessene Dopplerfrequenz vom Anstellwinkel abhängt, ergeben sich je nach Achslastverteilung entsprechende Änderungen der normierten, d.h. der auf die Dopplerfrequenz für den Soll-Anstellwinkel β_0 bezogenen Dopplerfrequenz $f(\beta)/f(\beta_0)$, Bild 10, wenn das Meßsystem nicht nachkalibriert wird.

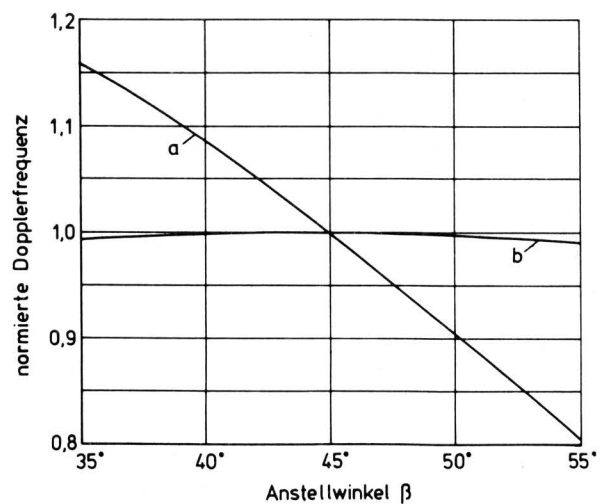


Bild 10. Normierte Dopplerfrequenz (Dopplerfrequenz bezogen auf die Dopplerfrequenz beim Soll-Anstellwinkel $\beta = 45^\circ$) in Abhängigkeit vom Anstellwinkel.

- a Einfachradar
- b Zwillingsradar in "Janus"-Anordnung

Eine Möglichkeit zur Behebung dieser Mängel ist durch die Verwendung zweier Meßsysteme gegeben, die in der in Bild 11 skizzierten "Janus"-Anordnung [1, 3, 8, 26] angebracht werden. Zur Messung der Geschwindigkeit wird der Mittelwert aus der Frequenz beider Systeme

$$f = (f_I + f_{II})/2 = [f(\beta) + f(90 - \beta)]/2 \quad (4)$$

herangezogen. Die normierte Dopplerfrequenz für die Kombination der beiden Meßsysteme $[f(\beta) + f(90 - \beta)]/2 f(\beta_0)$ zeigt für $\beta_0 = 45^\circ$ den in Bild 10 als Kurve b dargestellten Verlauf. Mit entsprechendem Aufwand (2 Systeme) wird somit eine weitgehende Kompensation für den Einfluß des Anstellwinkels erreicht.

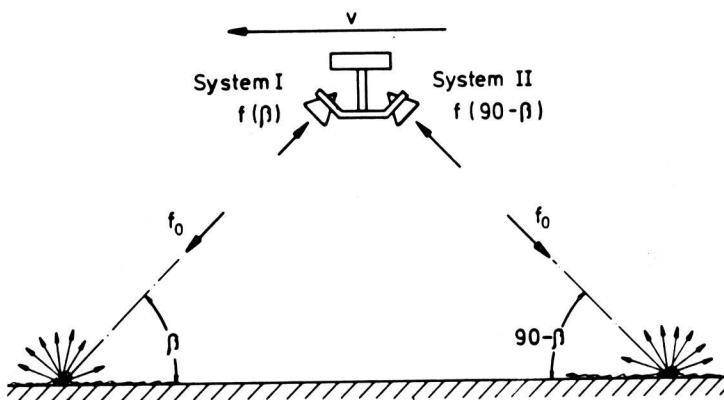


Bild 11. "Janus"-Anordnung zweier Radar-Doppler-Moduln zur Kompensierung von Änderungen des Anstellwinkels.

5. Zusammenfassung (Teil I)

Die Geschwindigkeitsmessung auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen dient nicht nur der Anzeige zur Überwachung von Grenz- und Sollwerten durch den Fahrer, sondern soll insbesondere bei flächenbezogenen Arbeitsprozessen eine Verbesserung der Arbeitsqualität herbeiführen. Für diese Aufgabe sind an die eingesetzten Meßsysteme entsprechende Forderungen hinsichtlich des Meßbereichs, der Meßtoleranz, des Zeitverhaltens und der Handhabung im praktischen Betrieb zu stellen. Die verwendeten Geräte müssen den physikalischen und chemischen Umgebungsbedingungen standhalten.

Im vorliegenden Bericht sind die Aufgaben, meßtechnischen Forderungen und Einsatzbedingungen für die Geschwindigkeitsmeßverfahren abgeleitet bzw. zusammengestellt und das Verhalten eines berührenden Meßverfahrens in Form eines Peisellerrades und eines berührungslosen Verfahrens nach dem Radar-Doppler-Prinzip gegenüber Störeinflüssen näher analysiert.

Inwieweit kommerzielle Geräte und ausgeführte Versuchsmuster die gestellten Forderungen erfüllen, zeigt eine Überprüfung der Meßsysteme im Feldeinsatz. Versuche zu diesem Aufgabenkomplex sind durchgeführt worden, die Ergebnisse werden in einem folgenden Aufsatz vorgestellt.

