

Ansteuerung von CCD-Zeilen

1. Ziele beim Einsatz von CCD-Zeilensensoren

Der Ausgangspunkt der Arbeiten war die Entwicklung von Stereo-Zeilenkameras für den Einsatz in hochdynamischer Lichtumgebung, wie sie im Zusammenhang mit Landtechnik vorkommen. Als technische Anforderungen standen unter anderem:

- Belichtungsregelung über 6 Dekaden zur Arbeit im Bereich von etwa 1 Lux bis 100 kLux,
- ein minimales Rauschen der Ausgangssignale, um eine meßtechnische Verarbeitung zu ermöglichen.

Der Vortrag beschränkt sich auf den Bereich der Sensoransteuerung und der realisierten Belichtungsregelung.

2. Ansteuerung von CCD-Zeilen

Als Basis für die Arbeiten diente der Zeilensensor ILX703A. Die Ansteuerung sollte dabei so erfolgen, das die Eigenschaften des Sensors möglichst ausgeschöpft werden. Das bedeutet vor allem eine Ausnutzung des Ausgangsspannungshubes von fast 4V und die direkte Ansteuerung von einem Prozessor oder FPGA.

2.1. Beschaltung des Sensors

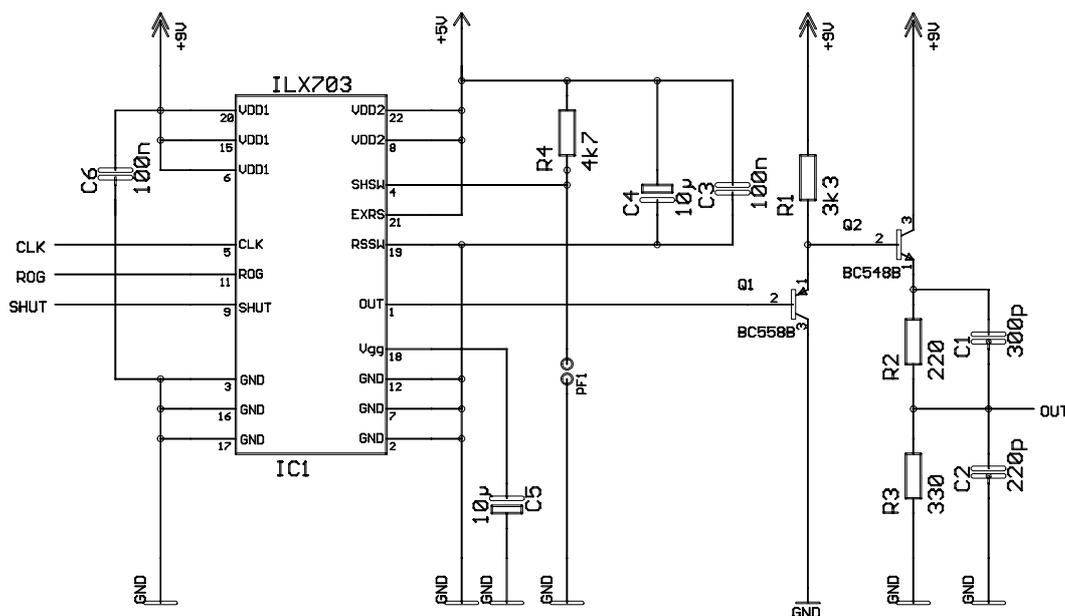


Abb. 1 : Beschaltung des ILX703A

Die Beschaltung des Sensors hält sich im Kern an die Testschaltung im Datenblatt. Der Hub der Ausgangsspannung beträgt etwa 4V (dunkel) bis etwa 2,5V (max. Beleuchtung). Durch die Transistoren Q1 und Q2, welche eine komplementäre Kollektorstufe bilden, wird dieser Pegel unverändert übertragen. Mit den Widerständen R2 und R3 erfolgt die Anpassung des Ausgangspegels an den AD-Wandler, welcher direkt angesteuert wird. Mit den Kondensatoren kann eine Anpassung des Frequenzganges des Teilers unter Einbeziehung der Eingangswerte des AD-Wandlers erfolgen. Alternativ zu R2 kann auch eine Diode zur Pegelverschiebung eingesetzt werden.

