

Tafel 4. Gleichzeitige Zuordnung der Stoßfaktoren und Radkräfte in den Richtungen x, y, z

Einsatzfall	lfd. Nr.	Stoßfaktoren			Radkräfte			Bemerkung
		$n_{rx}$	$n_{ry}$	$n_{rz}$	$F_{rx}$ kN	$F_{ry}$ kN	$F_{rz}$ kN	
Befahren von Extremabschnitten	1	0,9	0,3	1,08	26,5	8,8	61,2	UP/GL
	2	0,9	-0,3	1,08	26,5	-8,8	61,2	UP/GL
	3	-0,46	0,3	1,08	-13,5	8,8	61,2	UL
	4	-0,46	-0,3	1,08	-13,5	-8,8	61,2	UL
	5	0,45	0,6	1,08	13,2	17,6	61,2	UP/GL
	6	0,45	-0,6	1,08	13,2	-17,6	61,2	UP/GL
	7	-0,23	0,6	1,08	-6,8	17,6	61,2	UL
	8	-0,23	-0,6	1,08	-6,8	-17,6	61,2	UL
	9	0,45	0,3	1,8	13,2	8,8	82,3	UP/GL
	10	0,45	-0,3	1,8	13,2	-8,8	82,3	UP/GL
	11	-0,23	0,3	1,8	-6,8	8,8	82,3	UL
	12	-0,23	-0,3	1,8	-6,8	-8,8	82,3	UL
	13	0	0	-1	0	0	0	-
Fahrt auf Feldwegen und Pflasterstraßen	14	0,5	0,25	0,8	14,7	7,35	52,9	UP/GL
	15	0,5	-0,25	0,8	14,7	-7,35	52,9	UP/GL
	16	0,25	0,36	0,8	7,35	10,6	52,9	UP/GL
	17	0,25	-0,36	0,8	7,35	-10,6	52,9	UP/GL
	18	0,25	0,25	1,0	7,35	7,35	58,8	UP/GL
	19	0,25	-0,25	1,0	7,35	-7,35	58,8	UP/GL
	20	0	0	-1	0	0	0	-

UP ungebremstes Rad; Kraftangriff von  $F_{rx}$  und  $F_{rz}$  im Raddrehpunkt D, von  $F_{ry}$  im Radanlaufpunkt P (Bedingung:  $F_{rx} > 0$ ;  $n_{rx} > 0,25$  extr  $n_{rx}$ )  
 GL gebremstes Rad; Kraftangriff aller drei Komponenten  $F_{rx}$ ,  $F_{ry}$ ,  $F_{rz}$  im Radaufstandpunkt L (Bedingung bei gebremsten Rädern:  $F_{rx} > 0$ ;  $n_{rx} > 0$ )  
 UL ungebremstes Rad; Kraftangriff von  $F_{rx}$  und  $F_{rz}$  im Raddrehpunkt D, von  $F_{ry}$  im Radaufstandpunkt L (Bedingung:  $n_{rx} < 0,25$  extr  $n_{rx}$ )

tete Lastannahmen für den Radbereich eingegangen. Die vorgestellte Methode der Rad-Stoßfaktoren ist sehr gut geeignet, kurzfristig für Überschlagsberechnungen Lastannahmen zur Verfügung zu stellen, wenn Radbereiche zu dimensionieren sind. Bei einer angestrebten Sicherheit von 1,0 unter Verwendung der ertragbaren Spannungen nach [6] liegt man mit diesen Lastannahmen auf der sicheren Seite. Bei den meisten Landmaschinen wird der Zeitfestigkeitsnachweis (ertragbare Spannungen für 500 000 Lastwechsel nach [8]) als Ermüdungsfestigkeitsnachweis ausreichend sein, vor allem wenn es sich um neu zu entwickelnde Erzeugnisse in einer frühen Entwicklungsstufe handelt, die zusätzlich zur analytischen Dimensionierung noch eine intensive Erprobung im Ein-

satz und auf Prüfständen erfahren. Bei Lenkungsteilen ist es empfehlenswert, die in der Festigkeitsrechnung ausgewiesene Sicherheit von vornherein etwas höher zu wählen. Hierbei ist zusätzlich noch zu bedenken, daß durch Längskräfte allein beanspruchte Lenkungsteile keine Tragfähigkeitsreserven bei Plastifizierung haben. Bei Druckbeanspruchung sind sie zusätzlich noch knickgefährdet.

**Literatur**

[1] Eichwald, U.; Lorenz, A.: Katalog gemessener Belastungen an mobilen Landmaschinen. Institut für Landmaschinentechnik Leipzig, Forschungsbericht 1979.  
 [2] Puls, E.: Der Einfluß des Fahrers auf die Belastung von Traktorenbauteilen unter besonderer

Tafel 5. Extreme Belastung am linken Rad (nicht gebremst) auf der Grundlage verallgemeinerter Beschleunigungsvektoren nach [7]

Einsatzfall	lfd. Nr.	$F_{Dx}$ kN	$F_{Ly}$ kN	$F_{Py}$ kN	$F_{Dz}$ kN
Befahren von Extremabschnitten	1	22,51	0	-6,91	66,7
	2	-11,09	0	0	49,0
	3	-3,87	15,66	0	74,1
	4	0	-10,7	0	47,6
	5	8,51	0	14,09	73,8
	6	22,51	0	-11,68	56,5
	7	-3,87	14,95	0	78,3
	8	0	0	0	0
Fahrt auf Feldwegen und Pflasterstraßen	9	13,67	0	-6,28	55,1
	10	-6,73	0	0	42,5
	11	0	11,03	0	61,4
	12	2,25	-10,87	0	25,6
	13	13,67	0	10,15	50,2
	14	7,50	0	-9,60	49,9
	15	0	10,57	0	63,5
	16	0	0	0	0

Kraftangriff im Raddrehpunkt (D), im Radaufstandpunkt (L), im Radanlaufpunkt (P)

Berücksichtigung der Höchstbelastung. Technische Universität Dresden, Dissertation 1976.

