

Dr. rer. nat. Boris Lux, Dipl.-Ing. Dieter Pferner  
Dipl.-Ing. Uwe Eschke

## Die Kantendarstellung verbessern

### Neues Schaltungskonzept wertet CCD-Zeilen-Signale aus

Die bei CCD-Zeilensensoren zur Kantenerkennung von Objekten angewandten Schwellwertverfahren besitzen den Nachteil, daß sie wesentlich von der zeitlichen und örtlichen Güte der Beleuchtung, der Abbildungsqualität und der Schwellwertparameter abhängen. Zusätzlich bedingen Schwellwertverfahren den Verlust der in der Kantennähe als Grauwerte gewonnenen Informationen. Doch es geht auch wesentlich besser. Anwendungen gibt es beispielsweise in der Qualitätssicherung.

Eine Lösung stellt der Einsatz eines A/D-Umsetzers sowie die rechnerseitige Verarbeitung dar. Hier konnten bereits beachtliche Ergebnisse durch effektive Algorithmen erreicht werden [1].

Die hier vorgestellte, kostengünstige Schaltung (Bild 1) dient der vom Zeilentyp unabhängigen Umwandlung eines CCD-Zeilen-Signals in ein binäres Signal, in welchem jeder Bildkante, die über einen ausreichenden Signalgradienten verfügt, genau eine Low-High-Flanke zugeordnet ist. Dieses Bildkantensignal unterscheidet sich vom Signal einer Schwellwerterschaltung dahingehend, daß

- alle im CCD-Zeilen-Signal vorkommenden Kanten gleich dargestellt sind und so eine beliebige, kombinatorische Weiterverarbeitung ohne Signalverfälschung erfolgen kann;
- die Lage der Kanten auch innerhalb einer Pixelbreite aus den Grauwerten der benachbarten Pixel exakt ermittelt wird;
- die Low-High-Flanke zu einem Spike gehört, dessen endliche Länge die Kantentrennschärfe bestimmt.

Die Schaltung erkaufte allerdings die „Sub-Pixel-Auflösung“ sowie die variable Kombinatorik mit einer eingeschränkten Meßbereichsdynamik und dem Verlust von Kantenzusammengehörigkeiten.

#### Wie die Schaltung arbeitet

Aufgabe der Filterschaltung ist es, die Lichtintensitätsverteilung im Bildfeld in den Gebieten der Bildkanten unter Ausnutzung der ermittelten Übertragungseigenschaften und der Grauwerte im Bildsignal so zu rekonstruieren, daß die „Sub-Pixel-Auflösung“ möglich wird.

Die CCD-Zeile wandelt eine örtliche Lichtintensitätsverteilung  $I(x)$ , die durch ihr Ortsfrequenzspektrum  $m(R)$  charakterisiert ist, in eine zeitliche Signalspannungsverteilung  $U(t)$ , welche durch ihr Frequenzspektrum  $v(f/f_a)$  beschreibbar ist (Bild 2). Die die Optik und die Geometrie der CCD-Zeile beschreibende Modulationsübertragungsfunktion  $M(R)$  (abgekürzt MÜF) geht damit in den die elektrische Signalübertragung beschreibenden Frequenzgang  $V(p)$  über. Beide Übertragungsfunktionen geben an, mit welcher Amplitude und Phase die einzelnen Anteile einer Signalfrequenzanalyse durch das Übertragungsglied wiedergegeben werden.

Für das verwendete Objektiv Tessar 4/24 liegt die beugungsbegrenzte MÜF  $M_{\text{beu}}(R)$  deutlich oberhalb der durch die Geometrie der CCD-Zeile festgelegten maximal erzielbaren MÜF  $M_{\text{ccd}}(R)$ :

$$M_{\text{beu}}(R) = 2/\pi \cdot (\arccos N - N \cdot \sqrt{1 - N^2}) \quad (1)$$

mit

$$N = \lambda \cdot R / (2 \cdot NA)$$

$\lambda$ : Schwerpunktwellenlänge des Lichtes

NA: numerische Apertur des Objektivs

$$M_{\text{ccd}}(R) = \sin(\pi \cdot M) / (\pi \cdot M) \quad (2)$$

mit

$$M = R/R_o$$

R: Ortsfrequenz

$R_o$ : 1/Pixelmittenabstand

$$M(R) = M_{\text{ccd}}(R) \cdot M_{\text{beu}}(R) \quad (3)$$

Die real vorliegende MÜF der Gesamtanordnung „Objektiv – CCD-Zeile – Videosignalerzeugung“ wurde

