

Kompaktkameras mit Festkörperbildsensorelementen zur Steuerung von mobilen Aggregaten und Werkzeugen

Dr.-Ing. F. Ahrens, Ingenieurhochschule Berlin-Wartenberg, Sektion Mechanisierung der Pflanzenproduktion

1. Einleitung

Der Stand und die Entwicklungstendenzen strahlungstechnischer Sensoren zur Steuerung von mobilen Aggregaten und Werkzeugen wurden bereits analysiert [1]. Dabei konnte nachgewiesen werden, daß für viele Automatisierungsaufgaben an mobiler Landtechnik die benötigten Prozeßmeßgrößen vorteilhaft mit optischen Verfahren erfaßt werden können. Der Positionsbestimmung über oder zu Bearbeitungsgrenzen für die automatische Lenkung kommt eine besondere Bedeutung zu. Bekannt gewordene Meßverfahren werten dabei die durch Wechselwirkung zwischen dem Tageslicht oder einer künstlichen Lichtquelle und dem Meßobjekt (z. B. Ackerboden, Pflanzen, Pflanzenteile u. a.) entstehenden signifikanten Unterschiede der remittierten optischen Strahlung mit Hilfe lichttechnischer Parameter (Lichtstärke, Leuchtdichte oder stoffabhängiger Remissionsgrad) aus.

Sensoranordnung und Informationsverarbeitung müssen so aufeinander abgestimmt werden, daß sich die durch die Bearbeitungsart entstehenden typischen Unterschiede innerhalb des Abtastbereichs im Remissionsverhalten als signifikant widerspiegeln und über eine Merkmalsextraktion nachweisbar sind. Sich stark ändernde Beleuchtungsverhältnisse und z. T. gegenläufig den Remissionsgrad bestimmende Boden- und Vegetationsparameter können die Meßwerterfassung stören.

In einigen Anwendungsfällen, wie z. B. bei der Applikation von Flüssigkeiten, wird vorgeschlagen, die an der Bearbeitungsgrenze unterschiedlich remittierten, nicht sichtbaren infraroten Strahlungsteile auszuwerten [2]. Das schwierige Problem der Positionsbestimmung von mobilen Aggregaten zu Bodenbearbeitungsgrenzen bzw. von Werkzeugträgern und Werkzeugen zu Pflanzenreihen oder Pflanzenteilen konnte mit

Einzelelementen (Fotoelemente, -dioden, -transistoren u. a.) als optoelektronische Wandler sowie relativ einfacher Informationsauswertung (analoge Rechenschaltungen) für den sichtbaren Spektralbereich nicht befriedigend gelöst werden [3, 4]. Erfolgversprechender dürften für die Lösung dieser Meßaufgabe die komplexeren Verfahren der optischen Bildaufnahme und -verarbeitung sein. Kompaktkameras sollen dabei den Nahbereich (1 m bis 10 m) um das mobile Aggregat oder den Werkzeugträger abtasten, in dem sich der während der Bearbeitungsphase vom Lenken zu entlastende Mechanisator auch „sehend“ orientiert. Der bereits erreichte hohe Entwicklungsstand mikroelektronischer Bauelemente und leistungsstarke Softwarealgorithmen erschließen für optische Sensoren breitere Anwendungsbereiche sowie eine unter Praxisbedingungen zuverlässige Funktionsweise. Erste Publikationen zur automatischen Steuerung

Bild 1. Optisches Verfahren nach dem Triangulationsmeßprinzip zur Positionsbestimmung über Furchen;
a) Meßprinzip, b) Blockschaltbild

