

Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [1] *Söhne, W. u. H. Schwanghart*: Stand und Entwicklung von Prüfmethode bei Schlepperumsturzschutzvorrichtungen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 28 (1978) Nr. 5, S. 178/84.
- [2] *Tidbury, G.H.*: The design of bus and truck structures for passenger and crew safety. *Int. J. of Vehicle Design* Bd. 15 (1984) Nr. 1/2, S. 67/85.
- [3] ISO 5700 – Agricultural and forestry wheeled tractors – Protective structures – Static test method and acceptance conditions.
- [4] OECD paper, Safety Cabs and Frames. DAA/T/959, May 1970.
- [5] *Schwanghart, H.*: Der statische Test als Prüfung der Festigkeit von Schlepperumsturzschutzvorrichtungen in der Europäischen Gemeinschaft. *Grundl. Landtechnik* Bd. 28 (1978) Nr. 5, S. 184/89.
- [6] *Rusiński, E.*: Numerische Berechnung von Schlepper-Sicherheitskabinen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 34 (1984) Nr. 6, S. 254/57.
- [7] • *Zienkiewicz, O.C.*: The finite element method in engineering science. London: McGraw-Hill, 1971.
- [8] *Argyris, J.H., D.W. Scharpf u. J.B. Spooner*: Die elastoplastische Berechnung von allgemeinen Tragwerken und Kontinua. *Ingenieur Archiv* Bd. 37 (1969) S. 326/52.
- [9] *Rusiński, E.*: Die elasto-plastische Berechnung von dünnwandigen Rahmen mit der Methode der finiten Elemente. Vorträge zum Problemseminar "FINITE ELEMENTE IV", Graußig 1985, Heft herausgegeben von der TU Dresden.
- [10] *Rusiński, E.*: Die elastoplastische Berechnung von Stabkonstruktionen. Programmsystem PLAS. Bericht der Preprint-Reihe Nr. 007/86 Inst. Konstr. Ekspl. Masz. Politechniki Wrocławskiej.
- [11] *Wrzecioniarz, P. u. E. Rusiński*: The analysis of frame work of sandwich beams by a finite element method. Report Nr. 8507 Cranfield Institute of Technology, Cranfield Impact Centre 1985.
- [12] *Rusiński, E.*: Numerische Voraussagen für Radlader-Sicherheitskabinen. Im Druck.

Untersuchungen zur Messung der Geschwindigkeit fahrender landwirtschaftlicher 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

Die Messung der Fahrgeschwindigkeit und des Fahrweges landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen kann vielseitig z.B. für die Regelung der Arbeitsprozesse und die Ermittlung von Betriebsdaten eingesetzt werden. In dieser Arbeit werden die Ergebnisse vergleichender Versuche mit berührend und berührungslos arbeitenden Geschwindigkeitsmeßverfahren mitgeteilt. Für die verschiedenen Verfahren (Peisellerrad, nichtangetriebenes und angetriebenes Fahrzeugrad, umgerechnete Motordrehzahl, drei unterschiedliche Radar-Doppler-Verfahren) werden die bei unbeschleunigter Fahrt auftretenden Abweichungen der gemessenen Geschwindigkeit vom jeweiligen aus Fahrweg und Fahrzeit ermittelten Referenzwert angegeben. Die Darstellung der Ergebnisse in Form der mittleren auf die Referenzgeschwindigkeit bezogenen Abweichung, der Standardabweichung, der Extremwerte und der auf die Referenzgeschwindigkeit bezogenen Extremwerte gibt die Möglichkeit, die Eignung der verschiedenen Verfahren für unterschiedliche Einsatzzwecke zu beurteilen.

*) *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.*

1. Einleitung

Die exakte Messung der Fahrgeschwindigkeit und des hieraus abgeleiteten Fahrweges landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen gewinnt zunehmende Bedeutung bei dem Bestreben, die Arbeitsverfahren in der Außenwirtschaft in Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit, die Arbeitsqualität und den Schutz der Umwelt zu verbessern. Dabei kann die Geschwindigkeitsmessung verschiedenen Zielen dienen, beispielsweise der reinen Geschwindigkeitsüberwachung aus der Anzeige der Meßwerte (Transportarbeiten) oder der Gewinnung weg- und flächenbezogener Betriebsdaten, die zu einer umfassenden Optimierung des Betriebsmittel- und Geräteeinsatzes (Feldbestellung, Ernte- und Transportarbeiten) eingesetzt werden sollen. In zunehmendem Maße wird die Meßgröße Fahrgeschwindigkeit aber auch direkt zur Regelung des Arbeitsprozesses herangezogen, z.B. zur Schlupfbegrenzung bei schwerer Bodenbearbeitung und zur Erzielung konstanter flächenbezogener Aufwandmengen bei den Verteilprozessen Düngen, Säen und Spritzen. Hier beeinflusst die Geschwindigkeitsmessung unmittelbar Effektivität, Qualität und Erfolg der durchgeführten Arbeiten.

Aus der unterschiedlichen Zielsetzung leiten sich unterschiedliche Anforderungen an die Geschwindigkeitsmeßverfahren her. Nachdem in einem vorangegangenen Aufsatz [1] die Aufgaben, Einsatzbedingungen und meßtechnischen Anforderungen an Fahrgeschwindigkeitsmeßsysteme für landwirtschaftliche Arbeitsmaschinen dargelegt sind, wird im Rahmen dieser Arbeit das meßtechnische Verhalten einer Auswahl berührend und berührungslos arbeitender Meßverfahren untersucht und deren Eignung für die unterschiedlichen Aufgaben geprüft.

Für diese Prüfung ist ein erster Bewertungsmaßstab das Zeitverhalten des Meßsystems bei Geschwindigkeitsänderungen, das z.B. die Größe der kurzzeitigen Abweichungen zwischen Soll- und Istwert von Verteilprozessen beim Anfahren und Anhalten bestimmt.

Ein zweites Kriterium stellt die Abweichung des Mittelwertes der Meßsignale vom Sollwert dar. Diese Größe beschreibt den mittleren Fehler, der z.B. bei geschwindigkeitsgeregelten Verteilarbeiten zu erwarten ist.

Als weitere Kriterien sind für die Größe — bzw. Größe und Häufigkeit — kurzzeitiger Abweichungen des Meßsignals vom Sollwert die auftretenden Extremwerte und die Standardabweichung heranzuziehen. Durch diese Größen werden z.B. bei einem geschwindigkeitsgeregelten Spritzverfahren das Ausmaß und die Verteilung örtlicher Über- bzw. Unterdosierungen beschrieben.

Kurzzeitige Störungen im Meßsignal treten verfahrensbedingt besonders bei berührungslosen Meßverfahren auf. Ihrer Verminderung z.B. bei Radar-Geschwindigkeitsmeßgeräten dient eine mikrorechnergestützte Signalaufbereitung, mit der auch die Ausgangssignale von handelsüblichen Radar-Bewegungsmeldern für die Geschwindigkeitsmessung nutzbar sind.

2. Versuchsanstellung und Meßwertverarbeitung

2.1 Übersicht über die Versuche

Für die vergleichende Untersuchung der Eignung verschiedener Verfahren für die Messung der Fahrgeschwindigkeit landwirtschaftlicher Arbeitsmaschinen entsprechend den zuvor genannten Kriterien wurden sowohl berührende Geschwindigkeitsmeßverfahren (Peiselerrad, nichtangetriebenes und angetriebenes Fahrzeugrad, Ableitung der Fahrgeschwindigkeit aus der Motordrehzahl) wie auch drei berührungslose Geschwindigkeitsmeßverfahren nach dem Doppler-Prinzip mit Mikrowellen (Radar) herangezogen.

Die Auswahl der untersuchten Verfahren geschah dabei nach meßtechnischen und anwendungsspezifischen Gesichtspunkten. So stellt das Peiselerrad das Standard-Meßgerät für die Ermittlung der Fahrgeschwindigkeit bei Versuchen mit Straßenfahrzeugen dar. Es sollte hier überprüft werden, ob dieses Verfahren, das überwiegend auf festen Fahrbahnen eingesetzt wird, auch auf landwirtschaftlichen Fahrbahnen entsprechend genaue Meßergebnisse liefert.

Ein nichtangetriebenes Fahrzeugrad kann, soweit sich der negative Schlupf in Grenzen hält, ähnliche Ergebnisse wie ein Peiselerrad erbringen und wird bei vielen Straßen- und Schienenfahrzeugen eingesetzt. Für die Praxis ergibt sich der Vorteil, daß kein zusätzliches Bauteil (Peiselerrad) erforderlich ist, das sich auch störend auf den Arbeitsablauf auswirken kann.

Für ein angetriebenes Fahrzeugrad ist bei landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen abhängig von der Zugkraft- und Bodenverhältnissen mit wechselndem Schlupf zu rechnen, weshalb es für die Messung der wahren Geschwindigkeit nur bedingt tauglich ist. Neben der wahren Geschwindigkeit ist aber auch die schlupfbehafte (konstruktive) Radumfangsgeschwindigkeit zu ermitteln, wenn z.B. bei schwerer Bodenbearbeitung der Schlupf begrenzt werden soll.

Der Versuchsschlepper, ein Allradschlepper mit gleich großen Rädern, bot die Möglichkeit, bei Abschalten des Allradantriebs vergleichend die Geschwindigkeitsmessung an einem nichtangetriebenen Rad (Vorderrad) und einem angetriebenen Rad (Hinterrad) zu untersuchen.

Die Motordrehzahl ist unter Berücksichtigung der jeweiligen Getriebeübersetzung ebenfalls ein Maß für die Radumfangsgeschwindigkeit an der Antriebsachse. Die Motordrehzahl läßt sich z.B. mit Hilfe einer Zahnriemengetriebenen Drehstromlichtmaschine mit einfachen Mitteln erfassen. Eine solche Messung hat den Vorteil, eine hohe Auflösung in Form vieler Meßimpulse bezogen auf den zurückgelegten Weg zu liefern. Für die praktische Nutzung erweist es sich als Nachteil, daß zusätzlich die gewählte Getriebe- stufe mit erfaßt werden muß.

Durch die gleichzeitige Messung der Motordrehzahl und der Drehzahl jeweils eines Rades einer Achse läßt sich bei Versuchen mit Allradantrieb in Verbindung mit der wahren Geschwindigkeit der Schlupf an allen vier Rädern bestimmen.

Als berührungslos arbeitende Meßverfahren wurden Verfahren nach dem Radar-Doppler-Prinzip verwendet. Radar-Meßsysteme besitzen gegenüber anderen berührungslosen Meßverfahren einige Vorteile (geringe Schmutzempfindlichkeit, geringe Temperaturabhängigkeit, relativ einfache Signalaufbereitung usw.), die einen Einsatz in der Landwirtschaft aussichtsreich erscheinen lassen. Das verwendete handelsübliche Meßgerät arbeitet mit einer Radarfrequenz von 24,125 GHz und ist mit einer optimierten Hornantenne mit Linse versehen, so daß in dieser Hinsicht gute Sende-/Empfangsverhältnisse vorliegen, die auch gute Meßergebnisse erwarten lassen. Die Signalaufbereitung zum Geschwindigkeitsmeßsignal wird mit einem Einchip-Mikrorechner durchgeführt.

Da derartige Geräte noch relativ teuer sind, sollte bei den Untersuchungen auch geklärt werden, ob Eigenbaugeräte auf der Basis von Bewegungsmeldern (Doppler-Prinzip) sich für die Geschwindigkeitsmessung in der Landwirtschaft eignen. Diese Geräte, die eine kleinere Frequenz von 9,350 GHz (die größere Wellenlänge bedingt größere Abmessungen der Sende-/Empfangskegel) benutzen und die mit weniger ausgereiften Antennen (Baugröße, Kosten) ausgestattet sind, arbeiteten im Versuch mit einer an den Einsatzfall angepaßten Signalkonditionierung des vom Radar-Modul gelieferten Doppler-Signals, die mit Hilfe eines Mikrorechners erfolgte.

Eine Zusammenstellung der Verfahren und ihrer wichtigsten Kenn- daten gibt die Tafel 1.¹⁾

Peiselerrad	Meßrad, Rollradius 207,4 mm; 7,675 Hz/(m/s)
Nichtangetr. Rad	Nichtangetriebenes Schleppepperrad (Vorderrad) Rollradius 726 mm; 1,723 Hz/(m/s)
Angetr. Rad	Angetriebenes Schleppepperrad (Hinterrad) Rollradius 726 mm; 1,723 Hz/(m/s)
Motor	Motordrehzahl (Umrechnungskoeffizient vom jeweils benutzten Getriebe abhängig)
Radar 1	Radarmodul SMX 1 mit Hornpyramid-Antenne [2] (Eigenbau) $f_0 = 9,350 \text{ GHz}; \beta = 45^\circ; 44,1072 \text{ Hz/(m/s)}$
Radar 2	Handelsübliches Radarmeßgerät, Meßbereich 0,4–70 km/h $f_0 = 24,125 \text{ GHz}; \beta = 37^\circ; 97,65 \text{ Hz/(m/s)}$
ZW-Radar	2 Radarmoduln SMX 1 mit Hornpyramid-Antenne in "Janus"-Konfiguration (Eigenbau) $f_0 = 9,350 \text{ GHz}; \beta = 52,5^\circ; 37,976 \text{ Hz/(m/s)}$

Tafel 1. Bei den Vergleichsversuchen eingesetzte Meßverfahren.