aus der experimentell gemessenen Kontrastübertragungsfunktion für eine optimale Scharfstellung des Objektivs nach [2] berechnet. Diese ist aufgrund der alleinigen Intensitätsaufzeichnung in der CCD-Zeile nur reell (Bild 3). Mit dem Bildpunkttakt der CCD-Zeile ergibt sich eine reelle Beziehung zwischen der MÜF und dem Frequenzgang, der erst durch die elektronische Schaltung komplexen Charakter bekommt.

Ziel der Filterschaltung ist es, die Dämpfung im mittleren Frequenzbereich (0,1–0,3) anzuheben und damit die Gesamtübertragungsfunktion einem Rechteckspektrum mit der Nyquist-Frequenz  $f_g$

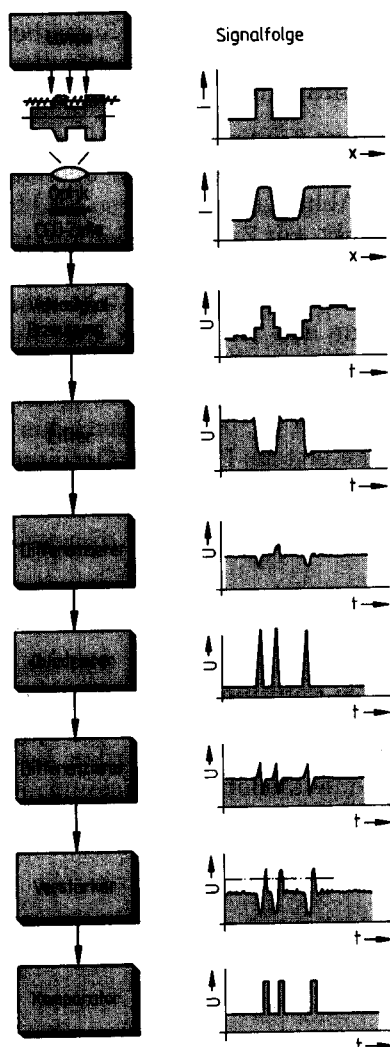
$$f_g = \frac{1}{2} \cdot f_a \quad (4)$$

als Abbruchfrequenz zu nähern. Die Abbruchfrequenz sichert die Einhaltung des Abtasttheorems.

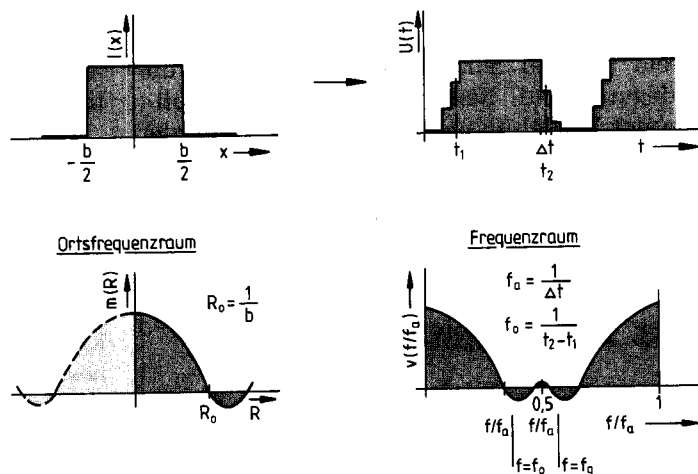
Aufgrund der großen inhaltlichen Nähe wurde in Anlehnung an [3] ein Filter 2. Ordnung für Betrag und

Phase mit der dort vorgestellten Schaltung in einem interaktiven Rechenprogramm dimensioniert und als praktischer Aufbau hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit getestet. Die Übereinstimmung des gemessenen mit dem angestrebten Frequenzgang des Übertragungsgliedes ist ausreichend. In [4] wurden erste Meßergebnisse mit dieser Filterschaltung vorgestellt.