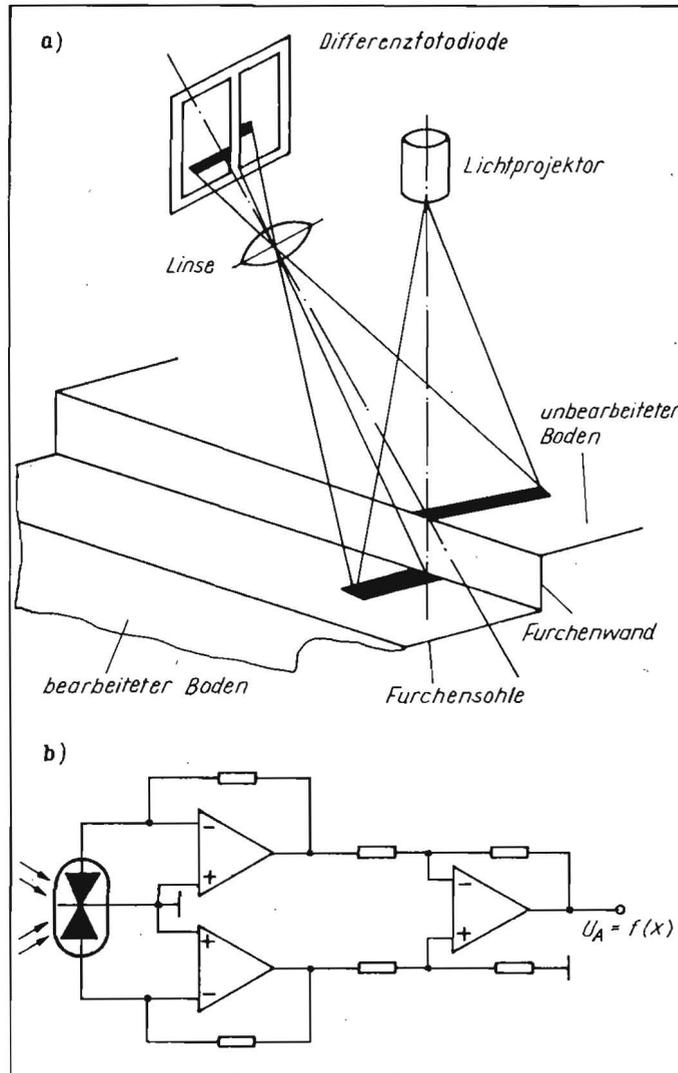
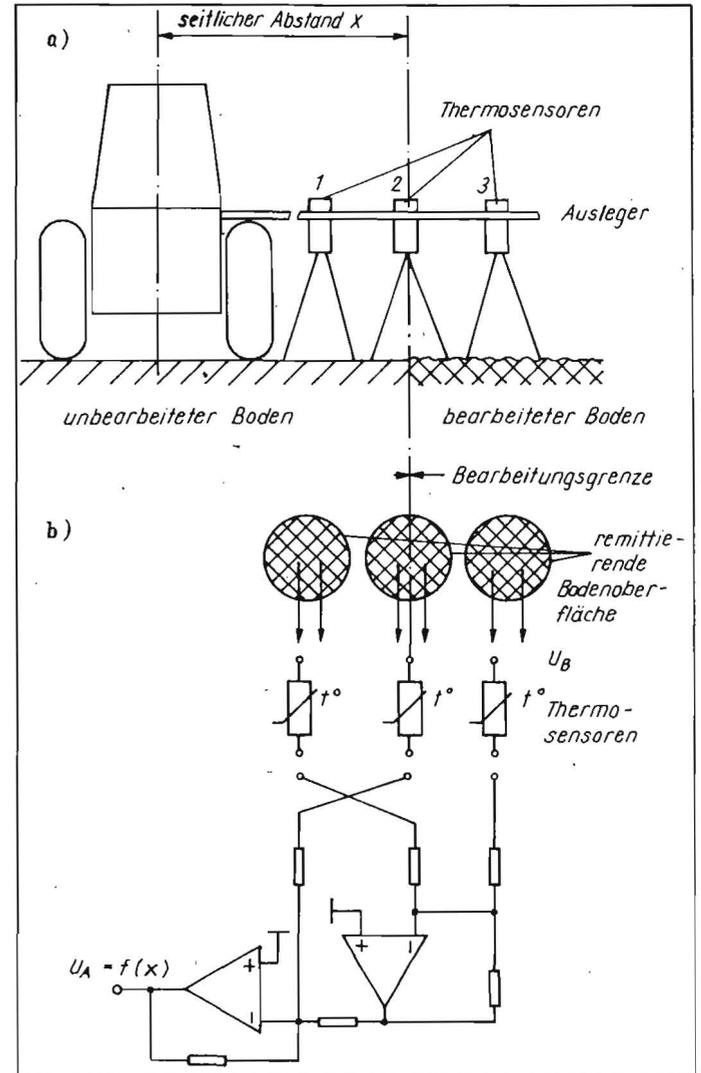