Bei den Versuchen wurden im Feldeinsatz Meßreihen mit gleichbleibender Geschwindigkeit und bei Beschleunigungsvorgängen (dynamische Fahrbedingungen) aufgenommen und ausgewertet. Bei den Versuchen mit konstanten Fahrgeschwindigkeiten (konstante Motordrehzahl) wurde als Referenzgeschwindigkeit die mittlere Geschwindigkeit herangezogen, die sich aus der jeweiligen ausgemessenen Fahrstrecke und der gemessenen Fahrzeit errechnet. Dabei wurden je nach Fahrgeschwindigkeit Meßstrecken von 50–250 m benutzt.

Die Meßfahrten wurden auf unterschiedlichen Fahrbahnen durchgeführt, so auf nassem und trockenem Asphalt, auf Schotterfahrbahnen, auf ungleichmäßig grasbewachsenen Feldwegen und auf Versuchsfeldern in gepflügtem, bewachsenem und abgeerntetem Zustand.

¹⁾ Außerhalb dieser vergleichenden Untersuchung wurde mit ähnlichen Ergebnissen, wie sie für Radar 1 bzw. ZW-Radar erzielt wurden, ein weiteres Eigenbau-Meßgerät geprüft, das auf dem Radarmodul MDX05 20 mit Planarantenne [3, 4, 5] basiert; $f_0 = 9,350 \text{ GHz}; \beta = 45^\circ; 44,1072 \text{ Hz/(m/s)}$.

Bei den Versuchsfahrten wurden Fahrgeschwindigkeiten im Bereich 1–28 km/h zugrunde gelegt, soweit dies die jeweiligen Fahrbahnen zuließen. Um die Anzahl der Versuche in Grenzen zu halten, wurden Sollfahrgeschwindigkeiten in angenähert geometrischer Stufung gewählt (1, 1,4, 2, 2,8, 4, 5,6, 8 und 10, 14, 20, 28 km/h). Bei den dynamischen Fahrversuchen mit Beschleunigungsvorgängen, die auf festem Untergrund (Asphaltstraße) durchgeführt wurden, stellte der aus der Motordrehzahl errechnete Geschwindigkeitsverlauf das Referenzsignal dar.

Um bei den vergleichenden Messungen für die Radarmeßgeräte möglichst gleiche Versuchsbedingungen zu erreichen (Parallelmessung mit mehreren Systemen) mußte eine Anbauposition am Versuchsfahrzeug gewählt werden, die ausreichend großen Anbauraum für die parallel untersuchten Meßgeräte bot. Daher wurden die Radarmeßgeräte an der Vorderseite des Fahrzeuges angebracht. Diese Befestigungsposition stellt jedoch für den landwirtschaftlichen Einsatz aus arbeits- und meßtechnischen Gründen nicht das Optimum dar. Für den praktischen Einsatz ist ein Anbau zwischen den Achsen des Fahrzeugs vorzuziehen, wobei die Projektionsfläche des Strahles in die von den Rädern erzeugte Spur fallen sollte. Infolge der geringeren Auswirkungen der Nick-, Wank- und Rollbewegungen ist dort mit kleineren Einflüssen auf das Meßverfahren zu rechnen, und die Meßgeräte stören weniger beim Betrieb von Anbaugeräten.

Mechanische Schwingungen (Körperschall usw.) können die Antennen von Radarsensoren zu Schwingungen anregen, die zu Fehlmessungen führen, z.B. in der Form, daß bereits im Stillstand des Fahrzeugs eine Geschwindigkeit angezeigt wird. Das Bild 1 zeigt die von einem Radargerät angezeigte Geschwindigkeit und die Motordrehzahl bei stehendem Fahrzeug für eine fehlangepaßte Aufhängung des Radarsensors. Eine entsprechende schwingungsgedämpfte Aufhängung ist daher unerläßlich. Bei dem gekauften Meßgerät ist die Schwingungsdämpfung integriert.

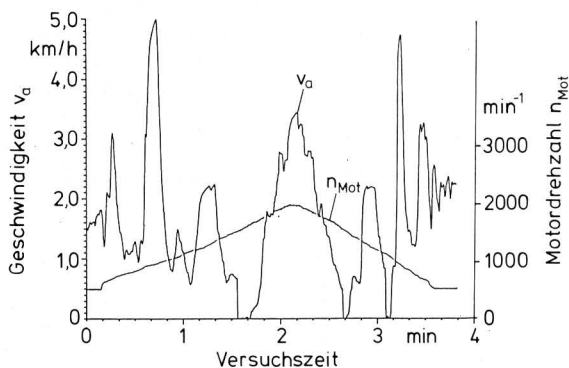


Bild 1. Motordrehzahl und von einem Radargerät (Radar 1) angezeigte Geschwindigkeit; Schlepper im Stand bei laufendem Motor.

Die Versuche wurden ohne Anbaugeräte durchgeführt, d.h. vom Versuchsfahrzeug (MB-Trac 1500) wurden keine Zugkräfte abgefordert, um einen konstanten Geschwindigkeitsverlauf bei den Versuchsfahrten zu ermöglichen. Um systematische Meßfehler auszuschalten, die sich aus dem Anbau der Meßgeräte und weiteren Einflußgrößen (Anstellwinkel, Störung der Sende-/Empfangs-kegel der Radarantennen, Reifendruck usw.) ergeben, wurden vor den Versuchen die einzelnen Meßverfahren bei Fahrten auf Asphaltfahrbahnen kalibriert, so daß sich alle im folgenden dargestellten Ergebnisse auf diese Kalibrierung beziehen. Als Referenzgröße wurde hierfür und bei den nachfolgenden Versuchsfahrten die aus Fahrstrecke und Fahrzeit ermittelte mittlere Geschwindigkeit zugrunde gelegt. Eine Fehlerabschätzung zeigt, daß bei der Bestimmung der Referenzgeschwindigkeiten maximal Fehler von $\pm 0,25\%$ auftreten können. Diese Meßfehler ergeben sich

aus Differenzen bei der Messung der Versuchsstrecke und der Zeitmessung, aus dem Auflösungsvermögen der Zeitmessung und aus Abweichungen der Fahrspur von der geraden Idealspur. Letztere sind aufgrund von Lenkbewegungen, unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten in den beiden Fahrspuren, Spurrillen usw. unvermeidlich.

In Vorversuchen konnte festgestellt werden, daß sich aus der Fahrtrichtung (Vor- oder Rückwärtsfahrt) sowie aus unterschiedlichen Anbauhöhen (soweit sich diese im geforderten Rahmen bewegten) keine signifikanten Unterschiede in den Meßergebnissen herleiten. Aus diesem Grunde ist bei den nachfolgend beschriebenen Versuchen keine Parametervariation in dieser Richtung betrieben worden.

2.2 Konditionierung des Radarsignals

Auch bei konstanter Fahrgeschwindigkeit fällt das Ausgangssignal eines Radar-Doppler-Moduls nicht als konstante Frequenz an, sondern enthält noch zusätzliche Frequenzanteile (Abschn. 4.2.1 in [1]).

Bild 2 zeigt den Originalverlauf eines Dopplersignals für eine Fahrt auf grasbewachsenem Untergrund. Der Geschwindigkeitsverlauf läßt sich aus einem derartigen Signal durch eine statistische Auswertung bestimmen. Dies kann z.B. durch Bildung eines gleitenden Mittelwertes geschehen, der dem Verlauf der Geschwindigkeit folgt. Ein hinreichend geglättetes Meßsignal erhält man jedoch erst mit Zeitkonstanten von über 2 s. Derartig träge Meßsysteme sind aber für Regelungs- und Steuerfunktionen auf landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen nur bedingt geeignet.

Für die Signalverarbeitung im Versuchsbetrieb bieten sich neben Hardwarelösungen z.B. in Form von PLL-Kreisen (Phase-Locked-Loop-Circuits) Softwarelösungen in Verbindung mit Mikrorechnern an. Dazu ist es erforderlich, daß das verwendete Verarbeitungsprogramm zusammen mit dem Mikrorechner ausreichend schnell arbeitet, um eine "On-line"-Verarbeitung der Signale im angestrebten Geschwindigkeitsmeßbereich zu ermöglichen. Aufwendige statistische Auswerteverfahren, wie sie im allgemeinen im wissenschaftlichen Bereich zur Datenverarbeitung Verwendung finden, sind deshalb nicht anwendbar.

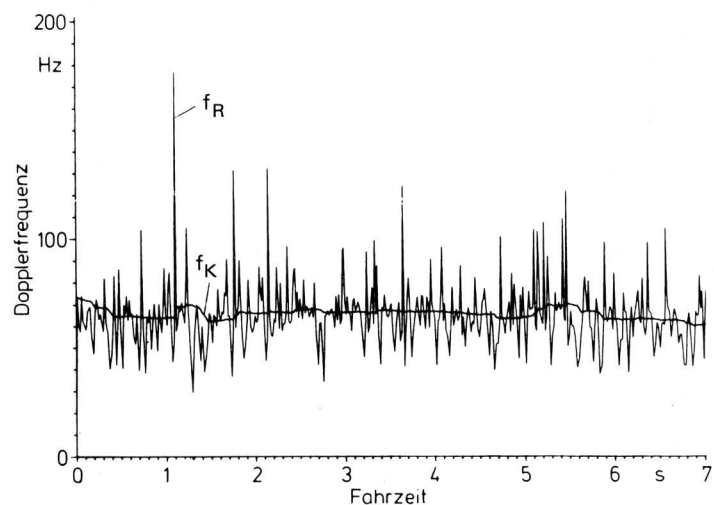


Bild 2. Zeitverläufe des Rohwertes (f_R) und des konditionierten Meßsignals (f_K) eines Radar-Doppler-Moduls bei einer Fahrt über grasbewachsenen Untergrund.

In den von uns benutzten Versuchsmessgeräten kommt ein Rechnerprogramm zum Einsatz, das bei konstanter Fahrgeschwindigkeit aus dem Originalverlauf des Dopplersignals ein hinreichend geglättetes Meßsignal erzeugt, bei Geschwindigkeitsänderungen dem Verlauf dagegen möglichst schnell folgt. Dazu ist es mit drei verketteten Tiefpaßfunktionen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten versehen, deren Zusammenwirken aus dem in Bild 3 dargestellten Nassi-Schneidermann-Diagramm zu erkennen ist. Dieses Programm setzt die Messung der Periodendauer der Dopplerfrequenz voraus, da nur so gewährleistet ist, daß Frequenzänderungen sofort nach jeder Periode erfaßt werden.

Start durch Dopplerimpuls (Interrupt)	
Übernehmen: Periodendauer T	
ja	Periodendauer $T = T_{\max}$? nein
$\bar{f}_3 = 0$	Berechnen $f = 1/T$
$\bar{f}_2 = 0$	ja $ f - \bar{f}_3 /\bar{f}_3 \leq 12,5\%$ nein
$\bar{f}_1 = 0$	Neuen Mittelwert bilden aus f und \bar{f}_3 (Zeitkonstante 2 s)
	ja $ f - \bar{f}_2 /\bar{f}_2 \leq 12,5\%$ nein
	Neuen Mittelwert \bar{f}_2 bilden aus f und \bar{f}_2 (Zeitkonstante 1 s)
	Neuen Mittelwert \bar{f}_1 bilden aus f und \bar{f}_1 (Zeitkonstante 250 ms)
ja	$ \bar{f}_1 - \bar{f}_2 /\bar{f}_2 \leq 12,5\%$ nein
	Neuen Mittelwert \bar{f}_2 bilden aus \bar{f}_1 und \bar{f}_2 (Zeitkonstante $\sim 1/\bar{f}_1$)
ja	$ \bar{f}_2 - \bar{f}_3 /\bar{f}_3 \leq 3\%$ nein
	Neuen Mittelwert \bar{f}_3 bilden aus \bar{f}_2 und \bar{f}_3 (Zeitkonstante $\sim 1/\bar{f}_2$)
	Klassieren: f
Zwischenspeichern: $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \bar{f}_3$	
Stop	

Bild 3. Nassi-Schneidermann-Diagramm eines Programmes zur Konditionierung der Meßsignale eines Radar-Doppler-Moduls.