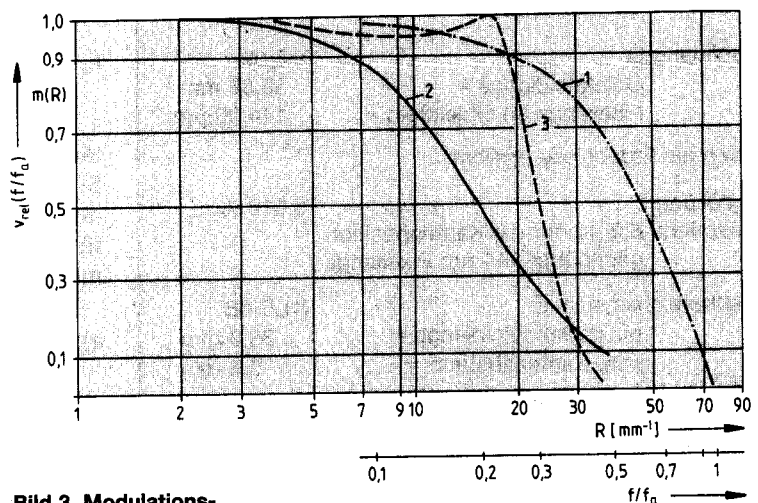
Die Filterschaltung führt zwangsläufig zum Überschwingen an Kantenein- und -ausläufen (Bild 4). Durch die Phasenkorrektur erfolgt dieses Überschwingen symmetrisch zur Kantenlage und wirkt sich auf die Bestimmung der Kantenlage aus dem Wendepunkt nicht verfälschend aus. Zu beachten ist dagegen, daß am CCD-Zeilensignal-Rand bei ausgeleuchtetem Objektfeld das Überschwingen zu Störungen führt, da hier das den „idealen“ Sprung dämpfende optische Filterglied fehlt. Das zwingt zur Einschränkung der sicher auswertbaren Objektfeldlänge auf 90 %.



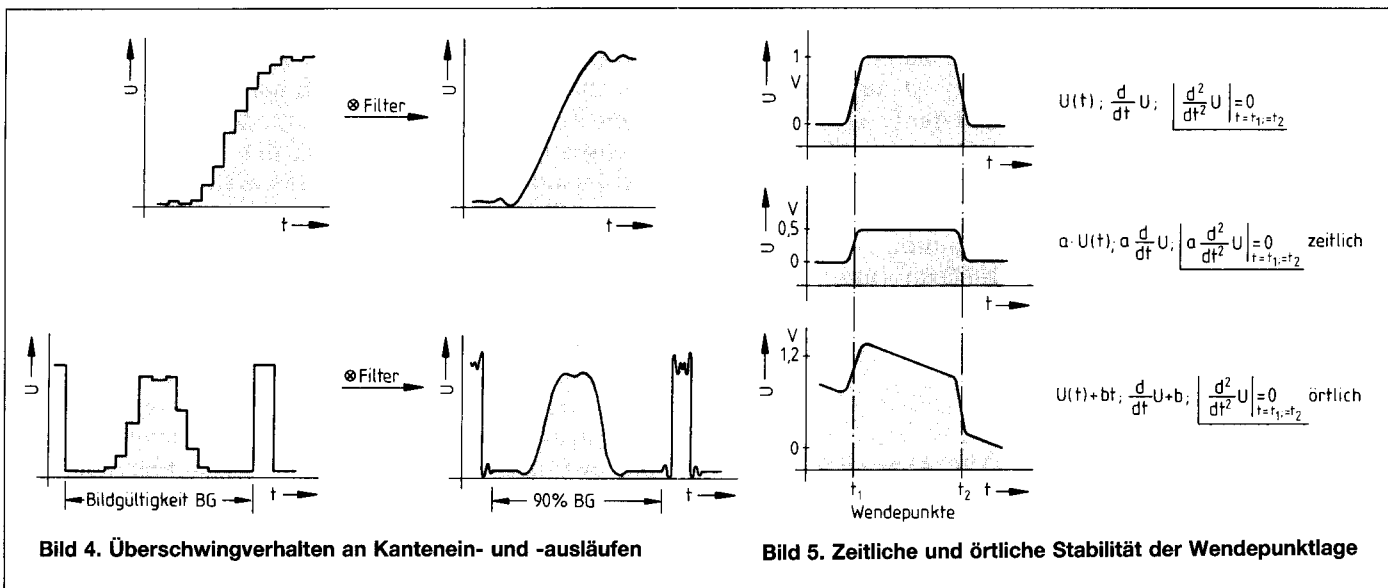
**Bild 1.** Blockschaltung der CCD-Zeilensignalvorverarbeitung zur Kantendetektion