[3] Schilling, U.; Tersch, H.: Lastannahmen für das System Traktor-Aufsattelanhängel. 2. Kolloquium „Zuverlässigkeit und ökonomischer Materialeinsatz bei mobilen Landmaschinen“ in Leipzig 1973, Vortragssammlung Band 1, S. 82.  
 [4] Lorenz, A.: Analytische Belastungsermittlung für die Dimensionierung mobiler Landmaschinen. VEB Ingenieurbetrieb für Landmaschinentechnik Leipzig, Wissenschaftlich-technische Arbeitsunterlagen Nr. 7, 1982.  
 [5] FoN 106001 Koordinatensystem für äußere Belastungen mobiler Landmaschinen. Ausgabe: Februar 1985.  
 [6] TGL 14 915/01 Festigkeitsnachweis für geschweißte Konstruktionen. Ausgabe: Januar 1986.  
 [7] Kritzner, B.: Lastannahmen für den analytischen Betriebsfestigkeitsnachweis der Fahrgestelle mobiler Landmaschinen. Technische Universität Dresden, Dissertation 1984.  
 [8] Cottin, D.; Kritzner, B.: Richtlinie zur Berechnung von Schweißverbindungen auf Betriebsfestigkeit. VEB Erntemaschinen Neustadt, Stammbetrieb, Betriebsteil Automatisierungstechnik Leipzig, Wissenschaftlich-technische Arbeitsunterlagen Nr. 9, 1988.

# Akustische Sensoren zur Steuerung von mobilen Aggregaten und deren Werkzeugen

Dr.-Ing. F. Ahrens, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Mathematisch-naturwissenschaftliche und technische Grundlagen

**1. Einleitung**

Zur Positionsbestimmung an landwirtschaftlichen Bearbeitungsgrenzen von mobilen Aggregaten und von deren Werkzeugen wird u. a. vorgeschlagen, geeignete natürliche Leitlinien vorteilhaft optisch mit einer CCD-Kompaktzeilenkamera abzutasten. Bei minimiertem Hardwareaufwand kann mit Hilfe eines Einchipmikrorechners, der den Abtastvorgang und die Binärbildauswertung steuert, durch angepaßte Softwarealgorithmen

neben der Ausgabe des Signals für die Positionsabweichung zusätzlich noch eine ausreichende Adaption an sich ändernde Umgebungseinflüsse, wie z. B. an Bewölkungsänderungen, an den Tagesgang u. a., realisiert werden [1]. Durch eine entsprechend veränderte Positionierung der Kompaktkamera und meßproblemangepaßte Software-Verarbeitungsalgorithmen könnten auch andere Prozeßmeßgrößen, wie z. B. der Verlauf des Ährenhori-

zonts, die Pflanzenbestandsdichte, der Durchfluß oder die Menge schüttfähiger, stückartiger Güter sowie inhomogener Flüssigkeiten, die wahre Fahrgeschwindigkeit oder der Fahrweg über Ackerboden u. a., erfaßt und somit bei mobilen Arbeitsgängen andere Prozeßabläufe gesteuert werden. Bei der Entwicklung robuster, zuverlässiger und preisgünstiger Sensoren für den industriellen und landtechnischen Einsatz zeigt sich, daß für die Positionsbestimmung zu

Leitlinien und für die Objekterkennung optische Verfahren dominieren, während für Abstands-, Entfernungs- und einige Detektionsmeßaufgaben im Nahbereich bis 10 m auch akustische Verfahren günstig anzuwenden sind. Bei der berührungslosen Weg- und Geschwindigkeitsmessung über rauen Oberflächen konkurrieren z. Z. noch optische, radartechnische und akustische Verfahren [2].

Nachfolgend sollen zukünftige Einsatzmöglichkeiten akustischer Sensoren für Prozeßmeßaufgaben an mobiler Landtechnik gezeigt werden. Dabei wurde berücksichtigt, daß leistungsstarke, reversibel zu betrieblende elektroakustische Wandler aufgebaut und bereits seit längerem bekannte komplexe Signalverarbeitungsverfahren jetzt effektiv mit Hilfe hochintegrierter mikroelektronischer und mikrorechen technischer Bauelemente umgesetzt werden können. Erst durch eine mikrorechnergestützte intelligente Signalverarbeitung wird für die in Frage kommenden Einsatzfälle mit vorwiegend rauen Umgebungsbedingungen eine zuverlässige Arbeitsweise möglich. Innovative Vorleistungen, die für die Konzeption und den Aufbau akustischer Sensoren genutzt werden können, kommen vorwiegend aus der Konsumgüterproduktion, da hier für anfänglich aufwendige Entwicklungsarbeiten entsprechende Stückzahlen zu erwarten waren. So steuert z. B. ein elektroakustischer Sensor in einer „Autofocuskamera“ mit Hilfe des Impulsscholotverfahrens die Entfernungseinstellung [3]. Mit Hilfe von zwei elektroakustischen Sensoren an der hinteren Stoßstange eines PKW ist es z. B. ebenfalls möglich, in Verbindung mit einer Mikrorechnerverarbeitung beim Einparken den Rückraum zwischen 0 bis 0,5 m und 0,5 bis 1 m zu sichern und dort befindliche Hindernisse, wie Stangen, Pfeiler, aber auch Zaunfelder, zu erkennen [4]. Die Eignung dieser z. T. preiswerten akustischen Sensorkonzepte für einige industrielle Anwendungsbereiche wird z. Z. geprüft, läßt aber vermuten, daß sie sowohl konstruktiv als auch elektronisch an die veränderten Einsatzbedingungen anzupassen sind bzw. daß auch völlig neue Lösungswege beschränkt werden müssen. Dabei dürften die Leistungsparameter des elektroakustischen Wandlertyps die entscheidende Rolle bei der Realisierung praxisreifer Konzeptionen spielen, wobei sich der erforderliche Aufwand für die Informationsauswertung (Hard- und Software) von einfacher zu lösenden Entfernungs- und Abstandsmessungen über Weg- und Geschwindigkeitsmessungen zu komplexen Detektionsaufgaben, wie z. B. bei der Hinderniserkennung oder bei der Objekterkennung, ebenfalls unterscheiden dürfte.

## 2. Geeignete akustische Wandler

Der schlechte Wirkungsgrad bei der Erzeugung der in der Industrieumgebung benötigten hohen Schallenergien und die entfernungsabhängige starke Dämpfung ihrer Übertragung in Luft grenzen die Anwendungsmöglichkeiten von Ultraschallsensoren für Abstands-, Entfernungs- und Detektionsmeßaufgaben ein. Für den einfacheren Anwendungsfall der Tiefen- oder Abstandsmessung von Werkzeugträgern mobiler Landtechnik zu Bodenoberflächen bzw. Pflanzenbestandsflächen werden leistungsstarke, mit eng bündelnder Richtcharakteristik und hoher Arbeitsfrequenz arbeitende Schallwandler benötigt, um gegenüber den hohen