Durch den einlaufenden Doppler-Impuls wird das Programm gestartet und die Periodendauer von der Impulsanpassungsbaugruppe des Meßrechners (Bild 4) übernommen. Diese Periodendauer wird hinsichtlich eines Maximalwertes ($T \geq T_{\max} = 1$ s) überwacht. Beim Erreichen des Grenzwertes, d.h. wenn die Frequenz des Meßsignals kleiner als 1 Hz ist, wird angenommen, daß die Geschwindigkeit gleich null ist. In diesem Fall erfolgt keine Verrechnung, sondern die Mittelwerte der drei Tiefpaßfunktionen \bar{f}_1, \bar{f}_2 und \bar{f}_3 werden gleich null gesetzt und zwischengespeichert. Andernfalls erfolgt die Umrechnung der Periodendauer T in die

zugehörige Meßfrequenz f , wobei zur Verringerung der Rechenzeit eine Tabellenfunktion Verwendung findet. Es folgt die Überprüfung des aktuellen Meßwertes hinsichtlich eines Toleranzfensters von $\pm 12,5\%$ um den bisher gefundenen Mittelwert \bar{f}_3 des Ausgangstiefpasses. Liegt die Frequenz innerhalb des Bereiches, so wird der Meßwert f mit dem bisherigen Mittelwert \bar{f}_3 zum neuen fortlaufenden Mittelwert mit einer Zeitkonstanten von 2 s verrechnet. Andernfalls erfolgt keine Verarbeitung für diese Tiefpaßfunktion.

In entsprechender Weise schließt sich die Bearbeitung des zweiten Tiefpasses (Mittelwert \bar{f}_2) an, wobei hier eine Zeitkonstante von 1 s zugrunde gelegt wird. Anschließend erfolgt in jedem Fall eine weitere fortlaufende Mittelwertberechnung (\bar{f}_1) mit einer Zeitkonstanten von 250 ms, bei der alle Meßfrequenzen ohne Kontrolle eines Toleranzbereiches verrechnet werden.

Da die langsamen Tiefpaßfunktionen (\bar{f}_2 und \bar{f}_3) abrupten Geschwindigkeitsänderungen nicht hinreichend schnell oder überhaupt nicht (Toleranzfenster von $\pm 12,5\%$) folgen können, schließt sich eine bedingte Korrekturberechnung an.

Dazu wird zuerst überprüft, ob sich die Mittelwerte \bar{f}_1 und \bar{f}_2 um weniger als 12,5 % (bezogen auf \bar{f}_2) unterscheiden. Ist das nicht der Fall, so wird ein neuer Mittelwert \bar{f}_2 aus dem Mittelwert \bar{f}_1 und dem bisherigen Wert \bar{f}_2 derart gebildet, daß 1/8 der Differenz zu \bar{f}_2 addiert wird. Dadurch ergibt sich bei stark veränderlichen Eingangssignalen eine Mittelungszeit, die mit steigender Frequenz kleiner wird ($\tau \sim 1/f$). Andernfalls erfolgt keine Korrektur von \bar{f}_2 . Anschließend wird kontrolliert, ob sich die Mittelwerte \bar{f}_2 und \bar{f}_3 um mehr als 3 % (bezogen auf \bar{f}_3) unterscheiden. Ist die Differenz größer, so wird wie zuvor bei \bar{f}_2 verfahren. Andernfalls erfolgt keine Korrektur. Das Ergebnis, das das beschriebene Verarbeitungsprogramm aus den Dopplersignalen errechnet, ist als starke Linie in Bild 2 zu sehen.

Das hier kurz beschriebene Assemblerprogramm [6, 7], das auf einem Mikrorechner (8085) implementiert wurde, erlaubt die "On-line"-Verarbeitung von Frequenzen bis zu 500 Hz. Das entspricht bei den verwendeten Radarmeßgeräten einem Geschwindigkeitsmeßbereich bis ca. 40 km/h. Für höhere Frequenzen aufgrund eines erweiterten Meßbereichs oder bei Verwendung von Radar-Moduln mit höherer Radar-Frequenz sind modifizierte Rechenalgorithmen einzusetzen. Diese können z.B. so angelegt sein, daß die gemessenen Periodendauern der Dopplerfrequenz als Stichproben in äquidistanten Zeitabständen (z.B. 10 ms) verarbeitet werden.

2.3 Meßwerterfassung und -speicherung

Bei den einzelnen Versuchen wurden zuvor ausgemessene und mit Markierungsbändern gekennzeichnete Meßstrecken durchfahren. Die jeweilige Fahrzeit wurde mit einer Stoppuhr gemessen und zusätzlich von dem nachfolgend beschriebenen Meßrechner, Bild 4, erfaßt. Meßstrecke, Meßzeit und Getriebeübersetzung wurden in einem Protokoll zusammen mit Notizen über Fahrbahn, Motordrehzahl, Sollfahrgeschwindigkeit, Datum und Uhrzeit für die spätere Auswertung festgehalten.

Die eigentlichen Meßgrößen liegen in Form von Impulsen vor, deren Periodendauern ein Maß für die Dopplerfrequenzen und Drehzahlen ergeben. Diese Impulse werden von den verschiedenen eingesetzten Meßgeräten, den Radarmoduln und nachgeschalteten Anpassungsverstärkern, dem handelsüblichen Radarmeßgerät, den induktiven Impulsaufnehmern an den Rädern und der Zahnriemgetriebenen Drehstromlichtmaschine des Fahrzeugmotors, geliefert. Als Bindeglied zwischen diesen Impulsgebern und dem nachgeschalteten Meßrechner dient eine Impulsanpassungsbaugruppe, die es erlaubt, die Periodendauern von 5 Impulskanälen parallel zu erfassen.

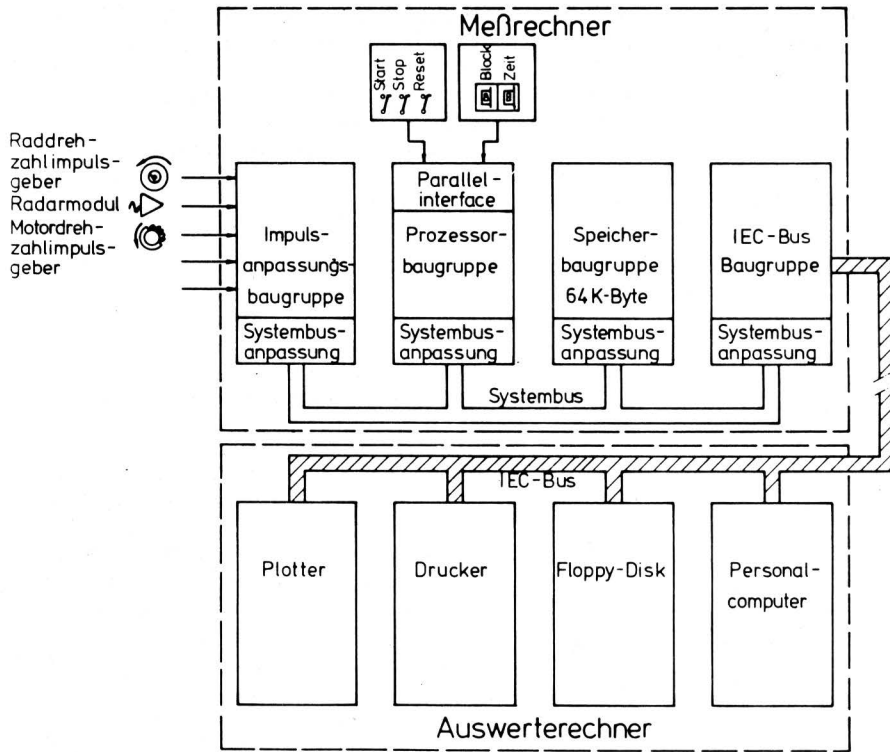


Bild 4. Blockschaltbild des Meßrechners und des Personalcomputers zur Erfassung und Auswertung der Geschwindigkeitsmeßwerte.

In **Bild 5** ist ein Kanal dieser Anpassung gezeigt, deren entscheidender Vorzug es ist, die Periodendauer fortlaufend ohne Unterbrechung und Verlust von Impulsen messen zu können. Als Zeitinkremente stehen $15,625 \mu\text{s}$ ($64000 \text{ Digital-einheiten (DE)} = 1 \text{ s}$) und $156,25 \mu\text{s}$ ($6400 \text{ DE} = 1 \text{ s}$) zur Verfügung, und damit können Meßbereiche von 1–500 Hz bzw. 0,1–50 Hz erfaßt werden. Der Rechner wandelt diese Periodendauern in Frequenzen um. Die Signale der Radarmoduln werden dabei entsprechend der in Abschn. 2.2 geschilderten Strategie verrechnet. Parallel lassen sich die unbehandelten Daten der ersten beiden Kanäle, die für Radarmessungen vorgesehen sind, klassieren.

Während des Meßvorganges klassiert der Rechner alle einlaufenden Meßwerte der ersten beiden Kanäle. Daneben werden die verrechneten Meßwerte der fünf Meßkanäle in vorwählbaren Meßzeitintervallen (2, 4, 8, . . . , 1024 ms) abgetastet und im Arbeitsspeicher (64 Kbyte) abgelegt. Dabei lassen sich Daten für vier bis fünf Meßfahrten hinterlegen. Für die Abspeicherung der Daten dieser Einzelversuche können bis zu 8 Speicherblöcke verwendet werden. Zusätzlich wird die Versuchszeit gemessen und gespeichert. Die Vorwahl der Meßintervalle und Speicherblöcke sowie die Steuerung des Meßvorgangs erfolgt mit Hilfe von Codierschaltern und Tastern, die über ein Parallelinterface an den Mikrorechner angeschaltet sind.

Der eingesetzte Meßrechner ist modular aus mehreren Baugruppen von Europakartengröße aufgebaut und läßt sich daher in der Hardware leicht modifizieren und damit den sich ändernden Versuchsbedingungen anpassen. Für den mobilen Einsatz auf dem Versuchsfahrzeug wird er vom 12 V-Bordnetz versorgt.

Nach 4 bis 5 Versuchsfahrten ist der Meßrechner über die eingebaute IEC-Bus-Baugruppe an einen Personalcomputer anzuschalten. Im Dialog mit dem Anwender lassen sich Versuchskennungen, Umrechnungskoeffizienten für die Meßfrequenzen sowie weitere Parameter über diesen PC vorgeben. Diese Daten werden zusammen mit den im Meßrechner gespeicherten Meßwerten auf dem Massenspeicher (Floppy-Disk) des PC hinterlegt. Durch die direkte Kopplung des Meßrechners mit einem handelsüblichen PC bestehen für die weitere Verarbeitung der Versuchsdaten praktisch keine Beschränkungen. Das gilt sowohl hinsichtlich des verfügbaren Speicherplatzes als auch hinsichtlich der Auswertung bzw. sofortigen Überprüfung der Daten.

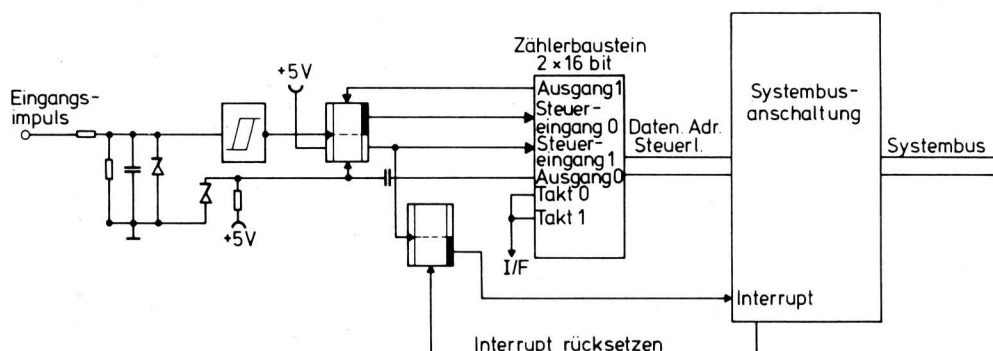


Bild 5. Auszug aus dem Stromlaufplan der in Bild 4 enthaltenen Impulsanpassungsbaugruppe für einen Meßkanal.

2.4 Meßwertverarbeitung und -auswertung

Die Auswertung der Versuche und die Darstellung der gewonnenen Meßwerte erfolgte mit Hilfe des Personalcomputers und seiner angeschalteten Peripheriegeräte wie Drucker und Plotter. Ein für diese Versuche entwickeltes Programmpaket gestattet die Verarbeitung der Meßwerte nach unterschiedlichen Gesichtspunkten und in verschiedenen Darstellungsformen.

