

# 5 auf einen Streich

Profil • Textur • Durchbiegung • Weg • Geschwindigkeit  
 Synchrone Bilddaten- und Messwerterfassung mit einem CCD-Zeilensystem

Die Produktion von Strangpreßprofilen, die optische Kontrolle von Baugruppen oder die Messwerterfassung am Motorprüfstand erfordert zur Online-Prozesskontrolle optische Hochgeschwindigkeits Messsysteme mit synchroner Erfassung der Bild- und Messdaten.

Diese und andere Anforderungen werden mit dem vorgestellten CCD-Zeilensystem erfüllt. Fünf digitale Zeilenkameras, die über eine Mergerbox an ein einzelnes PC-Interface angeschlossen werden, Beleuchtungskomponenten für gerichtete Hellfeld- und diffuse Beleuchtung sowie Laser-Makroliniengeneratoren zur strukturierten Beleuchtung sind die Grundbausteine des in Abb. 1 abgebildeten Messsystems.

Die Mergerbox SK9195 faßt die Signale der fünf synchron betriebenen Zeilenkameras zusammen. Dem PC-Interface erscheint die Mergerbox als virtuelle Zeilenkamera, deren Pixelanzahl der Summe der Pixel der angeschlossenen Zeilenkameras entspricht. Die Anzahl der Kameras und die Zahl ihrer Pixel bestimmt die maximale Zeilenfrequenz. Je nach Konfiguration beträgt die allen Kameras gemeinsame Zeilenfrequenz Kameras 10 kHz und mehr.

Die Profilgeometrie wird mit vier sternförmig angeordneten Zeilenkameras bestimmt. Die fünfte Kamera ermittelt Weg und Geschwindigkeit der Objektbewegung (optischer Tachometer).

## Profilmessung

Kamera 1 bestimmt die Breite der oberen Profilfläche. Zum Einsatz kommt ein telezentrisches Messobjektiv, das eine paralaxenfreie Abbildung garantiert. Eine gerichtete Hellfeldbeleuchtung führt zu kontrastreicher Abbildungen von Texturen oder Kratzern.

Die Breite der seitlichen Profilflächen wird mit den Kameras 2 und 4 bei diffuser Beleuchtung vermessen. Kamera 3 bestimmt die Breite der unteren Profilfläche und überprüft zusätzlich das Messobjekt auf Durchbiegung. Hierfür wird das Signal zweier schräg einstrahlender Laserstrahlquellen nach dem Lasertriangulationsverfahren ausgewertet.