Schrifttum

- [1] *Jahns, G.:* Geschwindigkeitsmeßverfahren für landwirtschaftliche Zug- und Arbeitsmaschinen. Institutsbericht Ja 10, August 1980.
- [2] *Steinkampf, H.:* Zur Methodik der Rollradien- und Rad-schlupfmessung. Grundl. Landtechnik Bd. 21 (1971) Nr. 2, S. 40/44.
- [3] *Mertins, K.-H. u. H. Göhlich:* Fahrgeschwindigkeitsmessung an landwirtschaftlichen Fahrzeugen. Grundl. Landtechnik Bd. 33 (1983) Nr. 1, S. 14/20.

- [4] *Steinkampf, H.:* Ermittlung von Reifenkennlinien und Gerätezugleistungen für Ackerschlepper. Diss. TU Braunschweig 1974.
- [5] Anonym: Firmenschrift Daimler Benz.
- [6] *Thelen, W. u. A. Neher:* Weg- und Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall-Dopplerverschiebung, vorzugsweise für landwirtschaftliche Fahrzeuge. Grundl. Landtechnik Bd. 35 (1985) Nr. 2, S. 40/42.
- [7] *Hyltin, T.M., T.D. Fuchser, H.B. Tyson u. W.R. Regueiro:* Vehicular radar speedometer. SAE-Paper 730125 (1973).
- [8] *Tsuha, W.K., A.M. McConnell u. P.A. Witt:* Radar ground speed measurement for agricultural vehicles. ASAE-Paper No. 82-55131 (1982).
- [9] *Stuchly, S.S., A. Thansandote, J. Mladec u. J.S. Townsend:* A Doppler radar velocity meter for agricultural tractors. IEEE Transactions on Vehicular Technology Bd. 27 (1978) Nr. 1, S. 24/30.
- [10] N.N.: Radar mit Optik-Tricks – Geschwindigkeits- und Abstandsmessung mit CW-Mikrowellensensor. Elektronik-Zeitung 9. Februar 1981, S. 6.
- [11] *Marganitz, A.:* Mikrowellen-Tachometer mißt berührungslos. – Geschwindigkeitsmessung auch bei Schwebefahrzeugen. Elektronik (1977) Nr. 4, S. 95/98.
- [12] *Finn, W.I.:* Digital signal processing for radar systems. Firmenschrift: TRW LSI-Products, Februar 1979.
- [13] *Meinel, H. u. A. Plattner:* Radartechnik mit Millimeterwellen. Wiss. Ber. AEG-Telefunken Bd. 54 (1981) Nr. 4–5, S. 164.
- [14] *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.
- [15] *Kellermann, F.:* 1 Impuls = 1 Zentimeter. Agrartechnik Bd. 64 (1985) Nr. 11, S. 46.
- [16] *Gfrerer, M.:* Berührungslose Geschwindigkeitsmessung mit Laserlicht. Messen Prüfen/Automatik (1976) Nr. 10, S. 547/52, Nr. 11, S. 676/81, Nr. 12, S. 726/29.
- [17] *Mesch, F., H.-H. Daucher u. R. Fritsche:* Geschwindigkeitsmessungen mit Korrelationsverfahren. Meßtechnik (1971) Nr. 7, S. 152/57 und Nr. 8, S. 163/68.
- [18] *Fritsche, R. u. F. Mesch:* Vergleich von Ortsfrequenzfilterung und Korrelationsverfahren zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung. ACTA IMEKO (1973) B-521, S. 579/89.
- [19] *Delingat, E.:* Berührungslose optische Geschwindigkeits- und Abstandsmessung. Leitz-Mitt. Wiss. u. Techn. Bd. VI (1976) Nr. 7, S. 249/57.
- [20] *Kreutzer, P.:* Theoretische Betrachtungen zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung mit optischen Gittern. Feinwerk- u. Meßtechnik Bd. 83 (1975) Nr. 6, S. 289/94.
- [21] *Young, R.E.:* Automatic guidance of farm vehicles: A Monograph. Agr. Exp. Stat. Auburn Alabama (1976) Departm. Ser. No. 1.
- [22] *Jahns, G.:* Automatic guidance in agricultural – A review. ASAE-Paper No. NCR 83-404 (1983).
- [23] *Renius, K.Th.:* Festlegung der Getriebeabstufung von Ackerschleppern nach Fahrgeschwindigkeitskollektiven. Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 1, S. 7/15.
- [24] *Ehlers, K.:* Das Auto, seine Sensoren und Stellglieder und deren Einbindung ins Bordnetz. Vortrag anlässlich des "Energietechnischen Kolloquiums" 18.6.1985 in Braunschweig.
- [25] ISO/DTR 5007: Agricultural wheeled tractors – Operators seat – Measurement of transmitted vibration. Chicago 1978.
- [26] *Richardson, N.A., R.L. Lanning, K.A. Kopp u. E.J. Carnegie:* True ground speed measurement. ASAE-Paper No. 83-1059 (1983).