Ziel der Auswertung und Meßwertverarbeitung ist es dabei, die gewonnenen Meßdaten so weit zu verdichten, daß sie für alle Meßverfahren und Fahrbahnen wenige vergleichbare Merkmale liefern, die die untersuchten Meßverfahren aber noch hinreichend beschreiben. Die Angabe einer einzelnen Maßzahl genügt nicht. So reicht z.B. der aus den Mittelwerten der Geschwindigkeitsmessungen gewonnene Meßfehler allein für eine Beurteilung der Meßverfahren nicht aus.

Die Ausgangsinformation für alle Auswertungen ist grundsätzlich der zeitliche Verlauf der Rohmeßwerte. Bei den berührenden Meßverfahren (Peiselerrad, Fahrzeugräder, Motor) gibt schon dessen graphische Darstellung den gemessenen Geschwindigkeitsverlauf mit seinen Abweichungen vom Referenzsignal anschaulich wieder; die Kurven für die verschiedenen Versuchsfahrten und Meßverfahren lassen sich unmittelbar vergleichen. Um die Radarmeßsignale in ähnlicher Form beurteilen zu können, sind sie z.B. in der in Abschn. 2.2 dargestellten Art zu konditionieren. Aussagen über die Verteilung der auftretenden Dopplerfrequenzen ergeben sich aus den klassierten Daten der Rohmeßwerte. Die daraus gewonnenen und graphisch dargestellten Frequenzverteilungen sind für einen Vergleich geeignet und lassen sich weiter zum Mittelwert, der Standardabweichung und zu den auftretenden Extremwerten verdichten. Alle Informationen über den zeitlichen Verlauf gehen aber mit der Klassierung verloren.

Die mittlere Fahrgeschwindigkeit wird aus den Zeitreihen der Geschwindigkeitsmessung bestimmt mit:

$$\bar{v} = 1/m \sum_{i=1}^m v_i \quad (1)$$

Aus ihr läßt sich der auf die Referenzgeschwindigkeit bezogene mittlere Fehler ableiten:

$$F_r = 100 (\bar{v} - v_r) / v_r \% = 100 (\bar{v} - v_r) / v_r \% \quad (2)$$

Dieser Meßfehler ist ein Maß für die Abweichungen, mit denen bei der Wegmessung durch Integration der Geschwindigkeitssignale zu rechnen ist, z.B. wenn auf diese Weise weg- und flächenbezogene Betriebsdaten (Abschn. 3.1.2 in [1]) ermittelt werden.

Da, wie bereits dargelegt (Abschn. 4.2.2 in [1]), die verschiedenen Meßverfahren selbst bei konstanter Geschwindigkeit des Fahrzeuges um den Mittelwert schwankende Meßsignale liefern, deren Schwankungsbreite aus dem Mittelwert der Fahrgeschwindigkeit (Gl. (1)) bzw. aus dem Meßfehler nach Gl. (2) nicht zu ersehen ist, wird als Maß für die Streuung die Standardabweichung:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{m-1} \left(\sum_{i=1}^m v_i^2 - m\bar{v}^2 \right)} \quad (3)$$

gebildet.

Ergänzend werden die Extremwerte des jeweiligen Geschwindigkeitssignals (Extrema $(v - v_r)$) ausgegeben. Bezieht man diese auf die Referenzgeschwindigkeit, so liefert die bezogene Größe, Extrema $((v - v_r) / v_r)$ bzw. die auf die Referenzgeschwindigkeit bezogene Standardabweichung, z.B. bei geschwindigkeitsgeregelten Verteilgeräten (Spritzen usw.) ein Maß dafür, mit welchen maximalen bzw. mittleren Verteilungsschwankungen zu rechnen ist, wenn die entsprechende Regelung der Geräte verzögerungsfrei erfolgen würde.

Kennwerte über das zeitlich dynamische Verhalten lassen sich einmal aus den Sprungantworten der Algorithmen für die Signalkonditionierung bei sprunghaften Änderungen der Eingangsfrequenz bestimmen. Eine andere Möglichkeit besteht in der Auswertung von Fahrversuchen mit Beschleunigungsvorgängen. Das Zeitverhalten des Meßsystems bestimmt die kurzzeitigen Soll-/Istwert-Abweichungen von geschwindigkeitsgeregelten Verteilgeräten bei Änderungen der Fahrgeschwindigkeit, wie theoretisch zuvor abgeleitet (Abschn. 3.3 in [1]).

3. Versuchsergebnisse

3.1 Zeitverhalten der Meßverfahren

Die Raddrehzahlen und Dopplerfrequenzen werden diskontinuierlich in Form von Periodendauern Δt zwischen zwei Impulsen gemessen. Diese diskontinuierliche Messung wirkt sich auf das Zeitverhalten der Meßverfahren aus. Bei den berührenden Verfahren muß vom Fahrzeug eine bestimmte Wegstrecke Δs (Weginkrement) zurückgelegt werden, bevor von den eingesetzten Winkelinkrementgebern der nächste Impuls erzeugt wird. Die Größe des Weginkrements ergibt sich aus der Teilung, d.h. der Anzahl n von Impulsen für eine volle Radumdrehung, und aus dem Rollradius r zu:

$$\Delta s = 2 \pi r / n \quad (4a)$$

Bei den Radarmessungen entspricht der Abstand zweier Impulse einer vollen Periode des Dopplersignals. Das zugehörige Weginkrement berechnet sich aus der Dopplerfrequenz Δf und der Geschwindigkeit v zu:

$$\Delta s = v / \Delta f \quad (4b)$$

Erst nach dem Durchfahren eines Weginkrements läßt sich aus der zugehörigen Periodendauer Δt_i eine für diesen Zeitraum geltende mittlere Geschwindigkeit v_i bestimmen zu:

$$\bar{v}_i = \Delta s / \Delta t_i \quad (5)$$

Damit läßt sich aber erstens keine Aussage über den (tatsächlichen) Geschwindigkeitsverlauf zwischen zwei Impulsen machen, und zweitens kann die mittlere Geschwindigkeit erst zeitverzögert bestimmt werden. Da die Periodendauer umgekehrt proportional zur Geschwindigkeit ist ($\Delta t_i = \Delta s / v_i$), ergibt sich besonders bei kleinen Geschwindigkeiten ein deutlicher Einfluß auf das Zeitverhalten der Messung. Dies ist eine grundsätzliche Eigenschaft diskreter Meßverfahren mit Periodendauermessung.

Um die früher abgeleitete Forderung (Tafel 1 in [1]) hinsichtlich der maximalen Zeitkonstanten ($\tau \leq 200$ ms) auch an der Meßbereichsuntergrenze (1 km/h) zu erfüllen, sind Weginkremente $\leq 0,1$ m (≥ 10 Impulse/m) einzuhalten²⁾. Diese Bedingung läßt sich bei berührenden Meßverfahren stets dadurch erfüllen, daß die Winkelinkremente klein genug im Verhältnis zum Rollradius gewählt werden. Bei Radarmeßgeräten ist die Zahl der Impulse pro Wegstrecke hauptsächlich abhängig von der Frequenz des eingesetzten Radarschalters. Die verwendeten Geräte liefern bei einer Geschwindigkeit von 1 m/s bereits ca. 40 bzw. 100 Impulse je Sekunde (Weginkremente 2,5 bzw. 1 cm). Daraus ergeben sich für die Meßbereichsuntergrenze von 1 km/h Periodendauern von 90 bzw. 36 ms, die das Zeitverhalten des Meßverfahrens nur unwesentlich beeinflussen.

²⁾ Eine engere Forderung für die Weginkremente leitet sich für Meßverfahren, bei denen die Eingangsimpulse direkt das Ausgangssignal liefern, aus dem Auflösungsvermögen von 0,036 km/h ab. Danach sind Inkremente ≤ 1 cm (≥ 100 Impulse/m) erforderlich.

Ist die Teilung der Winkelinkrementgeber bei den berührenden Meßverfahren hinreichend exakt, so braucht eine zeitliche Mittelung des Meßsignals nicht vorgenommen zu werden, so daß hier die gestellten Forderungen hinsichtlich Meßbereich und Zeitkonstante leicht erfüllt werden können. Bei den Radarmeßverfahren sind zur Konditionierung der Meßsignale mehrere Periodendauern zu verrechnen, so daß sich hieraus größere Verzögerungszeiten der Meßwertbestimmung ergeben. Bei den handelsüblichen Meßgeräten (Radar 2) konnte die vom Hersteller angegebene Zeitkonstante $\tau \leq 200$ ms bestätigt werden.

Die Zeitkonstanten der Eigenbaugeräte lassen sich aus dem in Bild 6 gezeigten Antwortverhalten des Algorithmus bei sprunghafter Änderung der Eingangsfrequenz bestimmen zu $\tau = 450$ ms. Da mit einem realen Fahrzeug keine sprunghafte Änderung möglich ist, wurde der in Bild 6 wiedergegebene Signalverlauf dadurch erzeugt, daß bei einem anstehenden Geschwindigkeitssignal zum Zeitpunkt $t = 0$ die Signalkonditionierung gestartet wurde.

Das Verhalten der Eigenbaugeräte bei realen Beschleunigungsvorgängen zeigt Bild 7. Abweichungen gegenüber dem errechneten Verlauf der Arbeitsgüte (Abschnitt 3.3, Bild 3 in [1]) sind hauptsächlich auf den Schlupf der Antriebsräder beim Beschleunigen zurückzuführen.

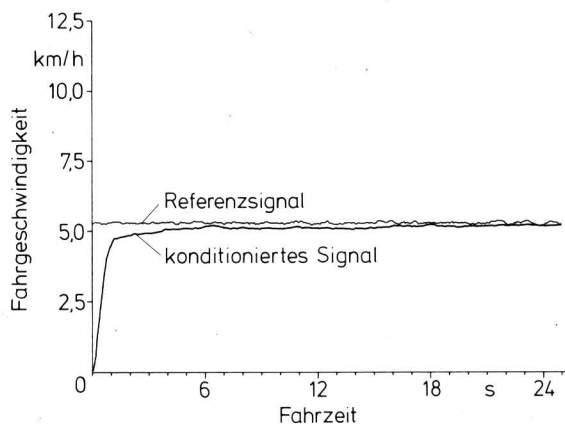


Bild 6. Verlauf des Ausgangssignals (konditionierten Signals) bei sprunghafter Änderung der Eingangsfrequenz für den Algorithmus zur Konditionierung des Radar-Signals.

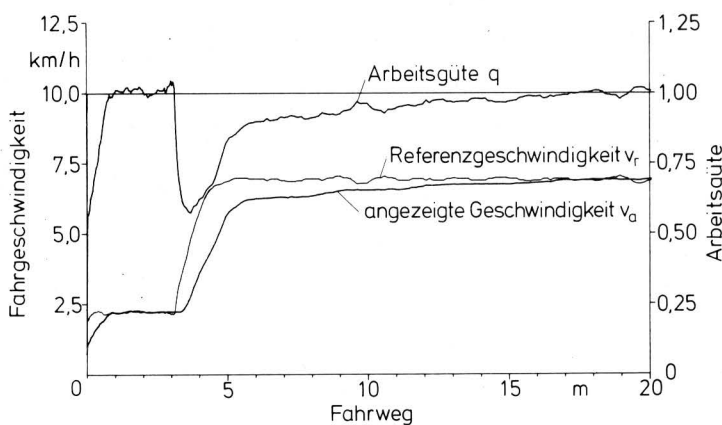


Bild 7. Verlauf von Referenzgeschwindigkeit, angezeigter Geschwindigkeit und Arbeitsgüte ($q = v_a/v_r$) bei einem Beschleunigungsvorgang; Referenzgeschwindigkeit v_r aus der umgerechneten Motordrehzahl, angezeigte Geschwindigkeit v_a von Radar 1.

3.2 Frequenzverteilung der Radarsignale

Den Einfluß unterschiedlicher Fahrbahnen auf die Frequenzspektren der Dopplersignale zeigen die in Bild 8 wiedergegebenen Verteilungen der klassierten Daten für das Einzelradar (Radar 1). Bei identischen Referenzgeschwindigkeiten verschiebt sich der Mittelwert von 170,42 Hz auf der "glatten" Asphaltfahrbahn zu 171,57 Hz auf dem "rauhem" grasbewachsenen Feldweg, wie nach den früher gemachten Aussagen (Abschn. 4.2.1 in [1]) zu erwarten war. Deutlicher ist der Fahrbahneinfluß aus den im Bild angegebenen unterschiedlichen Standardabweichungen zu erkennen.

Für das Radargerät mit 2 Systemen in "Janus"-Anordnung (ZW-Radar) ergibt sich eine deutlichere Abweichung in den mittleren Frequenzen, Bild 9, was von einer nicht so stark bündelnden Antenne herrührt. In den Standardabweichungen ist hier der Unterschied nicht so deutlich zu erkennen.