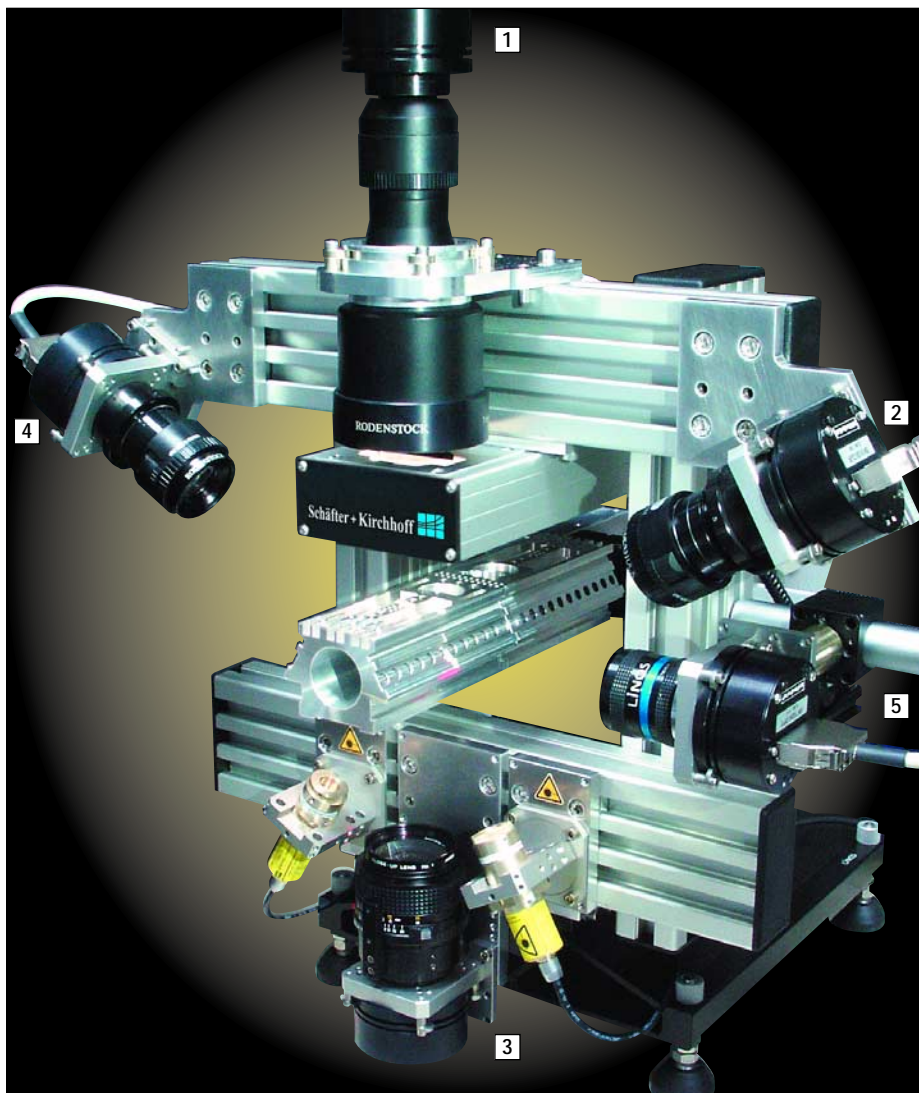


Abb. 1: Profil, Oberflächen und Volumen-Scanner  
 Fünf CCD-Zeilenskameras erfassen synchron Bild- und Messdaten. Eine überlagerte strukturierte Laserbeleuchtung erweitert die zweidimensionale Messung um eine weitere Dimension (z.B. Tiefe, Schwingung, Durchbiegung). Das Messsystem ist modular aufgebaut, mit identischem Gehäuse und identischer Schnittstelle stehen Zeilenkameras mit 512 - 5150 Pixeln zur Verfügung. Kombiniert mit geschickter Objektiv- und Beleuchtungsauswahl werden optimale objektbezogene Messwerte erreicht.

Kamera Nr.	1	2 und 4	3	5
Messaufgabe	Profilmessung: Nutbreite, Oberflächentextur und Kantenlage	Profilmessung: Kantenlage	Profilmessung: Kantenlage, Abstand, Durchbiegung	Weg und Geschwindigkeit (opt. Tachometer)
Kameratyp	SK1024DPD	SK512DPD	SK1024DPD	SK512DPD
Pixel	1024	512	1024	512
Pixelfrequenz	max. 40 MHz	max. 40 MHz	max. 40 MHz	max. 40 MHz
Objektiv	Telezentrisches Messobjektiv Linos TL 5-60-270	C-Mount Objektiv	Fotoobjektiv	Fotoobjektiv
Beleuchtung	Gerichtete Hellfeldbeleuchtung SK5761	Diffuse Auflichtbeleuchtung	Diffuse Auflichtbeleuchtung kombiniert mit Lasertriangulation	Streifende Beleuchtung (Dunkelfeld)

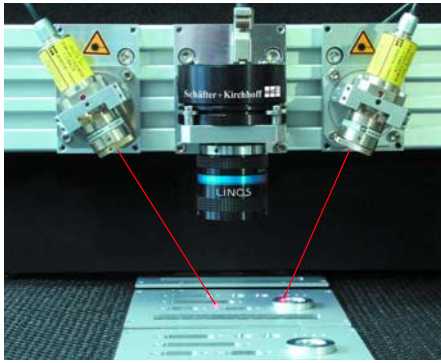


Abb. 2: Messanordnung zur Lasertriangulation

## 3D Objektvermessung durch strukturierte Beleuchtung

Eine Zeilenkamera erfasst die Geometrie eines bewegten Objektes in zwei Dimensionen, z.B. Länge und Breite. Die gleichzeitige punktuelle Vermessung einer weiteren Dimension (z.B. Objekthöhe) wird durch die Überlagerung der Aufsichtbeleuchtung mit einer strukturierten Laserbeleuchtung realisiert.