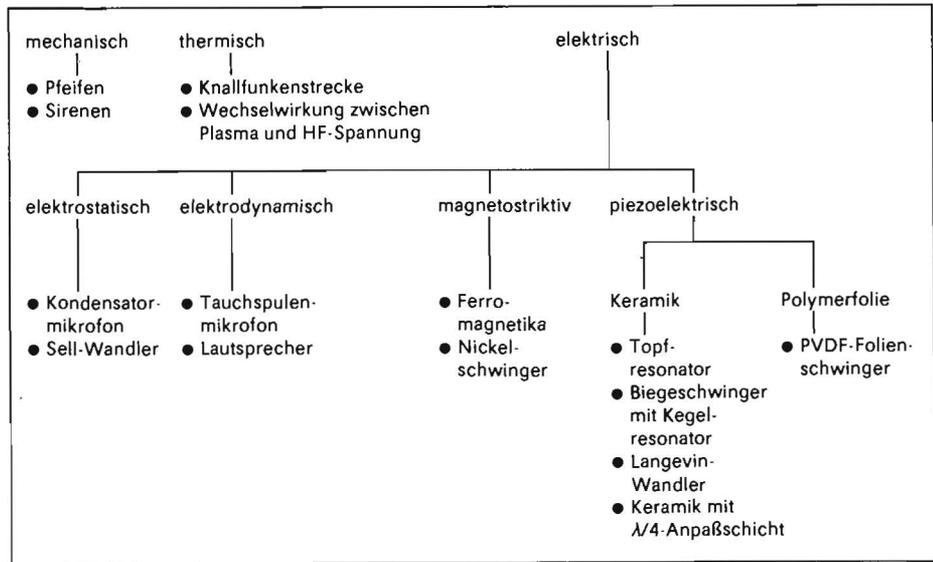


Bild 1. Technisch mögliche Wirkprinzipie zur Schallwandlung

Schallreflexionsverlusten, die z. B. über Akkerböden oder Pflanzenbeständen zu erwarten sind, und störenden Maschinengeräuschen einen ausreichenden Signal-/Rauschabstand schon in der Vorverarbeitung der Empfangssignale zu sichern. Nur so kann auf aufwendige Verfahren der Signal-/Rauschabstandsverbesserung in der Verarbeitung der Empfangssignale verzichtet werden.

Um die Sensorabmessungen klein zu halten, soll der Schallwandler reversibel, d. h. als Sender und Empfänger, arbeiten können. Er soll weiterhin gegen größere Temperaturschwankungen (0°C bis 40°C), Staub, Feuchtigkeit und mechanische Vibrationen unempfindlich sein. Der Einfluß der temperaturabhängigen Schallgeschwindigkeit in Luft ist durch zusätzliche Maßnahmen (Thermoelement als zusätzlicher Meßsensor, Referenzmeßstrecke) zu kompensieren.

Von den technisch möglichen Schallwandlerprinzipien haben sich für industrielle Anwendungen piezoelektrische Wirkprinzipie durchgesetzt (Bild 1). Die Herstellung geeigneter Ultraschallwandler erfordert ein hohes Technologieniveau, das z. B. für die Anwendung als Objekterkennungssensor einen beachtlichen Stand erreicht hat. Wirkprinzip und konstruktive Ausföhrung legen dabei die abstrahlbare Schalleistung, die nutzbare Arbeitsfrequenz, die Stabilität gegenüber Umgebungseinflüssen (Staub, Feuchtigkeit, mechanische Vibrationen u. a.), die Bandbreite und die Ausschwingzeitkonstante und damit den detektierbaren Meßbereich (kleine Abstände 0 bis 10 cm, mittlere Abstände 0 bis 2 m, große Abstände 0 bis 10 m) fest (Tafel 1). Für die sich z. T. gegenläufig beeinflussenden Wandlerparameter muß deshalb

ein geeigneter Kompromiß gesucht werden [5].

Mit Ausnahme des elektrostatischen Wandlers nach dem Sell-Prinzip (Kondensator), der als wesentlichen Vorteil eine breitbandige Schallübertragungscharakteristik aufweist, aber mit einer relativ hohen Vorgleichspannung (100 V bis 300 V) versorgt werden muß, haben sich piezoelektrische Wandlermaterialien zum Aufbau elektroakustischer Wandler durchgesetzt. Piezokeramische Biegeplatten oder Dickenschwinger sind gegenüber Umgebungseinflüssen unempfindlicher, arbeiten aber auf ihrer Resonanzfrequenz oder deren Oberwellen sehr schmalbandig.

Um den Schalldruck in einem Teil der Schalldruckkurve anzuheben oder diese im geforderten Übertragungsbereich einzuebneten, können hierzu prinzipiell die in der Akustik bekannten Methoden, wie die Ankopplung eines akustischen oder mechanischen Resonators, eines Resonanzabsorbers oder die mechanische bzw. akustische Bedämpfung der aktiv schwingenden Keramik, angewendet werden. Eine Schalldruckerhöhung ist in gewissen Grenzen mit dem Druckkammerprinzip möglich. Mit einer Mehrelementenanordnung (Schwingerarray) kann das abgestrahlte Schallfeld auf den Abtastpunkt fokussiert werden, so daß für Robotersteuerungen eine hohe örtliche Auflösung erreicht werden kann [6]. Für Arbeitsfrequenzen zwischen 30 kHz und 200 kHz können nur mechanische Resonatoren, die topf- oder kegelförmig ausgeführt sind, angekoppelt werden (Bild 2).

Die Piezokeramik kann z. B. auf eine Topfmembran aus Aluminium, aus Kunststoff

Tafel 1. Übersicht über die Eigenschaften elektroakustischer Schallwandler

Typ	Sell-Wandler	Langevin-Wandler	PZT-Keramik Topfresonator	Biegeschwinger Kegelsonator	λ/4-Anpaßschicht	PVDF-Folien-schwinger
Anpassungsfähigkeit	+	+	-	-	+	+
Arbeitsfrequenz	+	-	-	-	-	+
Bandbreite	+	-	-	-	-	+
Richtcharakteristik	-	-	-	-	-	+
Wirkungsgrad/Leistung	-	+	+	+	+	-
Umgebungseinflüsse	-	+	+	-	+	-
Abmessungen/Masse	+	-	+	+	+	+

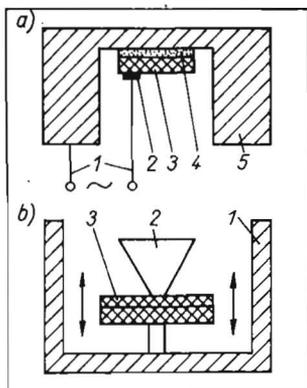


Bild 2. Piezokeramischer Luft-Ultraschallschwinger des VEB Keramische Werke Hermsdorf;

- a) mit Topfresonator Typ 15.78.5-1112.97  
 1 Spannungszuführung, 2 Kontaktierung, 3 Piezokeramik, 4 Klebverbindung, 5 Aluminium-Topfresonator  
 b) mit Kegelresonator Typ 1578.5-1132.97  
 1 Gehäuse, 2 akustischer Transformator, 3 bimorphe piezoelektrische Biegeplatte

oder – für höhere Schalleistungen – aus Titan aufgeklebt sein. Mit speziell gefertigten  $\lambda/4$ -Anpaßschichten zwischen der Membran und der Luft konnte der Wirkungsgrad weiter erhöht und die Richtcharakteristik pfeilscharf (Öffnungswinkel  $< 5^\circ$ ) ausgeführt werden. Die Nebenkeulendämpfung beträgt bei einer Resonanzgüte von 130 mindestens 20 dB, so daß Abklingzeitkonstanten bis 0,5 ms nutzbar sind. Mit einer elektrischen Eingangsleistung von 10 W wird in 1 m Entfernung noch ein Schalldruck von 65 Pa erzeugt [7].