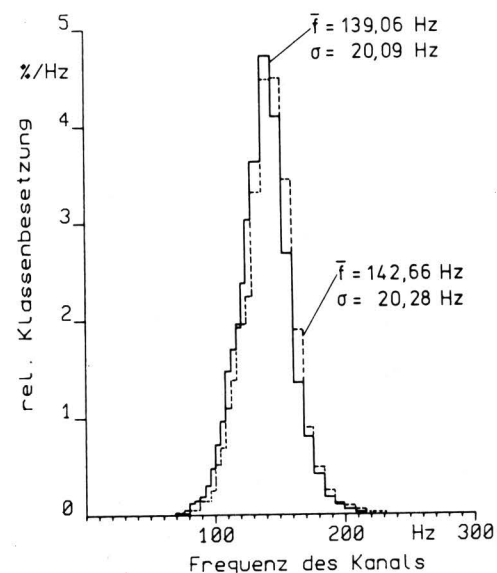
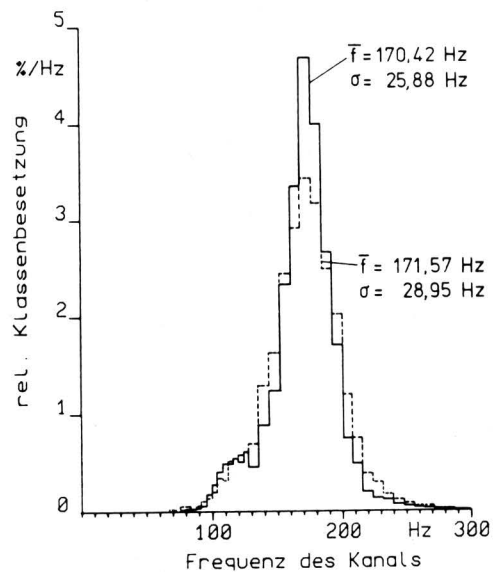


Bild 8 und 9. Relative Klassenbesetzungen der Frequenzverteilung bei der Geschwindigkeitsmessung mittels Radar auf verschiedenem Untergrund; Bild 8: Einfach-Radargerät (Radar 1), Bild 9: Zweifach-Radar in "Janus"-Anordnung (ZW-Radar).

— Asphaltfahrbahn
 --- grasbewachsener Feldweg

Bei einem Vergleich der Verteilungen des Einzelradars und des ZW-Radars ist zu berücksichtigen, daß durch Zusammenfassen der beiden Dopplerfrequenzen zu einem Mittelwert aus statistischen Gründen eine engere Verteilung entsteht als bei einer reinen additiven Überlagerung der Einzelverteilungen. Daher liefert das Gerät mit 2 Systemen trotz ungünstigerer Antennen eine geringere Streuung als das Einzelradar.

3.3 Zeitreihen, Extremwerte, Standardabweichung und rel. Meßfehler

3.3.1 Diskussion der Zeitreihen

In Bild 10 bis 16 sind exemplarisch die gemessenen zeitlichen Verläufe der mit den verschiedenen Meßverfahren gewonnenen Geschwindigkeitssignale gezeigt. Aus den Kurven lassen sich anschaulich einige Charakteristika erkennen, die auf die Meßverfahren und

die unterschiedlichen Fahrbahnen zurückzuführen sind. Die berührenden Verfahren (Bild 10 bis 13) liefern auf allen Fahrbahnen relativ ruhige Meßsignale, deren Mittelwerte beim Peiselerrad (Bild 10) und beim nichtangetriebenen Rad (Bild 11) nahezu mit der eingezeichneten Referenzgeschwindigkeit übereinstimmen bzw. geringfügig kleinere Werte liefern. Beim angetriebenen Rad (Bild 12) und bei der Motordrehzahl (Bild 13) wirkt sich je nach Fahrbahn Schlupf in unterschiedlicher Höhe in einer positiven Abweichung der angezeigten mittleren Geschwindigkeit aus.

In den Signalen der Radarmessgeräte (Bild 14 bis 16) ist das Geschwindigkeitssignal von stochastischen Störanteilen überlagert, wobei die Amplitude der Störungen in Abhängigkeit von den Fahrbahneigenschaften variiert. Dieses "Rauschen" zeigt sich besonders beim handelsüblichen Radargerät (Radar 2, Bild 15). Bei den Eigenbaugeräten (Radar 1, Bild 14, und ZW-Radar, Bild 16) wird das Rauschen mit Hilfe der Signalkonditionierung erheblich reduziert.

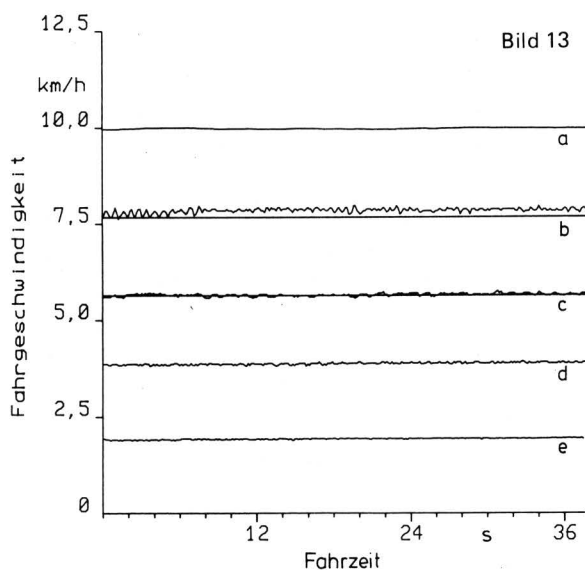
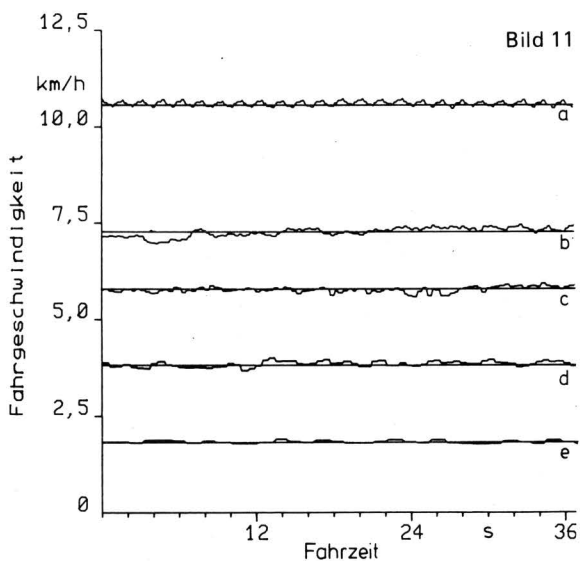
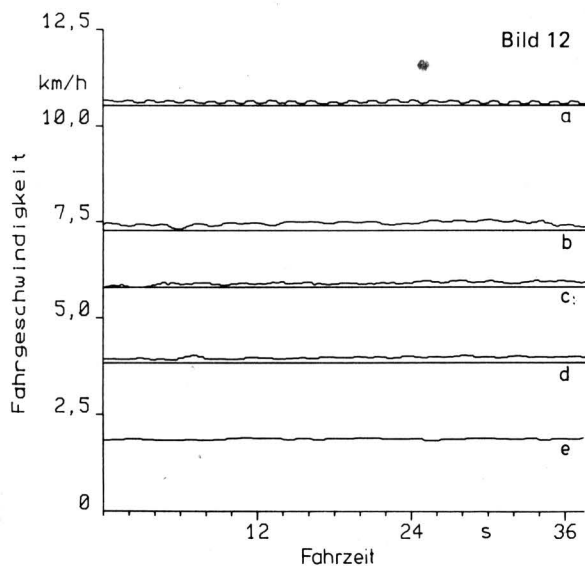
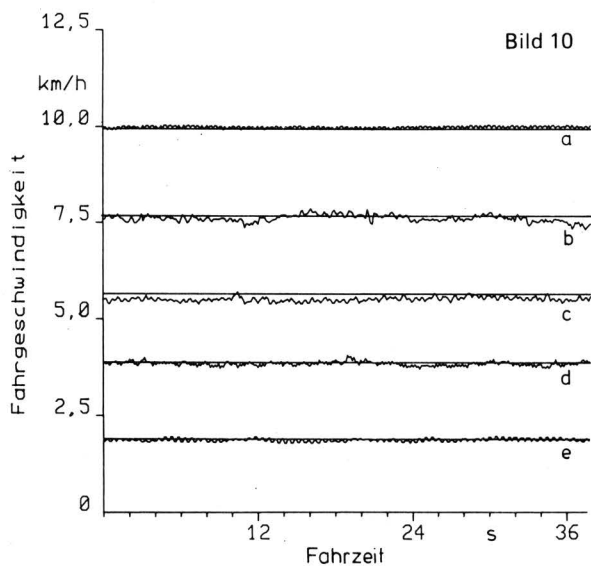


Bild 10 bis 13. Gemessener Geschwindigkeitsverlauf für die berührenden Meßverfahren auf drei verschiedenen Fahrbahnen; Geraden geben die Referenzgeschwindigkeiten an.

Bild 10: Peiselerrad

Bild 11: nichtangetriebenes Rad

Bild 12: angetriebenes Rad

Bild 13: umgerechnete Motordrehzahl

a Asphaltfahrbahn

b und d Versuchsfeld gepflügt

c und e grasbewachsener Feldweg

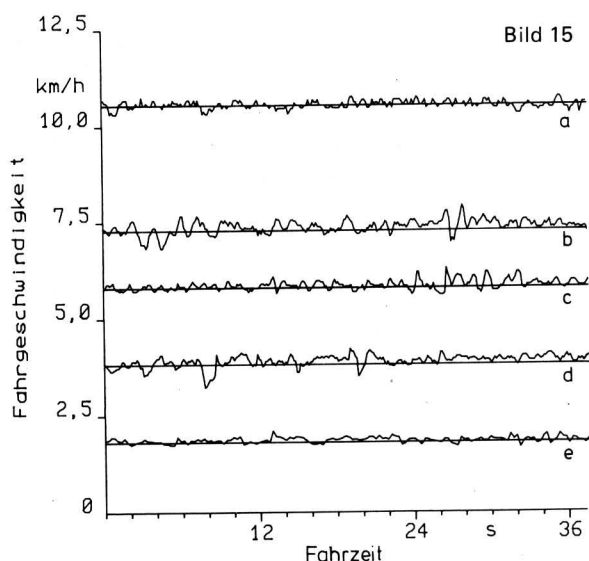
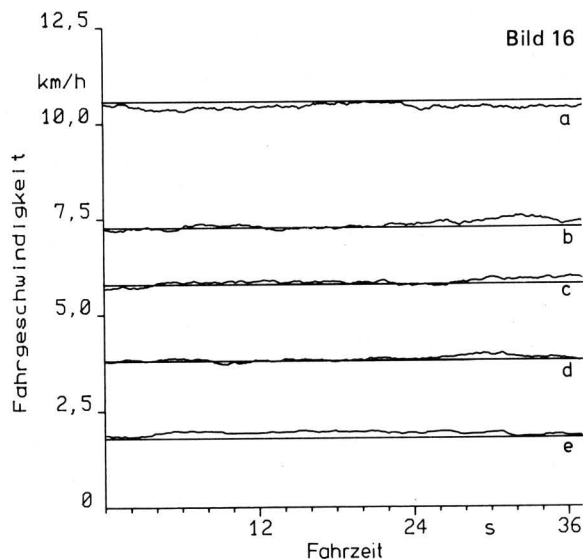
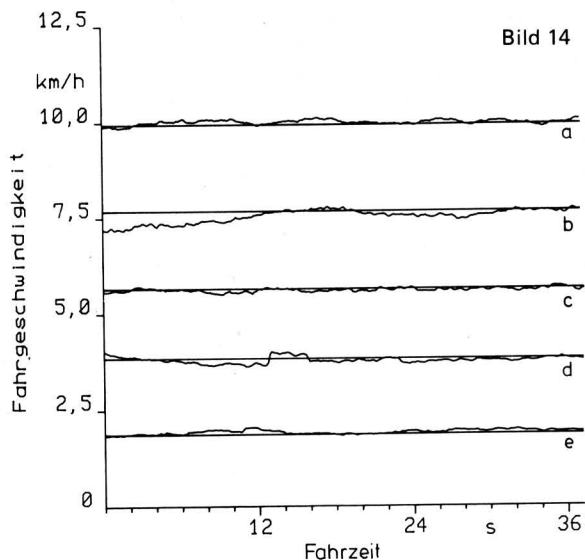


Bild 14 bis 16. Gemessener Geschwindigkeitsverlauf für die nicht-berührenden Meßverfahren auf drei verschiedenen Fahrbahnen; Geraden geben die Referenzgeschwindigkeit an.