**Bild 2.** Wandlung der Intensitätsverteilung durch die CCD-Zeile



**Bild 3.** Modulationsübertragungsfunktion (MÜF) der CCD-Zeile:  
 1. geometrisch bedingte MÜF;  
 2. gemessener Frequenzgang der Empfängeranordnung;  
 3. durch Filter anzustrebender Frequenzgang



## Differenzierer zur Kantenlage-Definition

Ein Problem bei den Schwellwertverfahren ist die exakte Festlegung und Beibehaltung des Schwell-/Signalspannungs-Verhältnisses zur Kennzeichnung der wahren Kantenlage, da sich diese in Abhängigkeit von zeitlichen und örtlichen Störeinflüssen sowie vom

Kohärenzgrad des Lichtes stark ändert [5]. In Verbindung mit der Spannungskonstanz, der Signalhomogenität und weiteren Einflußgrößen ist eine ständige Neukalibrierung der Meßeinrichtung notwendig.

Verwendet man eine Kantenlage-Definition, die nicht unbedingt mit der wahren Kantenlage übereinstimmt, sondern in linearer Abhängigkeit steht, so sind bei Übergang von der Einpunkt- zur Zweipunktkalibrierung konstantere Bedingungen schaffbar. Die Lage des Wendepunktes des Signals an einer Kante stellt eine solche Kantenlage-Definition dar. Sie zeichnet sich durch eine besondere Stabilität aus, sowohl was die Reaktion auf zeitliche, als auch auf örtliche Veränderung der Meßbedingungen betrifft (Bild 5). Die auftretenden Abweichungen wirken sich erst als Fehler 2. Ordnung aus.

Zur Detektion des Wendepunktes wurde eine übliche Differenzierschaltung (Bild 6) nach [5] dimensioniert:

$$f_a = 1/(2 \cdot R \cdot C) \quad (5)$$

Praktische Untersuchungen belegen, daß die Linearität dieser Kantenlage-Definition auch für eine 24fache Sub-Pixel-Auflösung ausreichend ist. Zur Überprüfung der Linearität der Meßanordnung wurden Kennlinien für drei verschiedene Meßobjektbedingungen experimentell aufgenommen.

a) Helles Meßobjekt:

Abstand zweier Haarliniealkanten  
 Meßbereich: 0,7 mm...24,0 mm  
 Meßpunkte: 58

b) Dunkles Meßobjekt:

Dicke von Parallelendmaßen  
 Meßbereich: 1,0 mm...20,0 mm  
 Meßpunkte: 20

## Was die Schaltung kann

Beim praktischen Einsatz der Schaltung mit den Ausgangsdaten der Meßanordnung:

– CCD-Zeile: 256 Pixel  
 Pixelmittenabstand: 13 µm  
 Bildpunkttakt  $f_a$ : 83,3 kHz  
 Zählfrequenz: 2,0 MHz

– Abbildung  $\beta$ : –0,09  
 Objektfeldlänge = 36,86 mm  
 Pixellänge im Objektfeld = 144,00 µm

wurden als Ergebnisse erreicht:

– Auflösung: 0,016 %  
 entspricht: 6,0 µm für die Kantenposition gegenüber 144 µm Pixellänge

– Meßbereichsdynamik: 31,5 dB  
 max. Meßobjektlänge = 30,0 mm  
 min. Kantenabstand = 0,8 mm  
 entspricht: 37,5 trennbaren Kanten innerhalb 90 % der Objektfeldlänge gegenüber 256 Pixel

Der 24fachen Auflösungserhöhung steht allerdings eine 6,8fach geringere Kantentrennschärfe gegenüber. Für sehr viele Anwendungen stellt das eine akzeptable Leistungsverchiebung des CCD-Zeilensensors dar.