Auf den CCD-Sensor trifft das summierte Signal der Aufsichtbeleuchtung und der strukturierten Laserbeleuchtung. Das Zeilen-signal enthält sowohl Breiten- als auch Höheninformation.

Im vorgestellten Anwendungsbeispiel besteht die strukturierte Laserbeleuchtung aus schräg zur Kameraachse einstrahlenden Lasern, die jeweils die Objekthöhe an einem Punkt bestimmen.

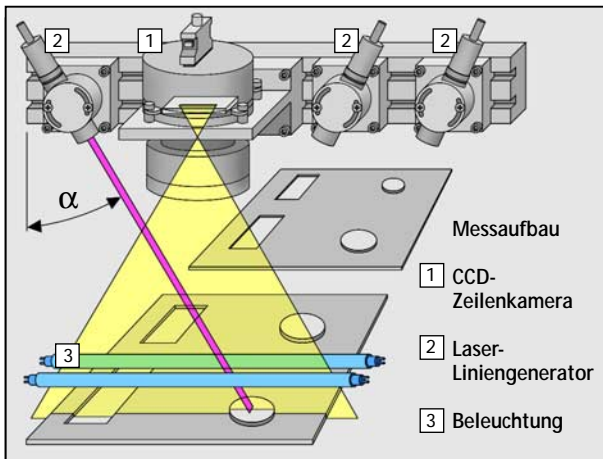
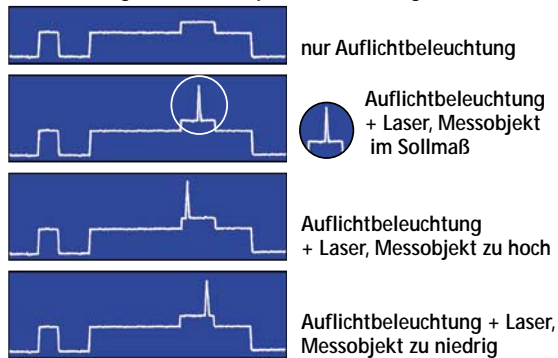


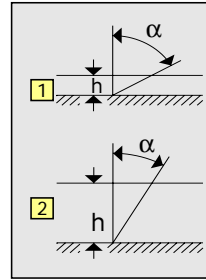
Abb. 3: CCD-Zeilensignal bei Kombination der Aufsichtbeleuchtung mit einer strukturierten Laserbeleuchtung

CCD-Zeilensignal, oszilloskopische Darstellung:



## Lasertriangulation

Die Signalauswertung erfolgt nach dem Triangulationsverfahren. Der Auftreffpunkt eines unter dem Winkel  $\alpha$  einfallende Laserstrahls (vgl. Abb. 3) wird von dem Objektiv auf die CCD-Zeile abgebildet. Bei Höhenänderung wandert der Auftreffpunkt nach links oder rechts. In der hier vorgestellten Anordnung wird die Lasertriangulation zur Höhenmessung bei planen Oberflächen verwendet.



Die Auflösung und Messbereich der Höhenmessung hängen ab vom Winkel  $\alpha$ . 1 Große Winkel ergeben hohe Auflösung und einen kleinen Messbereich h, bei kleinen Winkeln 2 ist der Messbereich h größer und die Auflösung reduziert.

Die Lasertriangulation wird unempfindlich gegen Justiertoleranzen des Messaufbaus wenn auf dem Objekt statt eines Laserspots eine senkrecht zum Zeilensensor orientierte Laserlinie erzeugt wird. Um sicherzustellen daß sein Auftreffpunkt sich im gesamten Höhenmessbereich innerhalb des schmalen, vom Objektiv auf den Zeilensensor abgebildeten Bereiches befindet, müßte dagegen ein runder Laserstrahl exakt in der vom Zeilensensor und der optischen Achse des Objektivs aufgespannten Ebene verlaufen.