In der DDR verfügbare piezokeramische Schallwandler (Hersteller: VEB Keramische Werke Hermsdorf) mit Arbeitsfrequenzen zwischen 35 Hz und 45 kHz (Bild 2) wurden vorrangig für elektrischen Dauerstrichbetrieb ausgelegt und bei Steuerungsaufgaben u. a. als Schallschranken eingesetzt. Für Niveau- und Abstandsmeßaufgaben im elektrischen Impulsbetrieb nach der Echolotmethode haben diese Schallwandler ungünstigere akustisch-elektrische Eigenschaften. Die Anpassung dieser Schwinger als Entfernungssensor ist elektronisch aufwendiger. Eine Verbesserung der Richtcharakteristik ist nur mit Hilfe von Parabolhorntrommeln oder -spiegeln vor dem Wandler möglich, die die geometrischen Abmessungen des Sensors aber erheblich vergrößern. Die Bandbreite kann z. B. durch eine mechanisch dämpfende Gummimanschette vergrößert werden, wodurch die abstrahlbare Schallenergie aber verringert wird [8]. Obwohl schmalbandige Piezokeramiken robuster gegenüber der Industrieumgebung sind und auch in größeren Entfernungen (2 bis 10 m) noch akzeptable Schalleistungen abstrahlen können, wird z. Z. bei Objekterkennungsaufgaben an Industrierobotern für die Nahbereichsmessung (0 bis 1 m) der Einsatz breitbandiger, speziell behandelter, beidseitig metallisierter Polymerfolien (PVDF) oder der Aufbau von Mehrmembranwandlern geprüft [9]. Die Folien sind dabei z. B. über PUR-Schaumstoff auf starrem Trägermaterial aufgespannt. Sie arbeiten bei Frequenzen zwischen 30 und 70 kHz, haben eine große Bandbreite und damit eine kleine Impulszeitkonstante. Durch Mehrmembrananordnungen und andere Ju-

strierung auf dem Trägerstreifen können unterschiedliche Öffnungswinkel zwischen  $10^\circ$  und  $160^\circ$  horizontal als auch vertikal realisiert werden. Mit diesem Sensorprinzip ist es möglich, sich durch geeignete Parameterwahl (Arbeitsfrequenz, Bandbreite, Richtcharakteristik horizontal/vertikal) besser an das Meßproblem und die Umgebungsbedingungen anzupassen. Die Folienschwinger müssen allerdings schalldurchlässig gegen mechanische Berührung, Staub, Feuchtigkeit und Kondensate gekapselt werden [10].

Für Entfernungsmesssysteme im Bergbau haben sich dafür feinmaschige Streckmetallgitter bewährt.

### 3. Anwendungsbereiche

#### 3.1. Abstandsmeßaufgaben

Robuste Abstandssensoren werden in der Landwirtschaft zunehmend benötigt, um zumindestens über eine Anzeige, besser über eine automatische Steuerung, z. B. die Arbeitstiefe von Bodenbearbeitungs- und Aussaataggregaten oder die Arbeitshöhe von Feldspritzern und Einzugsorganen der Erntemaschinen zielgerichtet so zu beeinflussen, daß die Arbeitsqualität stabilisiert oder verbessert wird bzw. der spezifische Arbeitsaufwand gesenkt werden kann. Für die Erfassung von Abständen zwischen Schallwandler und reflektierenden Gegenständen sind Flächen können die Laufzeitmessung (Impulsverfahren) oder die Phasenmessung (Dauerstrichverfahren) angewendet werden. Da der eindeutig erfassbare Meßbereich bei der Phasenmessung nur bis zu  $\lambda/2$  genutzt werden kann, wird dieses Verfahren nur bei sehr kleinen Abständen (0 bis 10 mm) angewendet. Die maximal nachweisbare Entfernung wird durch die Arbeitsfrequenz und die abgestrahlte akustische Leistung bestimmt. Die Meßgenauigkeit und die Zuverlässigkeit von Ultraschallsensoren werden dabei vor allem durch die temperaturabhängige Schallgeschwindigkeit und durch die das Nutzsinal überdeckenden Störgeräusche, deren Frequenzanteile in der Nähe der Echosignale liegen, erheblich beeinflußt. Deshalb setzen sich zunehmend digitale Signal-Erzeugungs- und Empfangsverfahren in Verbindung mit einer statistischen Mittelwertbildung bzw. Signalakkumulation durch, wobei aufwendige Hardwarelösungen immer mehr durch Mikrorechnersoftware ersetzt werden.

Zur Ermittlung der Impulslaufzeit sind, bezogen auf die konkrete Meßaufgabe, zwei Verfahren möglich:

- Sender und Empfänger liegen räumlich beieinander oder sind identisch. Es wird ein Echo empfangen und die Zeit bezüglich einer vom maximalen Meßabstand fest vorgegebenen Laufzeit ermittelt (Impulsecholotverfahren).
- Es liegt die gleiche Wandleranordnung vor. Der Empfangsimpuls löst einen neuen Sendeimpuls aus, und es wird die Laufzeit indirekt aus der Impulsfolgefrequenz ermittelt (Impulsfrequenzverfahren).