c) Hell/Dunkel-Meßobjekt:

Abstände von Kanten eines 1,6 mm breiten Strichrasters einer Cr-Schablone

Meßbereich: 1,6 mm...25,6 mm

Meßpunkte: 16

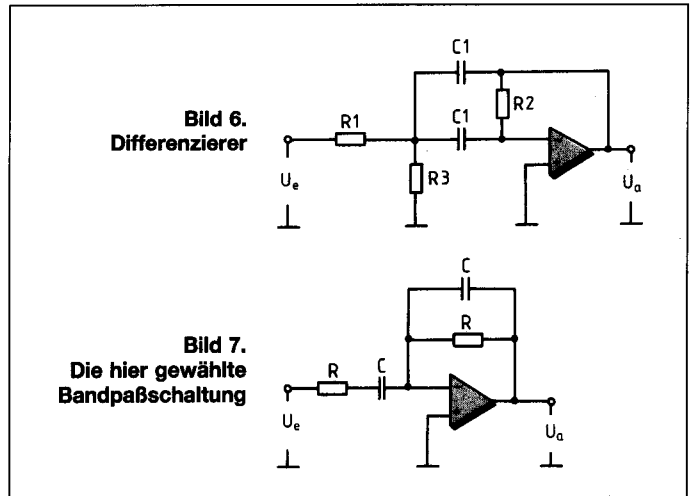
Die mittleren Abweichungen der über die Regressionsgerade berechneten Meßwerte von der wahren Meßobjektgröße

- a)  $\overline{\Delta \hat{x}} = 8,3 \mu\text{m}$
- b)  $\overline{\Delta \hat{x}} = 5,3 \mu\text{m}$
- c)  $\overline{\Delta \hat{x}} = 5,1 \mu\text{m}$

entsprechen der Auflösung des Meßverfahrens und bestätigen eine ausreichende Linearität der Kennlinien. Aufgetretene qualitative Unterschiede in den Abweichungen der Kennlinien von den Regressionsgeraden sind auf die geometrischen Bedingungen der Abbildung (Abweichungen von der Gaußschen Ebene) zurückzuführen.

### Bandpaß als Filter und Differenzierer

Die Einstellung und Einhaltung aller Parameter der Optik, der CCD-Zeile und der Elektronik bei Anwendung des Filters 2. Ordnung erfordern einen relativ hohen Aufwand. Eine Optimierung zwischen der



erreichbaren Sub-Pixel-Auflösung und dem Aufwand erbrachte, daß ein geeignet dimensionierter Bandpaß die Funktion des Filters und des Differenzierers übernehmen kann (Bild 7). Bei der Dimensionierung des Bandpasses nach (6, 7, 8)

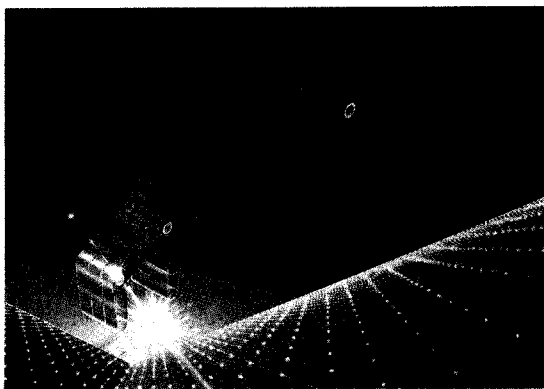
$$f_{\text{res}} = 1/(2 \cdot \pi \cdot C \cdot \sqrt{R2 (R1 \parallel R3)}) \quad (6)$$

$f_{\text{res}}$ : Resonanzfrequenz



## Lernen Sie die neuen Vokabeln für Erfolg. Zum Beispiel: CNC.

Heute wird in vielen Industriebereichen nur noch da verdient, wo so wenig wie möglich getan wird. Per Hand. Effektivität ist das Schlüsselwort. Computergestützte Planungs-, Fertigungs- und Steuerprogramme wie z. B. CAD, CAM, CIM, CNC sind die neuen Vokabeln, die der lernen muß, der die internationalen, hohen Ansprüche erfüllen will. Gelegenheit dazu ist auf der InduTech '90 für alle, die ihre Zukunft mit neuen Methoden selbst in die Hand nehmen wollen.