## Laserstrahlquellen

Der für die Lasertriangulation mit Messbereich h erforderliche Schärfentiefenbereich beträgt  $h/\cos \alpha$ .

Die eingesetzten Laserquellen 5LTM-250-11 + 25CM-685-27-M02-A8-2 erzeugen semitelezentrische Makrolinien mit erweitertem Schärfentiefenbereich. Die Länge semitelezentrischer Laserlinien ist unabhängig vom Arbeitsabstand. Da innerhalb ihres Schärfentiefenbereichs auch die Breite von Laser-Makrolinien annähernd konstant ist, resultiert insgesamt eine Laserlinie konstanter Leistungsdichte (vgl. Abb. 5). Die Signalamplitude auf dem Zeilensensor bleibt im Schärfentiefenbereich annähernd konstant.

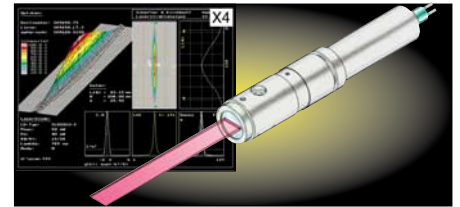


Abb. 4: Laser-Makrolinegenerator u. Strahlprofil

## Laser-Makrolinegeneratoren

Das Strahlprofil in Linienrichtung ist ein durch die Apertur beschnittenes Gaußprofil mit typ. 40% Randintensität. Senkrecht dazu ist das Strahlprofil nur im Schärfentiefenbereich annähernd gaußförmig. Außerhalb des Schärfentiefenbereiches treten beugungsbedingte Nebenmaxima auf (s. Abb. 5). Abhängig vom Arbeitsabstand werden Linienbreiten ab 0,05 mm erreicht. Die maximale Laserleistung beträgt 27 mW.

Gegenüber Laser-Mikrolinien mit senkrecht zur Linie gaußförmigem Strahlprofil (vgl. Abb. 6) haben Makrolinien einen erweiterten Schärfentiefenbereich.

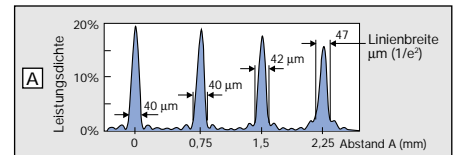


Abb. 5: Intensitätsprofil und Linienbreite einer Makrolinie: Leistungsdichte und Linienbreite bleiben annähernd konstant in einem um den Faktor 35 (zu Abb. 6) vergrößerten Arbeitsbereich.

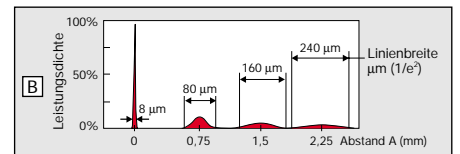


Abb. 6: Intensitätsprofil und Linienbreite einer Mikrolinie: hohe Leistungsdichte und schmale Laserlinie im Fokus. Linienerweiterung und stark reduzierte Leistungsdichte bei Abstandsänderung

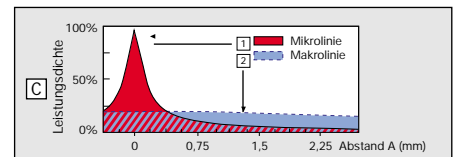


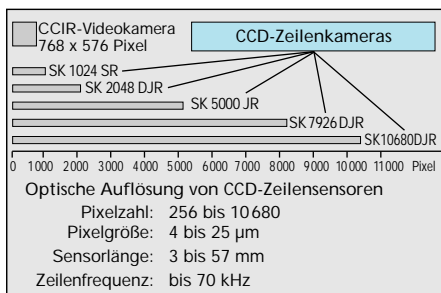
Abb. 7: Leistungsdichte und Arbeitsabstand, Vergleich von Mikrolinie und Makrolinie

Tabelle 1	L	B	A	Schärfentiefe
Typ	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5LT75-1	4,8	0,02	74	1,7
5LTM75-11	4,8	0,07	68	16,8
5LT150-1	4,8	0,05	145	6,9
5LTM150-11	4,8	0,14	139	67
5LT250-1	4,8	0,09	250	19
5LTM250-11	4,8	0,24	245	187

Tabelle 1: Länge L, Breite B, Arbeitsabstand A und Schärfentiefenbereich einiger Laser-Mikrolinien (5LT...) und Laser-Makrolinien (5LTM...). Erhältlich sind Ausgangsleistungen bis 45 mW, die Wellenlänge liegt im Bereich 635 - 830 nm.