Bisher häufiger angewendet wurde das Impulsecholotverfahren. Im Laufzeitdiagramm ist zu sehen, wie ein Schallimpuls vom Wandler zum Zielobjekt läuft, dort reflektiert wird und den Wandler wieder zur Zeit  $T_T$  erreicht: Die Laufzeit  $T_T$  ist direkt proportional zur Objektentfernung  $x_T$  mit

$$x_T = \frac{1}{2} c_L T_T.$$

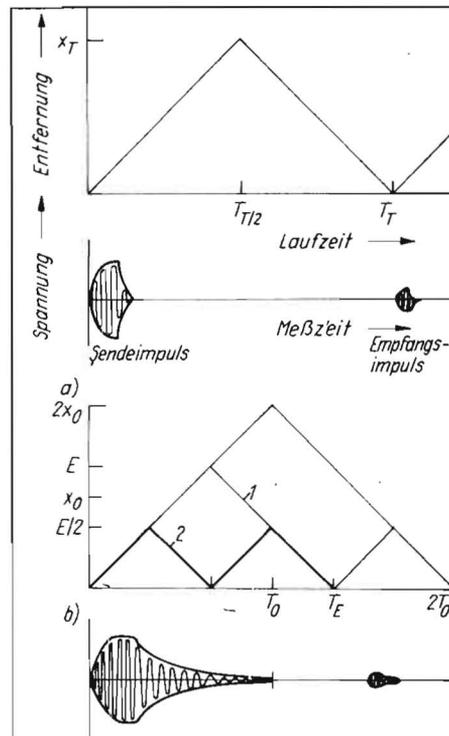


Bild 3. Laufzeitdiagramme zum Impulsecholotverfahren;

- a) ohne Mehrfachreflexion  
 b) mit Mehrfachreflexion  
 1 einfach reflektierter Impuls von E  
 ( $x_0 \dots 2x_0$ ), 2 doppelt reflektierter Impuls von E/2 ( $0 \dots x_0$ )

wobei  $c_L$  die vor allem temperaturabhängige (0,18 % Laufzeitänderung/K) Schallgeschwindigkeit in Luft ist (Bild 3a). Der maximale noch detektierbare Objektabstand  $x_{max}$  bestimmt die Tastfrequenz.

Ein neuer Impuls kann erst dann ausgesendet werden, wenn das Echo des vorhergehenden Pulses bzw. sein möglicherweise mehrfaches Echo so gedämpft ist, daß es unterhalb der Empfindlichkeitsschwelle des Senders liegt. Aufgrund der begrenzten Bandbreite hat der Schwinger eine endliche Abklingzeitkonstante  $T_0$ , innerhalb der kein Echo empfangen werden kann. Die in der Zeit  $T_0$  bis  $2T_0$  empfangenen Impulse können nicht eindeutig einer Entfernung zugeordnet werden, da es nicht möglich ist, in diesem Bereich zwischen einfach und mehrfach reflektierten Echos zu unterscheiden. Infolge dieser Totzeit  $T_0$  kann der Sensor den Sensorabstand E und E/2 nicht eindeutig zurechnen (Bild 3b). Eine intelligente Meßsignalverarbeitung ist deshalb zur Erhöhung der Zuverlässigkeit unbedingt erforderlich. Für unterschiedliche industrielle Meß- und Steuerungsaufgaben, vorerst an stationären Anlagen ausreichend erprobt, wurden Sensorkonzepte, die sich im Meßbereich und in der Auflösung unterscheiden, entwickelt und praxisreif überführt.

Der von der Fa. Messring (BRD) vertriebene Polaroid-Ultraschall-Wegsensor (Sell-Prinzip) arbeitet mit einer Frequenz um 50 kHz, 300 V<sub>ss</sub> Betriebsspitzenspannung, 10 Hz Abtastfrequenz und ohne zusätzlich erforderliche Anpaßschaltung. Der Meßbereich liegt dabei zwischen 0,275 m und 10,7 m bei einer Nennauflösung von  $\pm 3$  mm bis zu 3 m Entfernung und  $\pm 1\%$  über dem gesamten Entfernungsbereich. Der Hersteller garantiert

auch den Einsatz dieses Sensors bei der Erfassung der Pflugarbeitstiefe für Fahrgeschwindigkeiten von 4 bis 12 km/h über Ackerbodenoberflächen, wobei bei vorhandenen Pflanzenresten auf dem Boden durch den akustischen Sensor immer nur der kürzeste Meßabstand erfaßt wird [11]. Über Ackerböden und Grasbestand ist mit Entfernungsfehlern von -2% bis +6% im Arbeitsbereich von 0,5 bis 1,5 m zu rechnen. Damit ist die Erfassung von Bestandsgrenzen möglich, während die Tastung der Bestandsoberfläche und das Auffinden kleinerer Bestandslücken eine komplexere Signalauswertung mit Mikrorechnern erfordern [12].

Bei der Abstandsregelung einer Feldspritze müssen für ein befriedigendes Regelverhalten kurzzeitige Bestandslücken sowie Änderungen der Bestandshöhe erkannt und die daraus resultierende Abstandsänderung unterdrückt werden. Mit einer Abtastfrequenz von 90 Hz, einer Meßsignalglättung und einer Mikrorechnerverarbeitung konnten bei 7 km/h noch 20%ige Bestandshöhen-schwankungen und Bestandslücken von 0,5 m gut erkannt werden. Mit diesem Sensor wurden bei der Kopierung von Bodenoberflächen bzw. Tastungen über Pflanzenbeständen in einer Höhe von 700 mm und Fahrgeschwindigkeiten bis zu 2 m/s gute Ergebnisse erreicht [13]. Der von der Fa. Honeywell (BRD) vertriebene Ultraschall-Entfernungssensor „Microsonic“ (Piezokeramik mit  $\lambda/4$ -Anpaßschicht) arbeitet mit einer Arbeitsfrequenz von 215 kHz, einem Öffnungswinkel von  $10^\circ$ , einer Abtastfrequenz von 30 Hz und einer zusätzlichen Temperaturkompensation über einen Thermosensor. Die Störgeräuschfestigkeit wurde durch ein der Radartechnik entlehntes Pulsocodierungsverfahren weiter erhöht. Der Sensor wird als Kompaktvariante oder abgesetzt – d. h. Schallkopf und Verarbeitungselektronik sind mit einem 1 m langen Kabel verbunden – vertrieben. Mit einem zusätzlichen fokussierenden Reflektor können auch „Nullabstände“ getastet werden, während sonst im Entfernungsbereich zwischen 0,15 m und 1 m bei Umgebungstemperaturen von -15 bis +80°C mit einer Auflösung von  $\pm 1$  mm sicher abgetastet werden kann. Mit IP67 wurde ein sehr guter Schutz gegen die stark beanspruchende Industriatmosphäre sichergestellt. Neben typischen Anwendungen in der Handhabertechnik, z. B. bei Robotern oder automatischen Förder- und Lagersystemen, wurden diese akustischen „intelligenten“ Sensoren auch in Silos und Tanks zur Füllstandsmessung sowie zur Abstandsmessung über Grasnarben, Ackerböden und Fruchtbeständen an Landmaschinen eingesetzt [14].