Bild 2. Optisches Verfahren nach dem Intensitätsmeßprinzip zur Positionsbestimmung über Bodenoberflächen bei der Flüssigkeitsapplikation;
a) Meßprinzip, b) Blockschaltbild



Tafel 1. Auswahl nachnutzungsfähiger CCD-Kamerasysteme zur optischen Bildverarbeitung (MR Mikrorechner)

Bezeichnung	Parameter	Institution
abgesetzter Kamerakopf LK 256 ¹⁾ LKK 256	Binärbildverarbeitung L 110, L 110 für bewegte Systeme	TH Ilmenau
LK 1024 LKK 1024	L 133, L 133 für bewegte Systeme	
ZFK 1021 1040	L 110 L 133 Grauwertbildverarbeitung	Studiotechnik Berlin
CCD-FER ¹⁾	L 110, ADU	VEB FER Magdeburg WPU Rostock
ZZK-2 ²⁾	2 × L 110, ADU, Bildprozessor	
MKS 22/1	L 211, ADU, Bildprozessor	ZKI Berlin
Kompaktkamera ZFK 1031	Binärbildverarbeitung L 133 ohne MR	Studiotechnik Berlin
CCD 133 A ¹⁾	L 133 ohne MR	ZDE Berlin-Buch
CCD 211 ²⁾	L 211 ohne MR	
TS-ILK 01	L 110 mit UB8820	TH Ilmenau

1) bereits aufgebaut und erprobt, 2) wird aufgebaut
FER Forschungsinstitut für Entwicklung und Rationalisierung, ZKI Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, ZDE Zentrale Dienstleistungseinrichtungen

von Landmaschinen mit Kompaktkameras bestätigen diesen Trend [5]. Gegenüber herkömmlichen Bildaufnahmeröhren haben Festkörperbildsensorelemente meist bei gleicher geometrischer Auflösung eine exakte Bildpunktzuordnung, geringere Übernahmeverzerrungen, eine geringere Leistungsaufnahme, eine kleinere Masse, ein kleineres Volumen und sind robuster gegen mechanische Belastungen, so daß sie unter den rauen Praxisbedingungen an mobiler Landtechnik besser einsetzbar sind.

2. Stand und Entwicklungstendenzen

In der Vergangenheit wurden für eine „Quasibildverarbeitung“ punktförmige Sensorelemente, wie z. B. Fotowiderstände oder -dioden, zeilen- oder matrixförmig zusammengeschaltet und leitlinienbezogene Sensorkonzepte aufgebaut [6]. Erst die Entwicklung auf dem Gebiet der Festkörperbildsensoren als linien- oder flächenhafte Mehrfachelementanordnungen eröffnet neue Möglichkeiten für eine „echte Bildverarbeitung“. Sie wird international z. Z. hauptsächlich durch die Fotoapparate-, Fernsehkamera- und Videotechnikindustrie bestimmt. Zukünftig werden in derartigen Kamerasystemen CCD-Zeilen und -Matrizen dominieren [7]. Ihre Weiterentwicklung ist vor allem gekennzeichnet durch

- Erhöhung der Auflösung der Sensorelemente (z. Z. 4 Mill. Bildpunkte auf 5 cm² Chipfläche)
- Erhöhung der Auslesefrequenz (> 20 MHz)
- Entwicklung von farb- und infrarotempfindlichen Sensorelementen, einschließ-

lich kombinierter Helligkeits- und Farb-CCD-Anordnungen sowie dreidimensional „sehender“ Sensorelemente

- Vergrößerung der Überstrahlungsfestigkeit (bis zum Faktor 100 über dem Sättigungspegel)
- extreme Miniaturisierung der Kameras (z. Z. Masse ≈ 70 g, Volumen 66 × 111 × 69 mm³)
- sensornahe Informationsverarbeitung mit komfortabler Digitalschnittstellengestaltung (Einsatz von Signalprozessoren und 16-Bit-ADU mit Lichtwellenleiterkopplungsmöglichkeit)
- Einsatz von Miniaturobjektiven mit automatischer Blenden- und Entfernungsregelung
- Kühlung des Sensorelements mit Peltierelementen zur Rauschminderung [8].