Bild 14: Eigenbau (Radar 1)
 Bild 15: handelsübliches Gerät (Radar 2)
 Bild 16: Zweiwege-Radargerät, Eigenbau (ZW-Radar)
 a Asphaltfahrbahn
 b und d Versuchsfeld, gepflügt
 c und e grasbewachsener Feldweg

3.3.2 Direkter Vergleich der Meßverfahren auf unterschiedlichen Fahrbahnen

Einen quantitativen Vergleich der 7 untersuchten Meßverfahren untereinander auf drei unterschiedlichen Fahrbahnen erlauben die **Bilder 17 bis 22**. Über der aus Meßstrecke und Meßzeit errechneten Referenzgeschwindigkeit sind die vier in 2.4 abgeleiteten Kenngrößen, nämlich der Extremwert $(v - v_r)$ in den Bildern 17a bis 22a, der bezogene Extremwert $((v - v_r)/v_r)$ in den Bildern 17b bis 22b, die Standardabweichung in den Bildern 17c bis 22c und der auf die Referenzgeschwindigkeit bezogene mittlere Fehler $(\bar{v} - v_r)/v_r$ (mittlerer Fehler) in den Bildern 17d bis 22d dargestellt.

3.3.2.1 Vergleich der Ergebnisse für feste Fahrbahnen

Auf festen Fahrbahnen (Bild 17d und 20d) zeigen die berührenden Meßverfahren (Peiselerrad, nichtangetriebenes Rad, angetriebenes Rad und Motordrehzahl) und das handelsübliche Radarmeßgerät (Radar 2) keine signifikante Abhängigkeit des mittleren Fehlers von der Geschwindigkeit. Die auftretenden Meßfehler sind gering. Die Schwankungen bewegen sich im Rahmen der Toleranzen für die Messung der Referenzgeschwindigkeit. Von den beiden verbleibenden Radarmeßverfahren (Radar 1 und ZW-Radar) werden im

unteren Meßbereich ($v < 3$ km/h) zu hohe Meßwerte angezeigt. Mit zunehmender Geschwindigkeit fallen die Mittelwerte bis zur Referenzgeschwindigkeit (Radar 1), bzw. es werden zu geringe Werte angezeigt (ZW-Radar). Diese Geschwindigkeitsabhängigkeit der Anzeige läßt sich jedoch durch eine meßwertabhängige Korrekturberechnung zum Teil kompensieren.

Die gemessenen Standardabweichungen (Bild 17c, 20c) zeigen eine steigende Tendenz über der Fahrgeschwindigkeit. Wie bereits aus den ruhigen zeitlichen Verläufen für die berührenden Verfahren erkennbar, liefern diese die geringsten Standardabweichungen. Die Rauschanteile in den Meßsignalen der Radargeräte führen zu größeren Werten.

Die Unterschiede in der Variabilität der Meßsignale zeigen sich auch in den Extremwerten (Bild 17a, 20a), wobei Standardabweichungen und Extremwerte der einzelnen Meßverfahren zwar korrelieren, sich aber keine definierten Beziehungen finden lassen. Im Bereich kleiner Geschwindigkeiten ($v < 3$ km/h) sind die Störspitzen in den Radarsignalen verglichen mit höheren Geschwindigkeiten gleich groß bzw. teilweise sogar größer. Dies wird besonders deutlich aus dem Verlauf der bezogenen Extremwerte (Bild 17b, 20b), wo die Werte von hohen Ausgangsgrößen ausgehend mit steigender Geschwindigkeit abfallen in einen Bereich mit nahezu konstanten Werten, in dem sich auch die Meßwerte der übrigen Verfahren befinden.

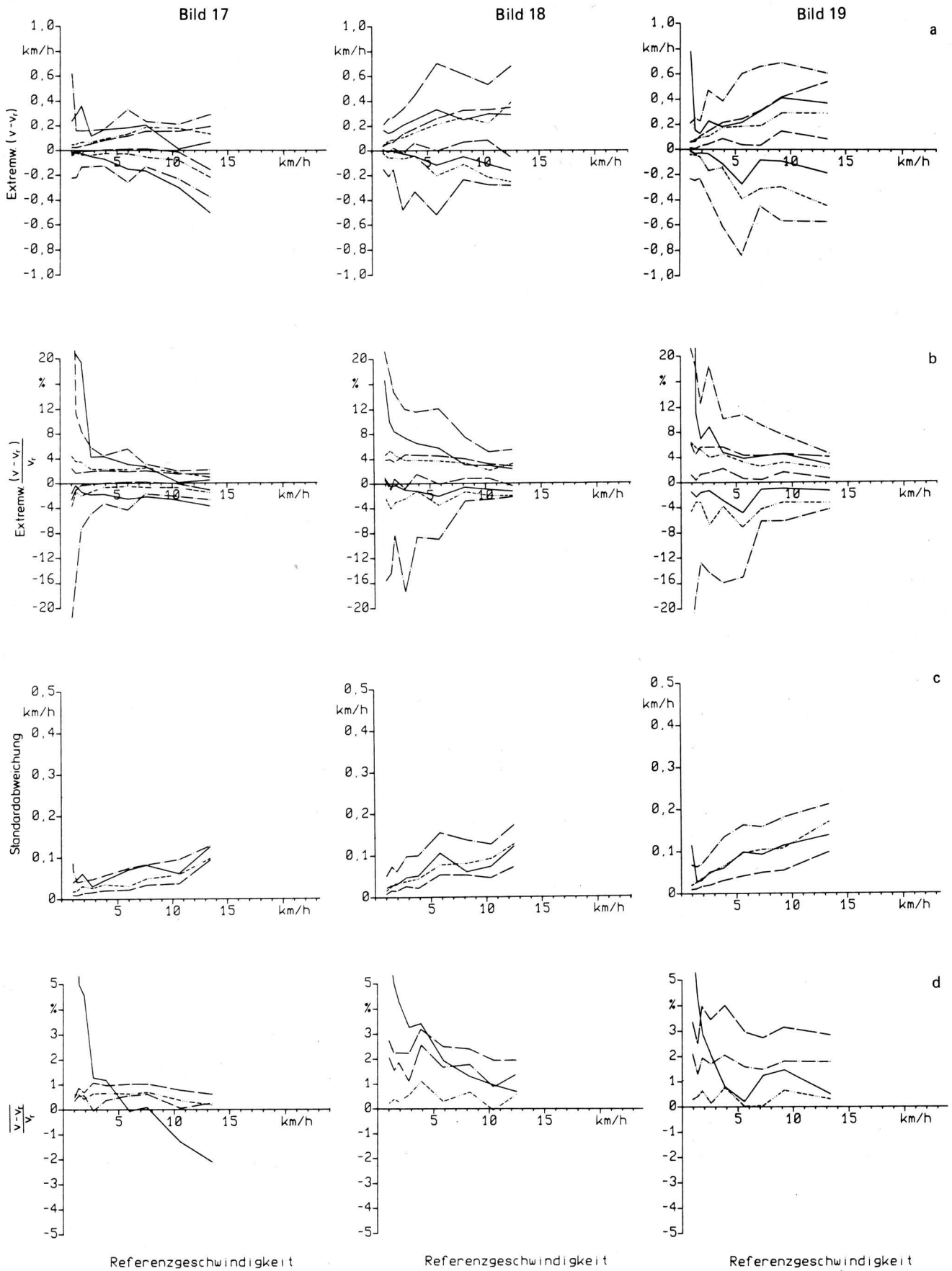


Bild 17 bis 19. Extremwerte, bezogene Extremwerte, Standardabweichung und auf die Referenzgeschwindigkeit bezogener Meßfehler aufgetragen über der Referenzgeschwindigkeit; drei verschiedene Fahrbahnen.

Bild 17: Asphaltfahrbahn
 Bild 18: grasbewachsener Feldweg
 Bild 19: Versuchsfeld

- - - angetriebenes Rad
 - · - nichtangetriebenes Rad

- - - Radar 2
 — ZW-Radar

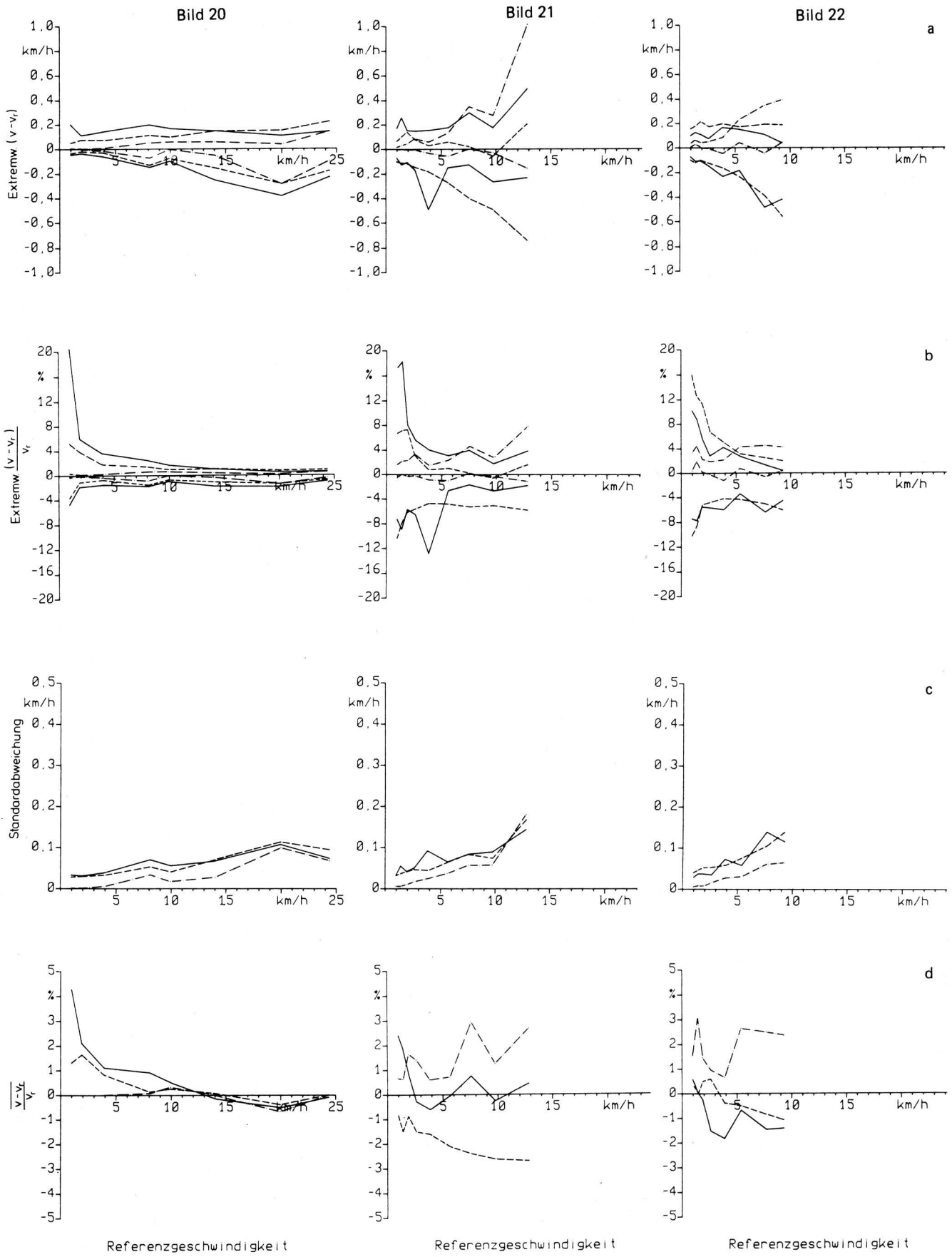


Bild 20 bis 22. Extremwerte, bezogene Extremwerte, Standardabweichung und auf die Referenzgeschwindigkeit bezogener Meßfehler aufgetragen über der Referenzgeschwindigkeit; drei verschiedene Fahrbahnen.