Zwei kanadische Firmen bieten bereits automatische Tiefenkontrollsysteme für die Bodenbearbeitung und Aussaat an, wobei ein oder mehrere am Werkzeugträger montierte Ultraschallsensoren die Bodenoberfläche abtasten. Mit einer Abtastfrequenz von 18 Hz wird die Bodenoberfläche bei einer Fahrgeschwindigkeit von 7 km/h nach dem Impulselocholotprinzip alle 15 cm abgetastet, wobei ein Meßfehler von  $\pm 6,5$  mm entstand [15]. Die Fallhöhe von Elevatoren zur Übergabe von Erntegütern auf Transportfahrzeuge kann ebenfalls durch akustische Abstandssensoren erfaßt und durch eine Steuerung der Beschädigungsanteil gesenkt werden [16]. Eine Überarbeitung des vorgestellten Sensorkonzepts (Wandlermaterial, Verarbeitungselektronik) entsprechend dem Stand

der Technik wäre erforderlich, um die Automatisierungsbaugruppe noch robuster und zuverlässiger ausführen zu können.

### 3.2. Weg- und Geschwindigkeitsmeßaufgaben

Der optimale Einsatz von Traktoren und selbstfahrenden Arbeitsmaschinen, z. B. die optimale Ausbringung von Dünger oder Pflanzenschutzmitteln, die Minimierung des Arbeitszeitaufwands, die Maximierung der Nutzleistung oder auch die Messung und Registrierung der bearbeiteten Fläche, setzt in vielen Fällen eine Bestimmung der wahren Fahrgeschwindigkeit oder des zurückgelegten Weges voraus. Auch für die Ermittlung des Triebradschlupfes werden diese Meßgrößen benötigt. Fahrgeschwindigkeiten bzw. zurückgelegte Wegstrecken über Oberflächen mit einer Rauigkeit von mindestens der halben Schallwellenlänge können mit einem akustischen Sensor erfaßt werden. Der Sensor besteht dann mindestens aus zwei getrennt als Sender und Empfänger arbeitenden akustischen Wandlern, die vom mobilen Aggregat in einer Arbeitshöhe  $h$  unter dem Anstellwinkel  $\alpha$  gegen die Bodenoberfläche als Reflektor geneigt sind und diese im Dauerstrichbetrieb mit der Ultraschallfrequenz  $f_s$  bestrahlen. Die geforderte Mindestrauhigkeit sorgt dafür, daß die Schallwellen (Schallgeschwindigkeit  $c_L$ ) im Halbraum um die Reflexionsfläche, also auch in Einstrahlrichtung, reflektiert werden (Bild 4a). Der in Einstrahlrichtung reflektierte Anteil gelangt auf den neben dem Sender angeordneten Empfänger. Die Empfangsfrequenz  $f_e$  ist gegenüber der Sendefrequenz  $f_s$  bei einer Relativgeschwindigkeit  $v$  über der Bodenoberfläche dopplerverschoben. Günstiger ist die Differenzfrequenz

$$f_d > f_e - f_s = 2 f_s \frac{v \cos \alpha}{c_L - v \cos \alpha},$$

wobei mit  $c_L \gg v \cos \alpha$

$$f_d = f_e - f_s = 2 \frac{f_s}{c_L} v \cos \alpha \text{ bzw.}$$

$$v = \frac{1}{2} \frac{c_L}{f_s} \frac{1}{\cos \alpha} f_d \text{ ist,}$$

auszuwerten. Die Differenzfrequenz kann als Maß für die Geschwindigkeit ausgewertet werden, während durch eine Integration, z. B. durch Zählung der Frequenzimpulse N

je Zeiteinheit (Periodendauer  $T_d$ ), der zurückgelegte Weg  $s$  mit

$$s = \int_{T_d} \frac{ds}{dt} dt \text{ bzw.}$$

$$s = N \int_{T_d} v dt = \frac{c}{2 f_s \cos \alpha} N$$

unabhängig von  $f_e$  und  $v$  gewonnen werden kann. Bei einem optimalen Anstellwinkel  $\alpha$  ergibt sich ein minimaler Meßfehler. Da auf unebenem Ackerboden dynamische Nickbewegungen auftreten, die meßtechnisch schlecht zu erfassen sind – deren störender Einfluß auf die Meßgenauigkeit ist nicht zu kompensieren, wird die Verwendung eines zweiten Systems empfohlen, das in entgegengesetzter Richtung arbeitet, aber winkelfest mit dem ersten verbunden ist (Bild 4b) [17]. Die Schallwandler müssen mindestens eine der zu erwartenden maximalen Dopplerverschiebung entsprechende Bandbreite aufweisen. Zur Schallabstrahlung wurden spezielle Ultraschallwandler in Languevinscher Bauart entwickelt. Laboruntersuchungen über der Bodenrinne ergaben bei unterschiedlichen Bodenoberflächen und -strukturen für Wegmessungen einen Fehler unter +1%, während er bei Geschwindigkeitsmessungen bei  $\pm 2\%$  lag. Unter Einsatzbedingungen (Nickbewegungen, Windbeeinflussung in Bodennähe u. a.) dürfte sich der angegebene Meßfehler noch leicht vergrößern. Das Preis-Leistungs-Verhältnis zu Radarsensoren wird hier zukünftig den Ausschlag für die Anwendungsbreite geben. Für die Steuerung von Aussaatgeräten wird z. B. eine Wegauflösung von 1 cm gefordert, was einem Auflösungsvermögen des Geschwindigkeitsmeßverfahrens von 0,01 m/s entspricht. Für Fahrgeschwindigkeiten zwischen 1 und 10 km/h soll der Fehler nicht größer als  $\pm 2\%$  und bis zu 36 km/h nicht größer als  $\pm 0,2$  km/h sein [18]. Die Meßzeitkonstante sollte entsprechend dem Einsatzfall (nur Anzeige oder weg- und flächenbezogene Betriebsdatenerfassung oder Prozeßsteuerung oder Prozeßoptimierung) zwischen 0,2 s und 2 s variiert werden können. Eine gleitende Mittelwertbildung mit Hilfe eines Mikrorechners ist anzustreben.