Als AD-Wandler kommt meist der ADS802 von Burr-Brown zum Einsatz, welcher den Bereich von 1,25V bis 3,25V mit 12 Bit Auflösung umsetzt. Da die größere Beleuchtungsstärke den kleineren Spannungswert ergibt, ist der Digitalwert anschließend zu invertieren.

Es hat sich bewährt die Spannungen für den Sensor (und ggf. auch für den ADC) auf dem Sensorboard mittels Linearregler zu erzeugen. Auf keinen Fall darf die Diode von +5V nach +9V gegen einen latch-up vergessen werden.

2.2. Ansteuerung ohne Shutter

Die einfachste Variante der Belichtungssteuerung ist die Variation der Auslesegeschwindigkeit. Die Belichtungszeit wird dabei minimal aus der zu übertragenden Pixelzahl mal der Periodendauer des Taktes gebildet. Durch ein Überziehen der gelesenen Pixelzahl über die Zahl der vorhandenen Pixel kann die Belichtungszeit erhöht werden. Beim ILX703 ergibt sich damit eine minimale Belichtungszeit von etwa 0,5 .. 1 ms.

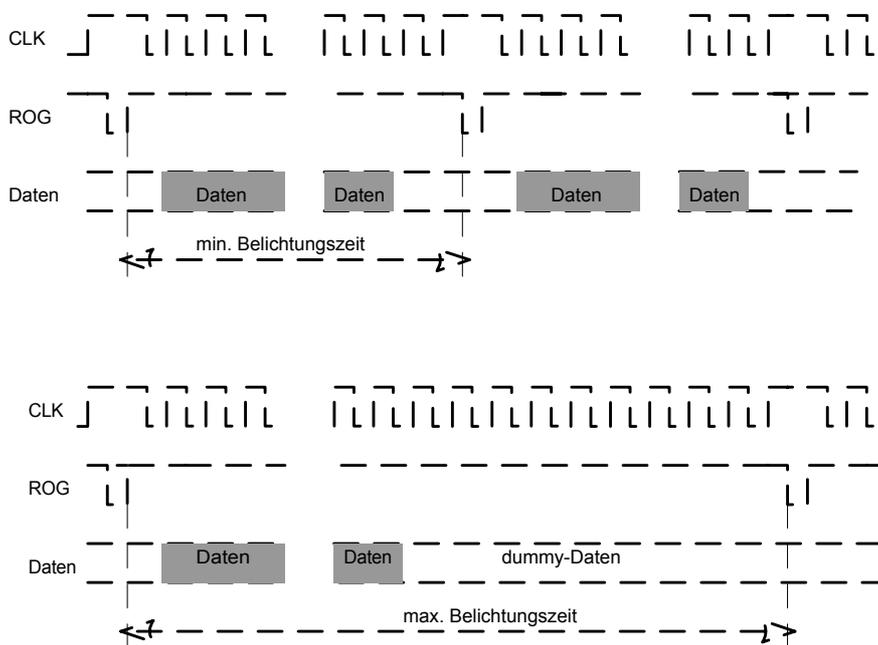


Abb. 2 : Belichtungszeitsteuerung ohne Shutter

Bei der ausgewiesenen Beleuchtung für die Sättigung von $30\text{V/lx}\cdot\text{s}$ und 2V Ausgangshub ergeben sich als Näherung die Grenzwerte von $0,3\text{ Lux}$ für 200ms Belichtung und etwa 66 Lux für 1ms Belichtung.

2.3. Ansteuerung mit Statemaschine (negative Zeit)

Will man kürzer belichten als die Auslesezeit zuläßt, muß der Sensor über einen Shutter-Anschluß verfügen. Dieses Pin wird aber nicht im Impulsmode entsprechend Datenblatt betrieben, sondern in Form eines statischen ‘Belichtung enable’.