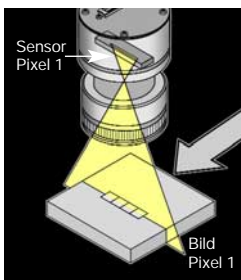
## CCD-Zeilenkameras

CCD-Zeilenkameras sind Halbleiter-Kameras mit nur einer lichtempfindlichen Zeile, die je nach Typ bis zu 10680 einzelnen adressierbare Bildelemente (Pixel) von 4-25 µm Breite enthält.



### Bildgenerierung

Eine zweidimensionale Abbildung entsteht durch Bewegung des Objektes senkrecht zum Zeilensensor (Scannen). Die einzelnen Zeilensignale werden im Rechner zu einem Bild zusammengesetzt.



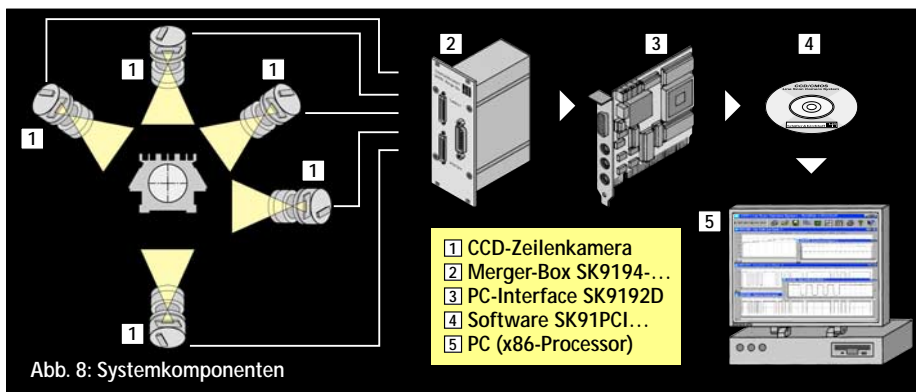
### Kamerasteuerung

Die Steuerung der CCD-Zeilenkamera erfolgt über die PC-Interfacekarte SK9192D. Sie unterstützt alle digitalen Kameratypen von Schäfter+Kirchhoff mit s/w- und Farbsensoren von 256 bis 10680 Pixel. Als Schnittstelle zwischen Rechner und Kamera parametrisiert die PCI-Bus-Interfacekarte das Kamerasignal in Zeilenfrequenz und Integrationszeit. Interne und externe Synchronisationsmodi werden unterstützt. Spezielle Vorverarbeitungsfunktionen auf der PC-Interfacekarte sind:

- Shading-Korrektur zum Ausgleich inhomogener Signalverläufe durch Beleuchtung, Objektiv-Randabfall oder Sensor-Eigenschaften.
- Schwellenwertverarbeitung zur Erzeugung eines Binärsignals.
- Window-Funktion zur Auswahl eines bestimmten Messfensters im Zeilensignal (Datenreduktion).

Die Programmierung der Interfacekarte erfolgt über die Software SkLineScan. Mit der oszilloskopischen Signaldarstellung und der Zoom-Funktion werden Details im Zeilensignal sichtbar.

Aus einem Merger-Box-Signal werden die Signale der angeschlossenen Zeilenkameras in Mehrfenstertechnik separiert.



### Merger-Box SK 9195

Mit der Merger-Box SK 9195 können bis zu 5 digitale CCD-Zeilenkameras mit einer PC-Interfacekarte synchron betrieben werden.