Bild 20: Asphaltfahrbahn
 Bild 21: grasbewachsener Feldweg
 Bild 22: Versuchsfeld

----- Peislerad
 - - - Motordrehzahlmessung
 — Radar 1

3.3.2.2 Vergleich der Ergebnisse für landwirtschaftliche Fahrbahnen

Aus den Bildern für die Versuche auf den landwirtschaftlichen Fahrbahnen (Bild 18, 19, 21, 22) ist zu erkennen, daß das nicht-angetriebene Rad (---) sowohl auf dem grasbewachsenen Feldweg (Bild 18d) als auch auf dem Versuchsfeld (Bild 19d) die Geschwindigkeit mit dem geringsten mittleren Fehler mißt. Die Meßverfahren an den Antriebsorganen (angetriebenes Rad, Bild 18d und 19d, Motordrehzahl, Bild 21d und 22d) liefern aufgrund des auftretenden Schlupfes zu hohe Meßwerte, wobei sich bei den gegebenen Verhältnissen der mittlere Fehler noch in Grenzen hält, da das Versuchsfahrzeug nur den eigenen Rollwiderstand überwinden mußte. Der nicht erwartete große Fehler des Peiselerades (Bild 21d) auf nasser Grasfahrbahn läßt auf eine zu geringe Andruckkraft zwischen Rad und Fahrbahn bzw. auf Schlupf infolge zu geringer Profilierung des verwendeten Reifens schließen. Der Einsatz eines derartigen "fünften Rades" auf landwirtschaftlichen Fahrbahnen ist also nicht unproblematisch. Das handelsübliche Radargerät (Radar 2, Bild 18d und 19d) liefert leicht überhöhte Meßwerte, wobei der Meßfehler nicht geschwindigkeitsabhängig ist. Die Eigenbaugeräte (ZW-Radar, Bild 18d und 19d, Radar 1, Bild 21d und 22d) zeigen eine ähnliche Geschwindigkeitsabhängigkeit des mittleren Fehlers wie auf der Asphaltfahrbahn. Eine eindeutige Abhängigkeit von der Fahrbahn läßt sich jedoch nicht erkennen.

Bei der Beurteilung der übrigen Kenngrößen (Standardabweichung, Extremwerte) ist zu berücksichtigen, daß aufgrund der nicht konstanten Rollwiderstände während der Versuchsfahrten auf den landwirtschaftlichen Fahrbahnen (Unebenheiten, Spuren usw.) unterschiedlicher Schlupf und Drehzahlschwankungen an der Antriebsachse auftreten und sich damit auch Schwankungen in der wahren Geschwindigkeit ergeben. Diese Geschwindigkeitsschwankungen sind in den angegebenen Werten der Standardabweichung und der Extrema mit enthalten. Auch hieraus resultieren für die Messungen über die Antriebsorgane (angetriebenes Rad, Motordrehzahl) leicht erhöhte Werte in der Standardabweichung (Bild 18c, 19c, 21c, 22c). Bei den Extremwerten (Bild 18a, 18b, 19a, 19b, 21a, 21b, 22a, 22b) äußert sich diese Tatsache durch größere Spannen zwischen Minima und Maxima, wobei sich der Bereich der auftretenden Werte aufgrund des Schlupfes zum Positiven hin verschiebt.

Aus den Kennwerten für die Variabilität des Meßsignals von den Meßverfahren mit dem nichtangetriebenen Rad und dem Peiselerad läßt sich ablesen, daß auf diesen Fahrbahnen tatsächlich stärkere Geschwindigkeitsschwankungen auftreten.

Die Standardabweichungen und Extrema der Radar-Eigenbaugeräte korrelieren recht gut mit denen des nichtangetriebenen Rades und des Peiselerades.

Bei dem handelsüblichen Radargerät (Radar 2) ergibt sich aufgrund der größeren Oberflächenrauigkeit der Fahrbahnen ein erhöhter Rauschanteil im Meßsignal. Deshalb fallen hier Standardabweichung und Extremwert deutlich höher aus.

3.4 Zusammenfassende Beurteilung der untersuchten Meßwerte

Während die in Bild 17 bis 22 gezeigten Kennlinien dem direkten Vergleich der Meßverfahren auf jeweils unterschiedlichen Fahrbahnen dienen, sollen Bild 23 bis 28 ein Urteil über den universellen Einsatz der Meßverfahren (3 berührende Meßverfahren, 3 Radar-meßverfahren) ermöglichen. Dazu sind die ermittelten Werte der vier in 2.4 abgeleiteten Bewertungsgrößen geordnet nach den Meßverfahren gezeigt, wobei die Ergebnisse aller Versuchsfahrten berücksichtigt sind. Eine Unterscheidung hinsichtlich der Fahrbahnen ist hier nicht mehr möglich.

3.4.1 Berührende Meßverfahren

Als erstes werden die auf die Referenzgeschwindigkeit bezogenen mittleren Fehler $(\bar{v} - \bar{v}_r)/v_r$ (unterer Bildteil d in Bild 23 bis 28) betrachtet. Dabei sind zur besseren Übersicht Grenzen eingezeichnet, die die zu stellenden Forderungen (Tafel 1 in [1]) in einem Meßbereich von 0–20 km/h berücksichtigen (Verlauf der Grenzen oberhalb von 10 km/h streng genommen hyperbolisch). Es läßt sich erkennen, daß von den berührenden Verfahren die Messung der Geschwindigkeit mit Hilfe des nichtangetriebenen Fahrzeugrades (Bild 24) die besten Ergebnisse liefert. Dieses leicht zu realisierende Meßverfahren erbringt unter den gegebenen Versuchsbedingungen nach entsprechender Kalibrierung auf allen Fahrbahnen gute Ergebnisse, da Luftdruck und Achslasten und damit der Rollradius des Fahrzeugrades konstant gehalten werden und nur geringe Umfangs- und Seitenkräfte an den Rädern auftreten, so daß kein nennenswerter Schlupf entsteht. Diese Aussage wird unterstützt durch die Tatsache, daß dieses Meßverfahren auch bei den übrigen Kennwerten (Standardabweichung, Extremwerte³), Bild 24 Teile a, b, c) befriedigende Werte liefert und unter Verwendung hinreichend auflösender Winkelinkrementgeber im Zeitverhalten die gestellten Forderungen ($\tau \leq 200$ ms) erfüllt. Dieses Meßverfahren läßt sich in der Praxis für Transportarbeiten, Pflegearbeiten mit leichten Anbaugeräten und Arbeiten mit Anhängegeräten einsetzen, wenn der Zugkraftbedarf durch eine Antriebsachse abgedeckt wird.

Erwartungsgemäß werden vom angetriebenen Rad (Bild 25) (gleiches gilt auch für die aus der Motordrehzahl ermittelte Geschwindigkeit, die hier nicht dargestellt ist) wegen des auftretenden Schlupfes zu hohe Geschwindigkeiten angezeigt, wobei sich die Abweichungen aufgrund der Versuchsbedingungen (keine Zugkräfte am Versuchsfahrzeug) noch in engen Grenzen halten. Obwohl dieses Meßverfahren bei den anderen Kennwerten und im Zeitverhalten gute Ergebnisse liefert, bleibt es zur Ermittlung der wahren Geschwindigkeit auf den Einsatz auf festen Fahrbahnen beschränkt. Zur Bestimmung der konstruktiven Geschwindigkeit an den Rädern bzw. des Schlupfes auf landwirtschaftlichen Fahrbahnen bietet das Meßverfahren, wie das Zeitverhalten und die Tendenz der Kennwerte deutlich machen, gute Möglichkeiten.

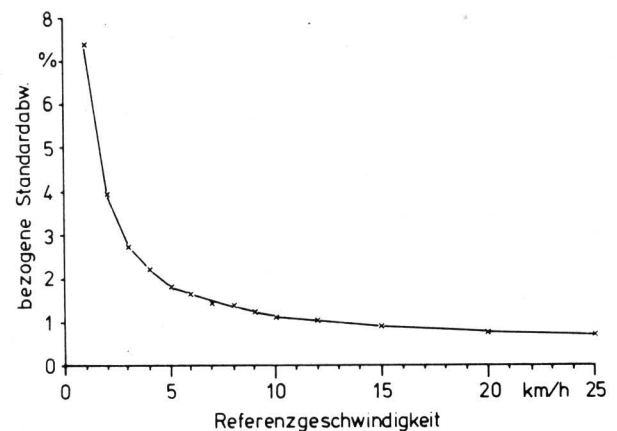


Bild 29. Grenzkurve für die auf die Referenzgeschwindigkeit bezogene Standardabweichung (σ/v_r).

³) Die in den Bildern der Standardabweichung eingetragene Grenzlinie korrespondiert mit dem in Bild 29 gezeigten Grenzwert der auf die Referenzgeschwindigkeit bezogenen Standardabweichung, bei dem oberhalb von 4 km/h (Benutzungsdauer der Ackerschlepper > 95 %, Bild 1 in [1]) nur noch Werte $\sigma/v_r \leq 2$ % auftreten, die bis auf 0,75 % bei 20 km/h abfallen. Die in den Bildern der auf die Referenzgeschwindigkeit bezogenen Extremwerte eingezeichneten Grenzen (mit 10 % beginnend bei 1 km/h, auf 5 % abfallend bei 2,5 km/h, danach konstant) sind bei geschwindigkeitsgeregelten Arbeitsverfahren als Maximalwerte der tolerierbaren Abweichungen anzusehen.

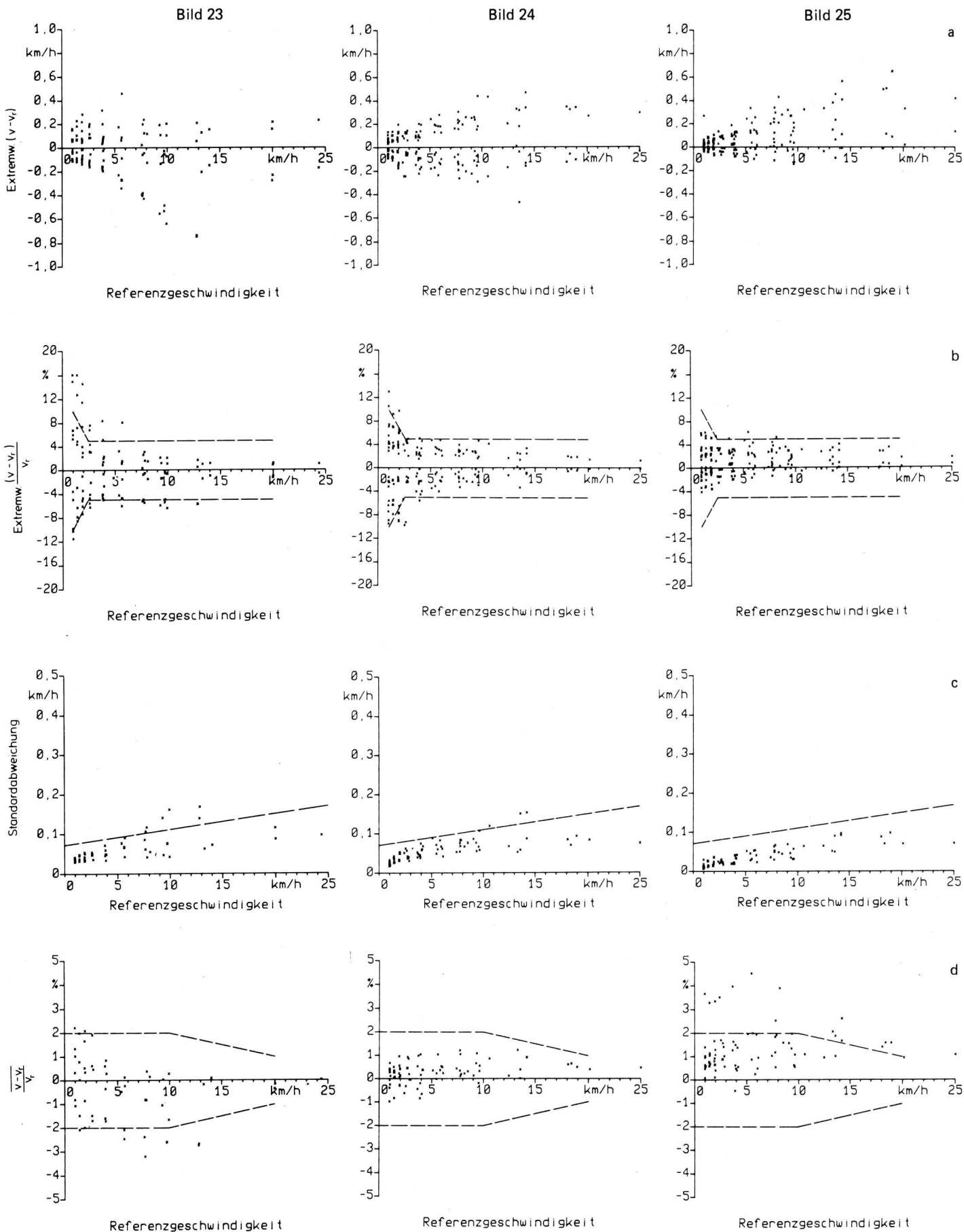


Bild 23 bis 25. Extremwerte, bezogene Extremwerte, Standardabweichung und auf die Referenzgeschwindigkeit bezogener Meßfehler von drei berührenden Meßverfahren aufgetragen über der Referenzgeschwindigkeit; Ergebnisse von verschiedenen Fahrbahnen.