Zunehmende Bedeutung für die Positionsbestimmung (x-y-Erkennung von Werkstücken) gewinnen auch Großflächendioden als positionsempfindliche Detektoren (PSD), die in Differential-, Ring- bzw. Quadrantenanordnungen ausgeführt werden. Meßprinzipbedingt sind lichtstarke, das Tastobjekt punktförmig bestrahlende Quellen (z. B. Laserlicht) und diffus reflektierende homogene Oberflächen erforderlich. Abbildungsverzerrungen an den Kanten und Fehler durch Schwankungen eines prinzipbedingten, stark einzugrenzenden Meßbereichs erfordern trotz einfacher Signalverarbeitung Korrekturrechner [9]. Diese Sensorelemente sind für den Aufbau von Kameras zur Positionsbestimmung über landwirtschaftlichen Flächen deshalb ungeeignet.

Mit großflächigen Differenzfotodioden könnte über eine Triangulationsmessung mit künstlicher Linienstrahlquelle die Position über Pflugfurchen oder Kartoffeldämmen analog erfaßt werden, wobei unter Einsatzbedingungen bei höheren Fahrgeschwindigkeiten die bereits bekannten Probleme entstehen werden (Bild 1) [10].

Mit einfacher Informationsverarbeitung wäre an Bearbeitungsgrenzen, die bei der Flüssigapplikation (Herbizide, Dünger, Gülle u. a.) entstehen, der Einsatz von miniaturisierten thermischen Strahlungssensoren als Einzellelemente im Gleichlichtbetrieb denkbar (Bild 2). Sie haben ungekühlt im Niedertemperaturbereich eine hohe Empfindlichkeit. Der Spektralbereich von 0,6 bis 40 µm kann durch unterschiedliche Fenstermaterialien (KRS-5, Si, CaF₂, Quarz) eingegrenzt werden. Diese Thermosensoren sind robust, hermetisch gekapselt, zuverlässig, langzeitstabil und preiswert [11]. Prinzipielle Einsatzmöglichkeiten werden z. Z. geprüft. Für höhere geometrische Auflösungen und Verfahren der Bildauswertung wurden für den Infrarotbereich (8 bis 14 µm) als Labormuster bereits entsprechende Arrays (16 × 2 Bildpunkte) entwickelt [12]. Prinzipiell sind für die zu lösende Aufgabe CCD-Zeilen oder -Matrizen vorteilhafter und multivalenter einsetzbar. Ihre Mikrorechnerkompatibilität ermöglicht eine optimale Arbeitsweise zwischen der Bildaufnahme (Belichtung, Zwischenspeicherung, Datentransport und -vorverarbeitung) und der anschließenden digitalen Bildverarbeitung. Die digitale Bildverarbeitung mit Festkörpersensorelementen erobert somit zunehmend den Bereich der industriellen Automatisierungstechnik, speziell der Robotertechnik, die ebenfalls durch prozeßnahe „Fernsensoren“ zu steuern ist. Die zu entwickelnden Prototypen von optoelektroni-

schen Sensoren müssen bei geringeren Kosten (vor allem durch den Hardwareaufwand bestimmt) die gestellte Aufgabe optimal lösen, so daß neuartige unkonventionelle Bildverarbeitungsmethoden erarbeitet werden müssen, die die Fähigkeit des Sensorsystems vorerst auf das absolut Notwendige einschränken.