Hier erleben Sie den greifbaren Fortschritt, die Ideen, die dahinterstecken und die Maschinen, die Sie dazu brauchen, um gleich von Anfang an auf höchstem technologischen Niveau loszulegen. Vom Großunternehmer bis zum Existenzgründer - jede Lösung ist hier vorprogrammiert, Beratung und Erfahrungsaustausch inclusive.



Antriebstechnik  
 Betriebsrichtungen  
 Elektro- Meß- und  
 Handhabungstechnik  
 Maschinen für die  
 Holz- und  
 Kunststoffbearbeitung  
 Hydraulik  
 Maschinen für die  
 Metallbearbeitung  
 Meß- und Prüftechnik  
 Pneumatik  
 Verpackungssysteme

**InduTech '90**  
**Berlin 12.-16. September**  
 Ideen, Maschinen, greifbarer Fortschritt

AMK Berlin Ausstellungs-Messe-Kongress-GmbH  
 Postfach 191740 · Messedamm 22 · D-1000 Berlin 19 · Telefon (030) 3038-0  
 Telex 182908 amkb d · Teletex 308711 = amkb d · FAX (030) 3038-2325

10-18 Uhr, Messegelände Berlin

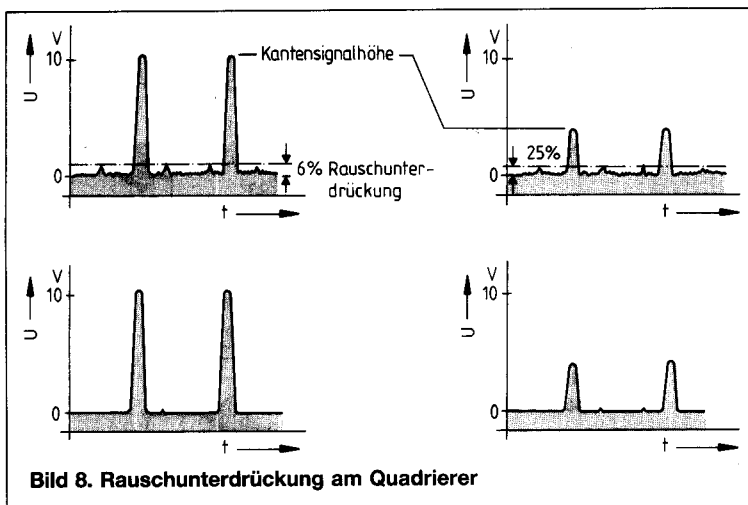


Bild 8. Rauschunterdrückung am Quadrierer

## Quadrierer: verbessert das Auswertesignal

Zur Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses ist dem Bandpaß ein nichtlinearer Verstärker mit einem Rauschbegrenzer angeschlossen. Dieser wirkt in Abhängigkeit von der Lichtintensität und Kantenschärfe in einem Bereich zwischen 6% und 25% der Kantensignalhöhe (Bild 8). Diese Nutzsignalstabilisierung vereinfacht eine weitere Signalverarbeitung und unterdrückt Fehlereinflüsse der unterschiedlichen Pixelempfindlichkeiten, der Meßobjekte, Oberflächenstruktur und Ungleichmäßigkeiten der Beleuchtung, die sich zu scheinbaren Kantensignalen aufschaukeln könnten.

Zur Absicherung der geforderten beliebigen kombinatorischen Signalweiterverarbeitung außerhalb der Schaltung sowie der Anwendung

eines einfachen Spitzenwertlagedetektor wurde der Verstärker als Quadrierer ausgelegt. Damit werden ansteigende, wie abfallende Kanten gleich dargestellt.

## Der Spitzenwert-Lagedetektor

Die Bestimmung der Lage der Signalmaxima wird auf eine Messung der Nulldurchgänge zurückgeführt. Dazu wird das Signal mit einem Bandpaß differenziert. Die Dimensionierung erfolgt in Anpassung an den Bildpunkttakt und den zugelassenen Signalgradienten an den Kanten. Der sich anschließende Verstärker arbeitet mit einer Verstärkung nahe dessen Grenzfrequenz, so daß im Nulldurchgangsgebiet ein konstanter, maximaler und signalunabhängiger Anstieg vorliegt. Dabei ist eine Signalbegrenzung notwendig. In Verbindung mit der durch den Quadrierer erzeugten Kantenäquivalenz ist nach dem Verstärker ein Schwellwertschalter mit einer Schwellspannung oberhalb des Rauschsignalanteils einsetzbar, ohne eine Meßwertverfälschung zu bewirken. An dessen Schwellspannungskonstanz sind aufgrund des konstanten Anstiegs an den Flanken des Signals nur geringe Forderungen zu stellen.