Die Merger-Box SK9195 fügt die Zeilensignale der fünf angeschlossenen digitalen CCD-Zeilenkameras zu einem gemeinsamen Zeilensignal zusammen. Der PC-Interfacekarte erscheint die Merger-Box als virtuelle Zeilenkamera mit der summierten Pixelzahl aller angeschlossenen Kameras. Die Merger-Box ist selbstkonfigurierend. Der Typ jeder angeschlossenen CCD-Zeilenkamera wird automatisch erkannt.

ten der anderen Kameras. Nach der vollständigen Übertragung der Daten von Kamera 5 ist das Zeilensignal der Merger-Box komplett.

Alle angeschlossenen Kameras arbeiten pixelsynchron, mit 40 MHz Pixelfrequenz und mit der identischen Integrationszeit von 0,091ms. Die Zeilenfrequenz berechnet sich aus dem Quotienten von Pixelfrequenz und der Summe aller Pixel plus 64 passiver Pixelkontakte.

$$N_{MB} = 1024 + 512 + 1024 + 512 + 512$$

$$N_{MB} = 3584$$

$$f_L = 40\,000 \text{ kHz} / (3584 + 64)$$

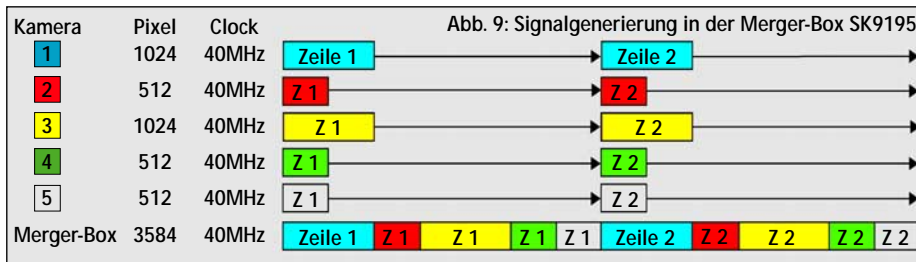
$$f_L = 10,96 \text{ kHz}$$

$N_{MB}$  = Pixelsumme im Merger-Box-Zeilensignal  
 $f_L$  = Zeilenfrequenz der Merger-Box

### Signalgenerierung

Die Zeilensignale von Kamera 2 bis Kamera 5 werden in der Merger-Box zwischengespeichert. Die Daten von Kamera 1 werden direkt an die Interfacekarte übertragen. Im Anschluß daran folgen sequentiell die zwischengespeicherten Da-

Jede Kamera hat ihre feste Position innerhalb des Summensignals der Merger-Box. Eine Separation und Zuordnung der Daten ist sowohl bei zeilenweiser Verarbeitung als auch beim blockweisen Auswerten von Zeilensignalfolgen im DMA-Online-Betrieb leicht möglich.



- 1 Zeilensignal Merger-Box mit insgesamt 3584 Pixel
- 2 Signal Kamera 1, 1024 Pixel Pixeladresse 1 - 1024
- 3 Signal Kamera 2, 512 Pixel Pixeladresse 1025 - 2048
- 4 Signal Kamera 3, 1024 Pixel Pixeladresse 2049 - 2560
- 5 Signal Kamera 4, 512 Pixel Pixeladresse 2561 - 3072
- 6 Signal Kamera 5, 512 Pixel Pixeladresse 3073 - 3584

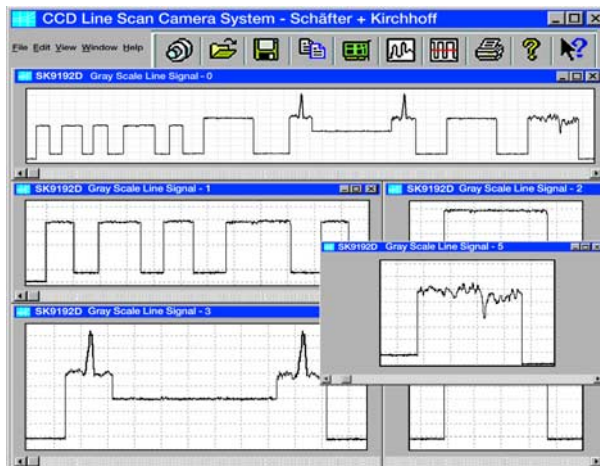
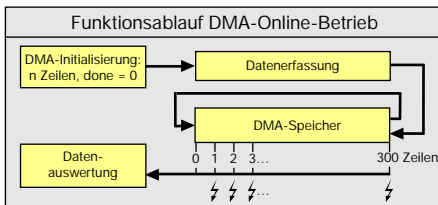