### 3.3. Detektionsmeßaufgaben

Detektions- und Orientierungsaufgaben sind

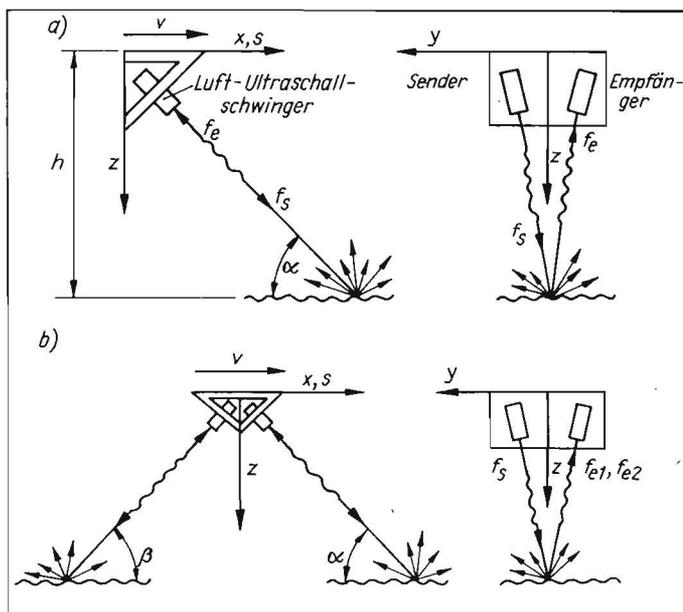


Bild 4  
Anordnung des akustischen Sensors zur Weg- und/oder Geschwindigkeitsmessung über Ackerboden;  
a) einkanalige Ausführung (Janus-Verfahren)  
b) zweikanalige Ausführung (Janus-Verfahren)

prinzipiell auch mit Ultraschallortungsverfahren (Sonare) in Luft lösbar [19]. In etwas abgewandelter Form werden diese Sensorkonzepte mit akustischen Sensoren zur Erkennung von Baumkronen für die Steuerung von Spritzmaschinen [20], zur Erkennung von Äpfeln in Baumkronen für die Steuerung von Ernterobotern [21] oder zur Erkennung von Kuheutern für die Steuerung von Melkrobotern angewendet [22].

Erfolgversprechender, da konzeptionell einfacher zu lösen, kann Saatgut während der automatisch zu steuernden pneumatischen Ablage in Drillmaschinen detektiert werden [23].

Auch bei der Raumüberwachung rückwärts fahrender Aggregate (z. B. bei der Grünfuttersilierung) können Sonare eingesetzt werden, um Hindernisse und Personen zu erfassen und eventuell einen Bremsvorgang auslösen zu können [24].

Die Sensorkonzepte sind aber auf den jeweiligen Anwendungsfall zugeschnitten und unterscheiden sich bezüglich des Realisierungsaufwands (Anzahl der akustischen Wandler, Verarbeitungselektronik) beträchtlich. Viele Detektionsaufgaben lassen sich auf eine örtliche und zeitliche Selektion der ausgesendeten und über den zu erfassenden Gegenstand reflektierten Schallanteile zurückführen. Die differenzierte Gestaltung der Richtcharakteristik mit Hilfe von Mehrelementanordnungen und die zeitlich gestaffelte Bewertung nach der Impulsecholotmethode geben dazu einen genügend großen Spielraum. Auf eine mikrorechnergestützte Informationsaufbereitung und -auswertung dürfte in keinem Fall verzichtet werden.

#### 3.4. Weitere mögliche Meßaufgaben

Die Intensitätsschwächung des Schalls beim Durchdringen landwirtschaftlicher Stoffe kann genutzt werden, um z. B. Stoffkennwerte, Qualitätsparameter von Nahrungsgütern oder den Durchsatz von losem Schüttgut zu bestimmen. In der landtechnischen Forschung werden mit Ultraschallsensoren auch Elastizitätsmodule an Getreidepflanzen, die Körperzusammensetzung lebender Tiere oder der Milchdurchfluß gemessen [25].

#### 4. Erhöhung der Störfestigkeit bei der Informationsauswertung

Der Einfluß der Reflexionsbedingungen der Abtastobjekte (Ackerboden, Pflanzen u. a.) und eventueller Störgeräusche auf den Meßvorgang kann durch die Wahl einer zu diesen möglichst entfernt liegenden hohen Arbeitsfrequenz verringert werden. Eine variable Echoverstärkung ist bei Entfernungen größer 2 m und sich stark ändernden Reflexionsbedingungen zweckmäßig. Durch korrelative Auswerteverfahren kann der Signal-/Rauschabstand weiter verbessert werden. Mit variablen Meßzeitfenstern ist beim Impulsechoverfahren die Herkunft der Echos eindeutiger zu identifizieren. Störechos, die nicht im zeitlich-örtlichen Detektionsbereich liegen können, bleiben somit unberücksichtigt. Die zu detektierenden Echos müssen einen Mindestpegel aufweisen und bei vorgegebener Mindestlänge in begrenzten Zeitfenstern auftreten. Mit schmalbandigen dynamischen Frequenzmeßfenstern werden nur Echos ausgewertet, deren Empfangsfrequenz exakt mit der Sendefrequenz übereinstimmt. Bei größeren Meßabständen werden auch Puls kodierverfahren angewendet.

Störstellen und Vielfachechos können ebenfalls durch Meßzeitfenster und den Vergleich der Echoparameter mit bereits zuvor gespeicherten Signalverläufen eliminiert werden. Eine Laufzeitkorrektur ist durch eine Verhältnisbildung zwischen Abstands- und Referenzecho oder durch eine zusätzliche Temperaturmessung und anschließende Fehlerkorrektur möglich [26].

#### 5. Zusammenfassung

Die Analyse des technischen Entwicklungsstands hat gezeigt, daß einige Steuerungsaufgaben an mobilen Aggregaten und deren Werkzeugen luftgekoppelte Ultraschallsensoren erfordern. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeit für eine praxisreife Überführung bereits bekannter Sensorkonzepte wird durch die Bereitstellung robuster, leistungsstarker, reversibel arbeitender, möglichst breitbandiger, mit hoher Arbeitsfrequenz betriebbarer piezoelektrischer Wandlerelemente erheblich erleichtert. In der DDR in größeren Stückzahlen verfügbare piezokeramische Wandler können dafür nur bedingt eingesetzt werden. Eine Weiterentwicklung zu höheren Arbeitsfrequenzen bis 20 kHz, einem besseren Wirkungsgrad und einer schärferen Richtcharakteristik ist möglich. Andere Wandlerprinzipie (Sell, Langevin) sollten für Forschungszwecke durch den wissenschaftlichen Geräte- oder Rationalisierungsmittelbau für vergleichende Untersuchungen angeboten werden. Die Forschungsergebnisse zu Ultraschallsensoren auf der Basis von PVDF-Folien sind als eine mögliche Alternative im Wandlerangebot schnell praxisreif zu überführen, wobei die Probleme der Kapselung zur Industrieumgebung ebenfalls gelöst werden müssen. Die Überführung praxisreifer Sensorkonzepte wird im Vergleich zu optischen Sensoren und Mikrowellensensoren durch das Preis-Leistungs-Verhältnis bestimmt werden. Die Abstandsmessung nach der Impulsecholotmethode bietet die Möglichkeit, Wandlerkopf, Ansteuer- und Vorverarbeitungselektronik sowie den nachfolgenden Meßrechner als Kompaktbaugruppe auszuführen. Mit diesem Grundmodul könnten komplexere Meßsysteme aufgebaut werden. Entwicklungsschwerpunkt für viele mobile Steuerprozesse muß der Abstandssensor sein.