Das Ausgangssignal ist als binäres Signal auch über größere Entfernungen ohne Informationsverlust übertragbar. Insgesamt bewirkt die vorgestellte Schaltung eine Umwandlung eines amplitudenmodulierten Signals in ein frequenzmoduliertes Signal.

$$V_{\text{res}} = -R2/(2 \cdot R1) \quad (7)$$

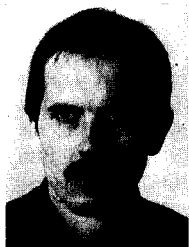
$V_{\text{res}}$ : Verstärkung

$$B = 1/(\pi \cdot R2 \cdot C) \quad (8)$$

B: Bandbreite

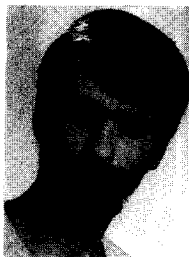
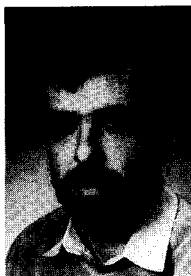
wurde davon ausgegangen, daß Bildkanten im Übergangsbereich zwischen zwei Pixeln und fünf Pixeln eindeutig als Kanten erkannt werden.

Die berechneten Werte wurden experimentell optimiert. Hauptoptimierungsgröße war dabei eine gleichwertende Verarbeitung ansteigender wie abfallender Bildkanten.



**Dr. Boris Lux**, Jahrgang 1953, studierte an der Technischen Universität Dresden Physik, promovierte 1985 auf dem Gebiet der Bildqualitätsparameter für die Mikrofilmtechnik, leitete von 1985 bis 1989 die Forschungsgruppe des „Qualidat“ CCD-Zeilensensors im VEB Zentrum für Forschung und Technik; seit 1990 ist er Qualitäts-Ingenieur in der Dräger-Werk AG.

**Dieter Pferner**, Jahrgang 1957, studierte an der Technischen Universität Dresden Informationstechnik, arbeitete von 1983 bis 1989 im VEB Werk für Fernsehetechnik Berlin an der CCD-Schaltkreis- und Schaltungsentwicklung; seit 1989 ist er im VEB Zentrum für Forschung und Technik Dresden Mitarbeiter Forschung und Entwicklung für analogen und digitalen Schaltungsentwurf.



**Uwe Eschke**, Jahrgang 1960, studierte an der Technischen Universität Dresden Informationstechnik mit der Spezialisierung Meßtechnik und arbeitet seit 1987 als Entwicklungsingenieur im VEB Zentrum für Forschung und Technik Dresden auf dem Gebiet der hardwarenahen Programmierung in der Sensortechnik sowie der Schaltungsentwicklung.

## Literatur

- [1] Serien HVS 256 und HVS 270: Hochgenaue CCD-Zeilencameras für Kanten- und Breitenmessung. Honeywell Micro switch, Geräteinformation E 614.
- [2] Langner, G.; Müller, R.: Mitteilung der Forschungslabors der Agfa-Gevaert AG. Bd. IV 1964, S. 339...345. Berlin-Göttingen-Heidelberg.
- [3] Steinlechner, S.:  $\sin(x)/x$ -Entzerrer für D/A-Umsetzer. ELEKTRONIK 1985, H. 3, S. 75...78.
- [4] Lux, B.; Köhler, M.; Helms, H.: Intelligenter CCD-Zeilensensor für die Fertigungsmeßtechnik. Feingerätetechnik 1988, H. 10, S. 450...453.
- [5] Hofmann, Ch.: Untersuchungen zum Einfluß des Kohärenzparameters auf die optische Abbildung. Teil I. Exp. Technik d. Physik 1980, H. 5, S. 403...415.