Bild 23: Peiselertrad

Bild 24: nichtangetriebenes Rad

Bild 25: angetriebenes Rad

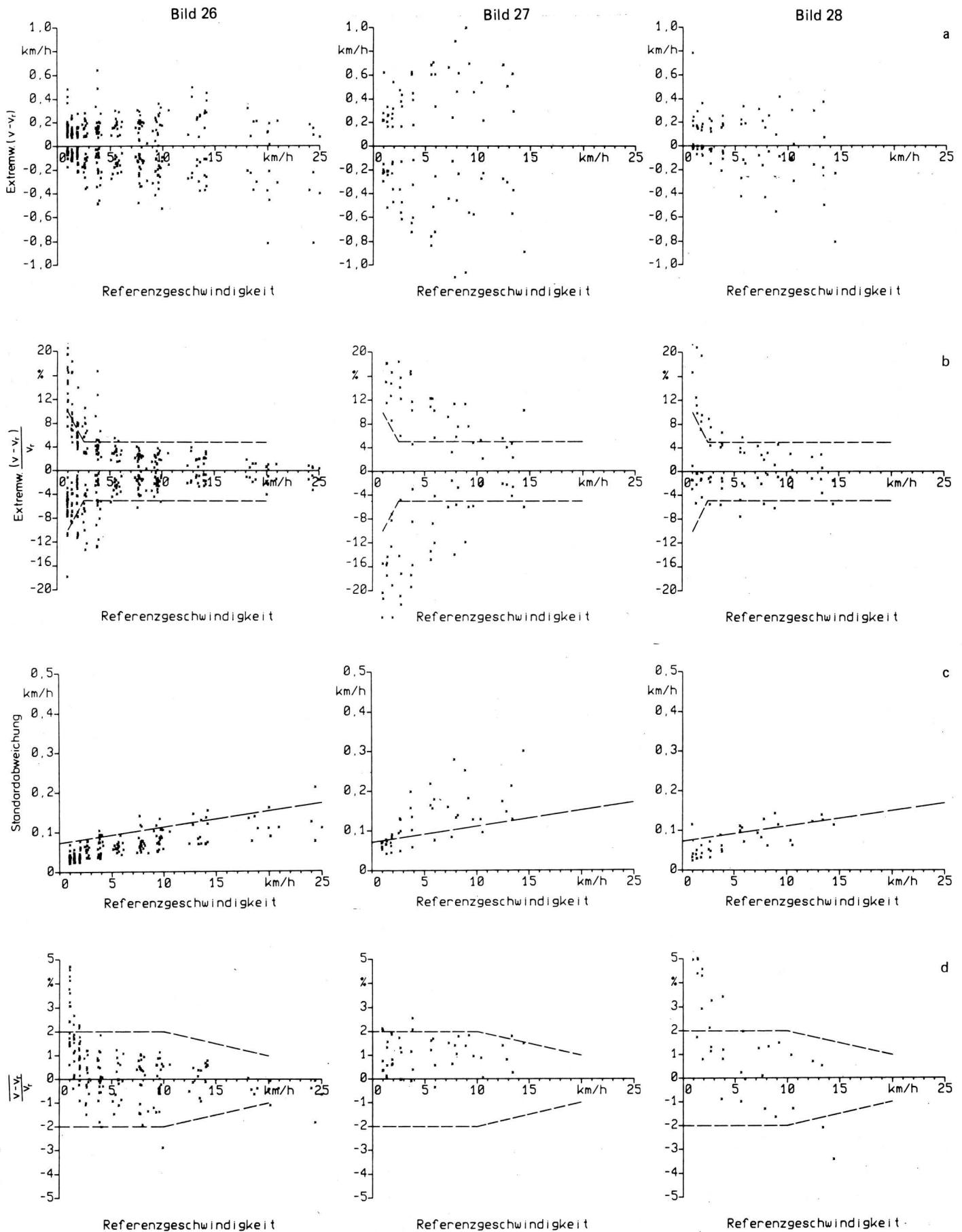


Bild 26 bis 28. Extremwerte, bezogene Extremwerte, Standardabweichung und auf die Referenzgeschwindigkeit bezogener Meßfehler von drei Radar-Geschwindigkeitsmeßverfahren aufgetragen über der Referenzgeschwindigkeit; Ergebnisse der verschiedenen Fahrbahnen.

Bild 26: Radar 1

Bild 27: Radar 2 (handelsübliches Radargerät)

Bild 28: ZW-Radar (Zweifach-Radar in "Janus"-Anordnung)

Die bei dem Peiselerrad (Bild 23) auftretenden negativen Meßfehler lassen erkennen, daß sich dieses Standardmeßverfahren der Geschwindigkeitsmessung auf landwirtschaftlichen Fahrbahnen nicht immer bewährt. Als negativ anzumerken ist auch, daß das Peiselerrad bereits im Versuchsbetrieb Handhabungsprobleme beim Rangieren des Versuchsfahrzeuges mit sich brachte.

3.4.2 Berührungslose Meßverfahren

Von den Radarmeßverfahren schneidet das handelsübliche Radarmeßgerät (Radar 2, Bild 27) hinsichtlich des mittleren Fehlers (Bildteil d) am günstigsten ab. Die insgesamt etwas zu hoch liegenden Werte lassen sich durch eine entsprechende Kalibrierung in einem Toleranzfenster von $\pm 1,5\%$ halten. In bezug auf die übrigen Kennwerte, Standardabweichung, Extrema (Bildteil a-c), stellt es sich jedoch wesentlich ungünstiger dar. Bei einer Verwendung des Geschwindigkeitssignals als Führungsgröße für Verteilprozesse ergeben sich ohne weitergehende Signalkonditionierung im Gerät selbst oder in den nachgeschalteten Regelgeräten zu große mittlere und zu große maximale Verteilungsschwankungen. In der vorliegenden Form erfüllt das Meßgerät die gestellten Forderungen im Zeitverhalten ($\tau \leq 200$ ms) und hinsichtlich des mittleren Meßfehlers sehr gut. Die definierten Grenzwerte für die Variabilität des Meßsignals werden jedoch im gesamten Geschwindigkeitsbereich nicht eingehalten.

Das Versuchsgerät (Radar 1, Bild 26) zeigt im Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 2 km/h eine deutliche Überhöhung der angezeigten Geschwindigkeit (Bildteil d). Durch eine Kompensation dieses systematischen Fehlers läßt sich auch hier der eingezeichnete Toleranzbereich einhalten. Im Hinblick auf die Standardabweichung (Bildteil c) liefert das Meßgerät aufgrund der Signalkonditionierung befriedigende Ergebnisse, wobei nur wenige Werte den vorgegebenen Grenzwert übersteigen. Bei den Extremwerten (Bildteil a u. b) liefert das Meßverfahren erst ab ca. 3 km/h befriedigende Ergebnisse, so daß eine Verwendung des Meßsignals als Führungsgröße für geschwindigkeitsgeregelte Arbeiten bei kleinen Geschwindigkeiten entsprechend große maximale Abweichungen mit sich bringen kann. Beim Zeitverhalten ($\tau = 450$ ms) wird die gestellte Forderung ($\tau \leq 200$ ms) nicht erfüllt. Das Meßverfahren ist daher nur für Arbeiten mit konstanter Geschwindigkeit über 3 km/h uneingeschränkt brauchbar.

Bei dem Radargerät in "Janus"-Anordnung (ZW-Radar, Bild 28) treten größere mittlere Meßfehler in einem gegenüber dem Einfach-Radar etwas weiteren Geschwindigkeitsbereich auf, die auf nicht optimierte Antennen und Aufhängungen (zu weiter Sende-/Empfangskegel der Antenne, Körperschall) zurückzuführen sind. Bei der Variabilität und dem Zeitverhalten des Meßsignals treten aufgrund ähnlicher Signalkonditionierungen wie bei Radar 1 nahezu gleiche Werte auf. Mit geringen Einschränkungen kann der Einsatz dieses Meßverfahrens in der Landwirtschaft ähnlich beurteilt werden wie beim Radar 1.

Beide Einzelradargeräte (Radar 1 und Radar 2) reagieren auf veränderte Achslast besonders bei gefederten Fahrzeugen infolge des geänderten Anstellwinkels zwischen Antenne und Fahrbahn. Wie zuvor abgeleitet (Abschn. 4.3 in [1]), ergeben sich bereits bei Winkelabweichungen von $\pm 2,5^\circ$ vom Sollwert Meßfehler von etwa $\pm 5\%$. Ein Fehler in dieser Größe ist für ein derartig aufwendiges Meßverfahren nicht tolerierbar, so daß für einen universellen Einsatz der berührungslosen Radar-Doppler-Verfahren ein Meßsystem in "Janus"-Konfiguration verwendet werden sollte.

4. Zusammenfassung

Mit dem Erfordernis, die Arbeitsverfahren der Außenwirtschaft in Hinsicht auf die Wirtschaftlichkeit, die Arbeitsqualität und den Schutz der Umwelt zu verbessern, wächst die Notwendigkeit für eine Messung der wahren Fahrgeschwindigkeit als wichtige Füh-

rungsgröße wie auch des wahren Fahrweges als Grundlage zur Erfassung weg- bzw. flächenbezogener Betriebsdaten. Die Grundlagen, Aufgaben und Anforderungen für eine entsprechende Geschwindigkeitsmessung wurden in einer vorangehenden Arbeit [1] dargelegt.

Im vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse von Versuchen mit verschiedenen Geschwindigkeitsmeßverfahren auf unterschiedlichen Fahrbahnen dargestellt. Dabei werden vor allem die Abweichungen zwischen der jeweils angezeigten Geschwindigkeit und der aus Fahrweg und Fahrzeit ermittelten Referenzgeschwindigkeit in Form verschiedener statistischer Größen (Extremwerte der Abweichungen, auf die Referenzgeschwindigkeit bezogene Extremwerte, Standardabweichung, auf die Referenzgeschwindigkeit bezogene mittlere Abweichung) angegeben, um anhand bestimmter Kriterien die Eignung der einzelnen Meßverfahren für den Einsatz bei landwirtschaftlichen Arbeiten mit unterschiedlichen Anforderungen an die Geschwindigkeitsmessung prüfen zu können.

Berührende Meßverfahren mit Nutzung der vorhandenen Fahrzeugräder liefern unter den gegebenen Versuchsbedingungen befriedigende Resultate, wenn es sich um nichtangetriebene Räder mit ausreichend profilierten Reifen handelt. Angetriebene Räder scheiden jedoch außer auf festen Fahrbahnen (Straßen) zur Bestimmung der wahren Fahrgeschwindigkeit aus, wenn die erforderlichen Meßtoleranzen eingehalten werden sollen. Eine Messung der Radumfangsgeschwindigkeit ist aber, wenn z.B. der Schlupf an den Rädern bestimmt werden soll, mit diesem Verfahren gut möglich. Werden die notwendigen Meßstellen bereits bei der Konstruktion der Fahrwerke berücksichtigt, so lassen sich robuste zuverlässige Meßwertaufnehmer kostengünstig und problemlos integrieren.

Meßverfahren mit zusätzlichen Rädern, z.B. einem Peiselerrad, liefern zwar ausreichende Meßergebnisse, ihre Handhabung bringt jedoch schon im Versuchsbetrieb, besonders aber im praktischen Arbeitseinsatz Probleme mit sich, so daß ein Einsatz wohl nur für Sonderzwecke und Versuche in Frage kommt.

Die hier untersuchten berührungslos nach dem Doppler-Prinzip arbeitenden Radarmeßgeräte erfüllen die gestellten Forderungen nur dann, wenn die Systeme mit geeigneten Antennen versehen werden und das Meßsignal angepaßt an den Einsatz auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen konditioniert wird. Eine weitere Verbreitung werden sie nur dann finden, wenn es gelingt, die Lageabhängigkeit zwischen Meßsystem und Fahrbahn, hervorgerufen durch unterschiedliche Einfederungen des Fahrzeuges, etwa durch eine "Janus"-Konfiguration zu eliminieren und die Geräte trotzdem kostengünstig anzubieten.

Schrifttum

- [1] Speckmann, H. u. G. Jahns: Grundlagen zur Geschwindigkeitsmessung auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen. *Grundl. Landtechnik* Bd. 26 (1986) Nr. 3, S. 78/86.
- [2] SMX 1-Mikrowellen-Modul. Firmenschrift: Siemens AG, München.
- [3] Bedienungshinweise für den Doppler-Radar-Modul MDX0520. Firmenschrift: VALVO, Hamburg.
- [4] Radar-Bewegungsmelder für Sicherheits-, Überwachungs- und Steuerungsanwendungen. Technische Informationen für die Industrie Nr. 76092. Firmenschrift: VALVO, Hamburg.
- [5] Radar-Bewegungsmelder. Technische Informationen für die Industrie Nr. 78021. Firmenschrift: VALVO, Hamburg.
- [6] MDS-80, Users Manual. Firmenschrift: Intel, Santa Clara, California, Oktober 1977.
- [7] Assembler-Programmiersprache System SAB 8080. 1. Ausgabe. Firmenschrift: Siemens AG, München.