3. Sensorkonzeption

3.1. Voraussetzungen

Für den Einsatz an mobiler Landtechnik ist eine Kompaktkamera – d. h. Objektiv, Sensorelement, Takterzeugung, Videoverstärker und Informationsauswertung sind an und in einem Gehäuse untergebracht – zu konzipieren, deren Schnittstellen so ausgelegt sind, daß sie als eigenständiges Automatisierungsmittel fungieren kann und auf eine Kopplung zu einem übergeordneten Rechner (Bordcomputer) vorerst verzichtet wird, die aber vorbereitet ist. Die Gehäusekonstruktion ist so auszuführen, daß die Funktionssicherheit auch bei der zu erwartenden Schwing- und Stoßbelastung sowie der Temperatur- und Staubbeanspruchung gewährleistet ist. Das Forschungsmuster sollte mit nur wenigen Betriebsspannungen versorgt werden, einen problemlosen Austausch von industriellen oder kommerziellen Standardobjektiven ermöglichen sowie eine einfache Justierung der Abbildungsgeometrie gewährleisten. Alle für Labor- und Felduntersuchungen auszuwertenden Signalinformationen sollten extern abgreifbar sein. Abbildungsmaßstab und Genauigkeit müssen den technischen Anforderungen genügen. Störungen durch extreme Tageslichtschwankungen müssen durch eine geeignete Empfindlichkeitsanpassung unterdrückt werden. Die Stromversorgung muß auch aus dem mobilen Bordnetz erfolgen können.

Die in der DDR bekannt gewordenen Konzeptionen zu CCD-Kameras und Bildererkennungssystemen wurden anwendungsbezogen überprüft [13]. Nachnutzbare und geeignet erscheinende Lösungen wurden aufgebaut und in Grundlagenuntersuchungen erprobt (Tafel 1). Im Ergebnis entstand zu ähnlichen Vorschlägen [14] eine eigene Hardwarelösung als Kompaktvariante, bei der neben dem Sensor die Aussteuerlektronik, der Videoverstärker, die Abtast-Halteschaltungen und ein Einchipmikrorechner in einem Gehäuse integriert wurden. Sie werden bei Anwendung der Binärbildverarbeitung den hohen prozeßdynamischen Anforderungen des mobilen Feldeinsatzes besser gerecht; außerdem wird eine ausreichende geometrische Auflösung erzielt, die billiger ist.

3.2. Hardware

Die realisierte und z. Z. überhaupt praktikable Kompaktvariante einer CCD-Kamera mit Einchipmikrorechner ist bezüglich der Rechengeschwindigkeit und dem Speicherplatzangebot stark begrenzt (Bild 3). Verfügbare CCD-Schaltkreise L 110 (256 Bildpunkte) und L 133 (1024 Bildpunkte) benötigen für die Analog/Digital-Wandlung eines Bildpunktes in 8 oder 10 Grauwertstufen 20 bis 30 µs. Wird berücksichtigt, daß sich für die automatische Lenkung des ZT 303 mit einem Mikrorechnerregler auf der Basis U880 eine Abtastrate von 8 Bit/25 ms bis zu Fahrgeschwindigkeiten von 30 km/h als ausreichend erwiesen hat, würde bereits bei 1024 Bildpunkten mit 20 bis 35 ms für die A/D-Wandlung keine Zeit für die Bildverarbei-