#### Literatur

- [1] Ahrens, F.: Kompaktkameras mit Festkörpersensorelementen zur Steuerung von mobilen Aggregaten und Werkzeugen. agrartechnik, Berlin 38 (1988) 4, S. 160-163.
- [2] Paul, W.; Speckmann, H.: Überblick über grundsätzliche Einsatzmöglichkeiten von Mikroelektronikensensoren in der Landtechnik. Grundlagen der Landtechnik, Düsseldorf 33 (1983) 5, S. 153-158.
- [3] Führer, U.: Ultraschallentfernungssensoren. Messen + Prüfen/Automatik, Bad Wörishofen (1986) 10, S. 620-623.
- [4] Aschmoneit, E.-K.: Fahrzeugtechnik: Ultraschallwarner für Rückwärtsfahrt im Auto. Elektronik, München (1986) 22, S. 48-50.
- [5] Massa, F.: Ultrasonic Transducer for Use in Air (Ultraschall-Wandler für die Anwendung in Luft). Proc. of the IEEE, New York 53 (1965) 10, S. 1363-1371.
- [6] Key, L.: Airborne ultrasonic imaging of a robot work space (Luftgekoppelte Ultraschall-Erkennung für Industrieroboter). Sensor Review, Bedford 5 (1985) 1, S. 8-12.

- [7] Kleinschmidt, P.; Magori, V.: Ultrasonic Remote Sensors of Noncontact Object Detection. Siemens-Forschungs- und Entwicklungsberichte, Berlin (West) 10 (1982) 2, S. 110-118.
- [8] Ahrens, F.: Aufbau und Erprobung einer Pflugfurchen erfassenden akustischen Meßeinrichtung zur automatischen Lenkung landwirtschaftlicher Aggregate. Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Dissertation 1981.
- [9] Magori, V.: Ultraschall-Distanzsensoren zur Objektidentifizierung und Lageerkennung. VDI-Bericht, Düsseldorf (1984) 509, S. 27-31.
- [10] Thiele, P.: Hinweise zum Einsatz des Ultraschallwandlers, HZ Applikation. TU Karl-Marx-Stadt, Sektion Automatisierungstechnik, 1987.
- [11] Thomas, C.: Berührungslös arbeitende Abstandssensoren in der Landtechnik. Grundlagen der Landtechnik, Düsseldorf 34 (1984) 3, S. 125-132.
- [12] Sullivan, J. A. O.: Evaluation of a Polaroid Ultrasonic Proximity Transducer (Entwicklung eines Polaroid-Ultraschall-Abstandswandlers). Journal of Agricultural Engineering Research, London 34 (1986) 1, S. 63-73.
- [13] Murphy, B. R.: Networked microcomputer for feedback control systems: A case study in automatic steering (Mikrocomputernetze für rückgekoppelte Steuersysteme: Eine Übersichtsstudie zur automatischen Steuerung). ASAE-Paper No 84-1079, St. Joseph, Mich. (1984).
- [14] Biehl, K.-E.: Für den rauen Industriebetrieb: Ultraschall-Entfernungssensor. Elektronik, München 19 (1983) 30, S. 113-115.
- [15] Dyck, F. B.: Automatic depth control for cultivators and seeders (Automatische Tiefenkontrolle für Kultivatoren und Saatgeräte). Proc. of the Agri-Mation 1, Chicago (USA) vom 25. bis 28. Februar 1985.
- [16] Knöchel, G.; Schuch, R.: Aufbau und Arbeitsweise eines Musters der Automatisierungsbaugruppe „Automatische Fallhöhenanpassung“. agrartechnik, Berlin 32 (1982) 8, S. 346-348.
- [17] Thelen, W.; Neher, A.: Weg- und Geschwindigkeitsmessung mittels Ultraschall-Dopplerverschiebung, vorzugsweise für landwirtschaftliche Fahrzeuge. Grundlagen der Landtechnik, Düsseldorf 35 (1985) 2, S. 40-42.
- [18] Speckmann, H.; Jahns, G.: Grundlagen zur Geschwindigkeitsmessung auf fahrenden landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen. Grundlagen der Landtechnik, Düsseldorf 36 (1986) 3, S. 78-86.
- [19] Auta, D.: Blindenorientierungshilfe mit Ultraschallortungsverfahren und hörbarer Anzeige. acustica, Stuttgart 30 (1974) 2, S. 67-80.
- [20] Radowizki, A. L.: Ultrazvuk kak sredstvo avtomatičeskoj (Ultraschall-Geber für die automatische Steuerung). Traktory i sel'chozmašiny, Moskva 40 (1967) 7, S. 21-23.
- [21] Mc Mahon, C. B.; Tennes, B. R.; Burkhardt, T. H.: Development of apple harvester microprocessor - based steering control system utilizing noncontact sensing (Entwicklung eines Mikrorechner-Apfelpflückers, basierend auf einem Steuerkontrollsystem mit berührungslösen Sensoren). ASAE-Paper No 82-1053, St. Joseph, Mich. (1982).
- [22] Ahrens, U.: Möglichkeiten und Probleme der Anwendung von Luft-Ultraschallsensoren in der Montage- und Handhabungstechnik. Robotersysteme, Berlin (West) (1985) 1, S. 19-28.
- [23] Klee, B. J.: Economic value of precise particle size (Kostengünstiges Gerät für die Teilerkennung). Measurement and Control, London 28 (1976) 19, S. 35-38.
- [24] Langer, M. J.; Kurfürst, W.: Einsatz von Sensoren zur Absicherung des Rückraums von Großfahrzeugen. Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Forschungsbericht Nr. 405, Dortmund (1985).
- [25] Uhlig, T.: Messung des Durchsatzes von losem Schüttgut mit Hilfe von Ultraschall. agrartechnik, Berlin 29 (1979) 7, S. 308-310.
- [26] Neuenfeld, D.: Möglichkeiten der Erhöhung der Meßgenauigkeit und Störfestigkeit von Ultraschall-Distanz-Sensorsystemen. Feingeräte-technik, Berlin 34 (1985) 8, S. 339-341. A 5465