Abb. 10: Oszilloskopische Signaldarstellung der Kameras 1 bis 5

## Online-Prozesskontrolle

Bei PCI-Bus-Systemen unterstützen die PC-Interfacekarte SK9192D und die Software SkLineScan den Busmaster-DMA. Diese effiziente Form der Datenübertragung in den PC-Speicher (s. Datentransfer) ist für eine Online-Prozesskontrolle prädestiniert.

In der vorgestellten Applikation erfolgt die Auswertung zeilenweise. Dabei wird als Zeile das Summensignal der Merger-Box Sk9195 mit 3584 Pixeln betrachtet.



Für die kontinuierliche Datenerfassung und Auswertung im DMA-Online-Betrieb wird der DMA-Speicher zyklisch mit 300 Zeilen im Ringspeicherverfahren beschrieben. Nach jeder Zeilenerfassung erhält die Auswerteeinheit das Event zur Berechnung der Messwerte, während die Interfacekarte bereits die Kameradaten der nächsten Zeile in den Speicher schreibt. Die Pufferung von 300 Zeilen stellt sicher, daß bei kurzzeitiger Systemüberlastung (DMA-Bus, CPU) keine Zeile verloren geht.

Für andere Messaufgaben (Oberflächeninspektion) können im DMA-Online-Betrieb Zeilenblöcke bis zu 4 MByte Größe verarbeitet werden.

## Synchronisation

Die vorgestellte Applikation arbeitet asynchron mit der maximalen Zeilenfrequenz von 10,96 kHz. Die Zeilenerfassung erfolgt kontinuierlich. Die Ortsinformation wird aus der Geschwindigkeitsmessung gewonnen.

Im Synchronbetrieb steuert der Weggebertakt (TTL-Signal) der Transporteinheit die Zeilenfrequenz der Merger-Box. Die Ortszuordnung der Messwerte erfolgt über den Weggebertakt.

## Auswertung

Das Summensignal der Merger-Box

Kamera	1	2	3	4	5
Zeilen-signal					
Kategorie	1	2	3		
Messgröße	Abstand	Profil	Geschwindigkeit		
Verfahren	Laser-Triangulation	Breitenmessung	Kreuzkorrelation		
Messwerte	Peak-Position Pp	Kanten-Positionen Ep1, Ep2	Ortsverschiebung Cmax		

Abb. 11 : Optischer Tachometer (Kamera Nr. 5)



### Geschwindigkeit ist keine Hexerei

Messgrößen: Geschwindigkeit, Weg

Messprinzip: Kreuzkorrelation zweier Zeilensignale

Voraussetzung: hinreichend unregelmäßige Oberfläche

Korreliert werden das Zeilensignal zum Zeitpunkt  $t_n$  mit dem Zeilensignal zum Zeitpunkt  $t_{n-1}$ . Die äquidistante Zeitdifferenz beträgt  $\Delta t = 1/f_L$  [ms]. Aus der Maximumposition in der Korrelationsfunktion  $C_{max}$  wird der zurückgelegte Weg  $\Delta s$  in der Zeiteinheit  $\Delta t$  nach Formel 1 berechnet. Die Multiplikation der Wegstrecke  $\Delta s$  mit der Zeilenfrequenz  $f_L$  ergibt die Geschwindigkeit  $V_0$  2.