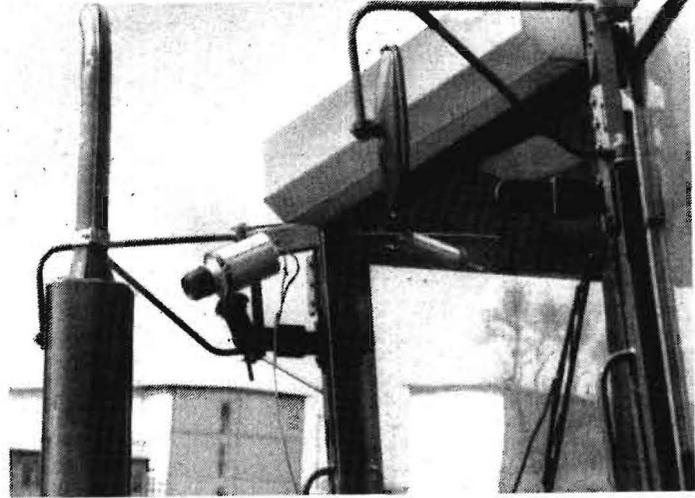
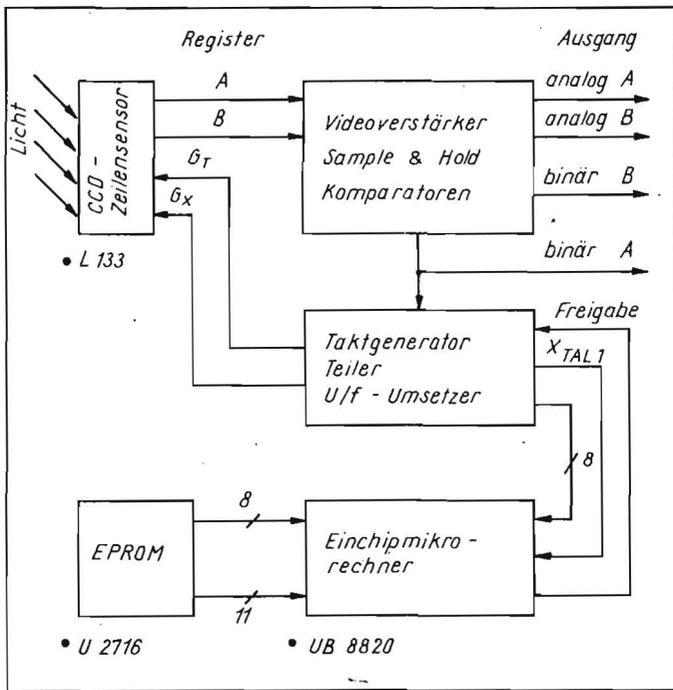


Bild 5. Befestigung der Kompaktkamera an der Fahrerkabine des Traktors ZT 323

Bild 4. Kompaktkamera mit Sensorzeile L133, Einchipmikrorechner UB8820 und Objektiv

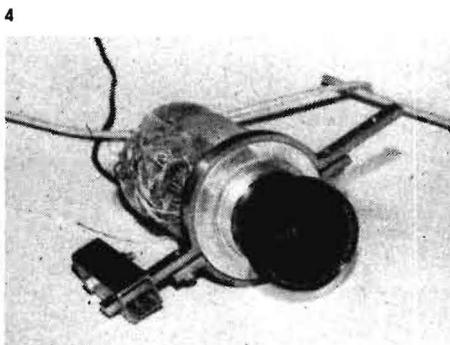
Bild 3. Blockschaltbild der Kompaktkamera

ung, Stellsignalberechnung und -ausgabe verbleiben. Deshalb ist eine entscheidende Datenreduktion nur durch Binarisierung der Grauwertbildsignale möglich, die einfach und schnell durch eine feste Belichtungszeit für die CCD-Zeile und eine variable Komparatorschwelle (auch mehrere Komparatorstufen) realisiert werden kann. Das Binarisierungsverfahren ist nur anwendbar, wenn die analogen Bildsignale an der Bearbeitungsgrenze einen hinreichenden Kontrastunterschied aufweisen. Die Anpassung der Kamera als Meßeinrichtung an unterschiedliche Objektentfernungen, Objektgrößen und Lichtstärken kann grob durch entsprechende Objektive, d. h. durch Brennweite, Entfernungs- und Blendeneinstellung, vorgenommen werden (Bild 4).

Für die Realisierung des erforderlichen regeltechnischen Vorhalts, einer ausreichenden Meßgenauigkeit und einer minimalen maschinendynamischen Beanspruchung ist der Befestigungspunkt am Aggregat maßgebend (Bild 5). Die Anpassung an unterschiedliche technologische Aufgaben (Pflügen, Wiesenumbruch, Stoppeln, Saatbettbereitung u. a.) erfolgt zweckmäßigerweise durch Vorgabe geeigneter Softwarealgorithmen (Assemblerniveau) für die Informationsverarbeitung.

3.3. Software

Das Programm für den Einchipmikrorechner ermittelt den Fahrkursabstand, d. h. den projizierten geometrischen Abstand der Kamera und damit des Aggregatschwerpunkts, mit



dem sie starr verkoppelt ist, beim Pflügen z. B. zur Furchenkante als Leitlinie.