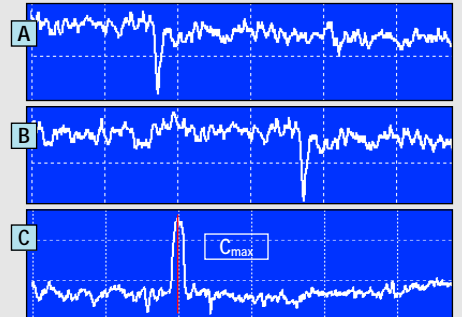
$$1) \Delta s [\text{mm}] = \beta \cdot w_p \cdot C_{max}$$

$$2) V_0 [\text{m/s}] = \beta \cdot w_p \cdot C_{max} \cdot f_L [1/s]$$

$\Delta s$  = Weg [mm]       $V_0$  = Geschwindigkeit [m/s]  
 $f_L$  = Zeilenfrequenz [kHz]       $\Delta t$  =  $1/f_L$  [ms]  
 $w_p$  = Pixelbreite [mm]       $C_{max}$  = Korrelationsmaximum  
 $\beta$  = Abbildungsmaßstab      = Messfeld / Sensorlänge

Beispiel: Kamera XSD-Serie,  $\beta = 3 / 1,5$

CCD-Sensor Pixel	Zeilenfrequenz $f_L$ [kHz]	Wegauf-lösung $\Delta s$ [mm]	Geschwindigkeit $V_{max}$ [m/s]
1024	9,2	0,042	207
2048	9,2	0,021	414



A) CCD- Zeilensignal zum Zeitpunkt  $t_n$   
 B) CCD- Zeilensignal zum Zeitpunkt  $t_{n-1}$   
 C) Kreuz-Korrelationsfunktion von A) und B)

Sk9195 enthält die zeitgleich aufgenommenen Signale der fünf angeschlossenen CCD-Zeilencameras sequentiell aneinander gereiht. In einem ersten Schritt separiert die Auswerteeinheit die fünf Kamerasignale über die bekannten Pixeladressen. Anschließend erfolgt die Messwertbestimmung in den drei Kategorien Abstand, Profil und Geschwindigkeit.

## Abstands- und Breitenmessung

Die Peak-Bestimmung im Laser-Triangulationsverfahren erfolgt über die Flächenschwerpunktsberechnung im Zeilensignal der Kamera 1. Aus der Ortsverschiebung der Peak-Position  $P_p$  werden die Abstandsänderungen des Objekts zur Kamera ermittelt.

Die Breitenmessung basiert auf der Differenzbildung der rechten und der linken Objektkante (Ep2 - Ep1).

## Datentransfer

Die CCD-Zeilencamera-Interfacekarte transportiert die digitalisierten Zeilenkameradaten im Busmaster-DMA (Direct Memory Access) über den PCI-Bus. Für die Übertragung der Scandaten benötigt eine PCI-Bus-Karte nur die physikalische Zieladresse im PC-Speicher und die Anzahl der zu übertragenden Pixel. Während der Datenübertragung wird die Zielaadresse automatisch erhöht und der DMA-Zähler (Transfer Counter = TC) dekrementiert.

Ein Interrupt beim DMA-Zählerstand 0 (TC0-Interrupt) signalisiert das Ende der Übertragung. In der Interrupt-Service-Routine prüft die CPU, ob der Prozeß abgeschlossen ist oder weitere Übertragungsaufträge anliegen. Im letzteren Fall wird die Karte mit einer neuen Zieladresse und der Größe des nächsten DMA-Blocks programmiert.

Der Automatismus des Busmaster-DMA belastet die CPU des Rechners weniger als 1% und hält sie frei für andere Aufgaben, wie zum Beispiel die Auswertung der Kameradaten und Steuerung externer Geräte.

Da Windows XP/NT/2000/9x virtuelle Betriebssysteme sind, hat der User keinen direkten Zugriff auf den physikalischen Speicher des PC. Ein für den User als zusammenhängend erscheinender Speicher im virtuellen Adreßbereich besteht in der realen PC-Welt aus vielen verstreuten Segmenten des physikalischen Speichers, deren Größe und Lage vom Betriebssystem festgelegt und verwaltet werden, also apriori nicht bekannt sind. Der Software-Treiber und die Klassen-Bibliothek von Schäfter + Kirchhoff bieten dem User komfortable und leistungsstarke Methoden für die Erfassung der CCD-Zeilensignale, den Zugriff auf die Kameradaten und deren Verarbeitung.

### KONTAKT

Schäfter + Kirchhoff GmbH  
 info@SuKHamburg.de, www.SuKHamburg.de  
 Fax: 040/85 31 37

Informationen

Kenn-Nr. xxx