Die der Beleuchtungsstärke proportionalen Spannungen der CCD-Bildpunkte werden durch eine fest einzustellende Komparatorschwelle und die durch den Prozessor zu steuernde Integrationszeit binarisiert. Durch die Fahrbewegung entsteht bei zeilenförmiger Abtastung des Furchenbereichs ein flächenhaftes Binärbild mit entsprechendem Zeilenabstand, der von der Abtastgeschwindigkeit abhängt und die Programmlaufzeit festlegt (Tafel 2). Bei einer Fahrgeschwindigkeit von z. B. 10 km/h und einem Zeilenabstand von 10 cm beträgt die verfügbare Programmlaufzeit 35 ms. Ist die Furchensohle der dunkelste Bildbereich, kann bei fester Komparatorschwelle die Integrationszeit der Zeile so geregelt werden, daß nur wenige „schwarze“ Bildpunkte entstehen. Der erste Binärübergang gibt dann idealisiert die Position der Furchenkante an, wenn das optische System zuvor so über der Furche positioniert wurde, daß die Furchenkante im Abtastbereich der Sensorzeile liegt. Wird der entsprechende logische Übergang im Arbeitsspeicher des Prozessors abgelegt, halbieren die Binärbilddaten den Speicher mit steigender oder fallender Adresse, wenn keine Fahrkursabweichung vorliegt und sich die Furchenkante in der Bildmitte befindet. Verschiebungen dieser Information im Arbeitsspeicher geben die Richtung und die Größe der Fahrkursabweichung an. Sind keine oder zu viele „schwarze“ Bildpunkte vorhanden, wird die Integrationszeit (Belichtung für die Sensorzeile) im nächsten Abtastzyklus so gesteuert, daß sich wieder optimale Auswertebedingungen einstellen, und die vorhergehende Messung annulliert. Neben der Blendenwahl ist mit diesem Verfahren eine zusätzliche Empfindlichkeitsanpassung an die jeweiligen Beleuchtungsverhältnisse möglich [15].

Da unter Praxisbedingungen ungünstigere Beleuchtungsverhältnisse vorliegen können, sind Verfahren zur optimalen Vorgabe geeigneter Binarisierungsschwellen sowie Algorithmen der statistischen Mittlung zu implementieren [16].

Bei ausreichender Speicherplatzkapazität können der erforderliche Regelalgorithmus und die Stellsignalausgabe ebenfalls programmtechnisch realisiert werden. Die Reserven und der mögliche Programmfumfang werden in Felduntersuchungen ermittelt. Für eine weitere Kontrasterhöhung an Bearbeitungsgrenzen wird auch der Einsatz von optischen Filtern geprüft.

4. Ausblick

Die Beschränkungen des Hardwareaufwands auf ein Kompaktkamerakonzept mit Binärbildverarbeitung, die durch die hohen Echtzeitanforderungen des zu automatisierenden Prozesses (automatische Lenkung) vorgegeben sind, können zukünftig nur überwunden werden, wenn höhere Auslesefrequenzen, größere Speicherkapazitäten und schnellere A/D-Umsetzungen eine Echtzeit-Grauwertbildverarbeitung erlauben. Ansatzpunkte dazu liefert die Entwicklung von optischen Kompaktsensoren, deren Kameraelektronik als dreidimensionaler Chip, bestehend aus CCD-Matrix, A/D-Umsetzer, RAM, Mikrorechner und D/A-Umsetzer, ausgeführt wurde [8].

Kostengünstigere Konfigurationen lassen sich auch mit einem „Optic RAM“ (dynamischer 64-K-RAM mit optischem Fenster) aufbauen, der eine Auflösung von 256 x 256 Bildpunkten aufweist, dessen Integrationszeit

Tafel 2. Echtzeitanforderungen

Fahrgeschwindigkeit km/h	abtastender Zeilenabstand cm	mögliche Programmlaufzeit ms
5	10	≈ 70
	20	140
	30	210
10	10	35
	20	70
	30	105
15	10	24
	20	48
	30	72