Die Ansteuerung des Sensors erfolgt dann so, das die Belichtung für eine definierte Zeit vor dem ROG-Impuls aktiv ist und somit Ladung in den Pixeln aufgebaut werden kann.

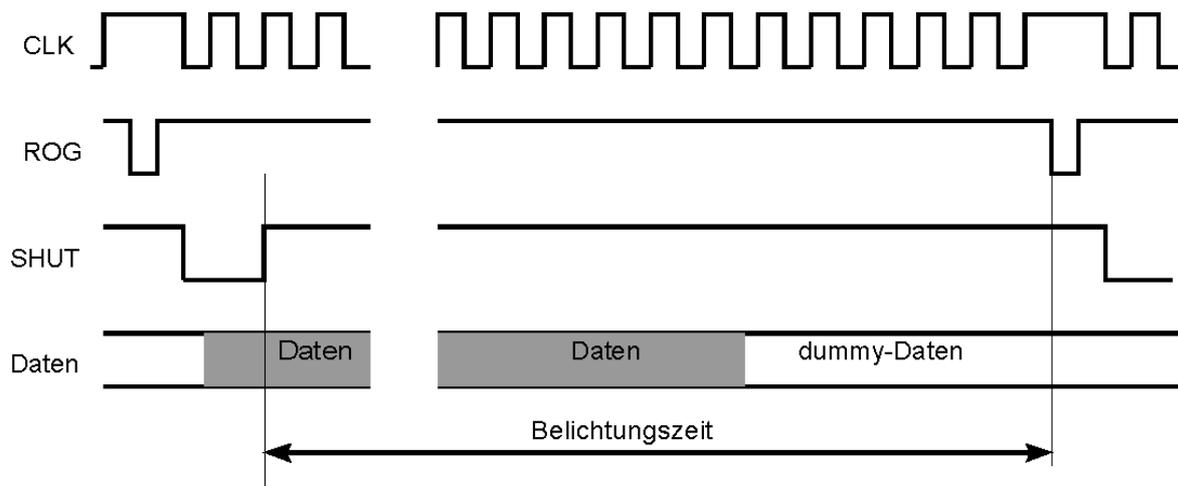


Abb. 3 : Ansteuerung des Shutter mit Hardware

Das Problem dieses Modus ist der Bezug der Belichtungszeit auf das Ende des Auslesevorganges, d.h. auf den Übernahmezeitpunkt der Ladungen (ROG-Impuls). Deshalb wurde auch der Begriff der ‘negativen Zeit’ verwendet. Dieser Bezug auf den Endpunkt läßt sich in Digitaltechnik mit Zählern und Komparatoren einfach lösen. Es wird allerdings aufwendiger, wenn die Belichtungszeit auch größer sein soll als der Lesezyklus der Zeile. In diesem Fall müssen zwei Komparatoren eingesetzt werden, welche den Zeitpunkt des ROG-Impulses bestimmen (gleich dem Ende der Belichtungszeit) und zusätzlich den Startzeitpunkt. (siehe Abb. 4)

Für die Steuerung ist in diesem Fall bereits ein Mikrocontroller erforderlich, welcher die beiden Werte ermittelt und einstellt. Zusätzlich können aus dieser Steuerung gleich der Startpunkt und Endpunkt der gültigen Pixeldaten abgeleitet werden, so daß ein ‘Data valid’-Signal entsteht. Bei dieser Version der Ansteuerung bietet sich die Verwendung von programmierbarer Logik an.

Die Belichtungszeit kann mit dieser Schaltung vom technisch bedingten Minimum der Ansteuerung bis zu einem frei festlegbaren Maximum eingestellt werden. Beim ILX703 entspricht das einer minimalen Belichtungszeit von etwa $2\mu\text{s}$. Legt man als minimale Zeilenrate 50 Zeilen/s fest (also aller 20ms eine Zeile) ergibt das einen Regelungsbereich für die Belichtungssteuerung von $1 : 10.000$ bzw. einem Shutterwert von $1/500.000$ zu $1/50$.

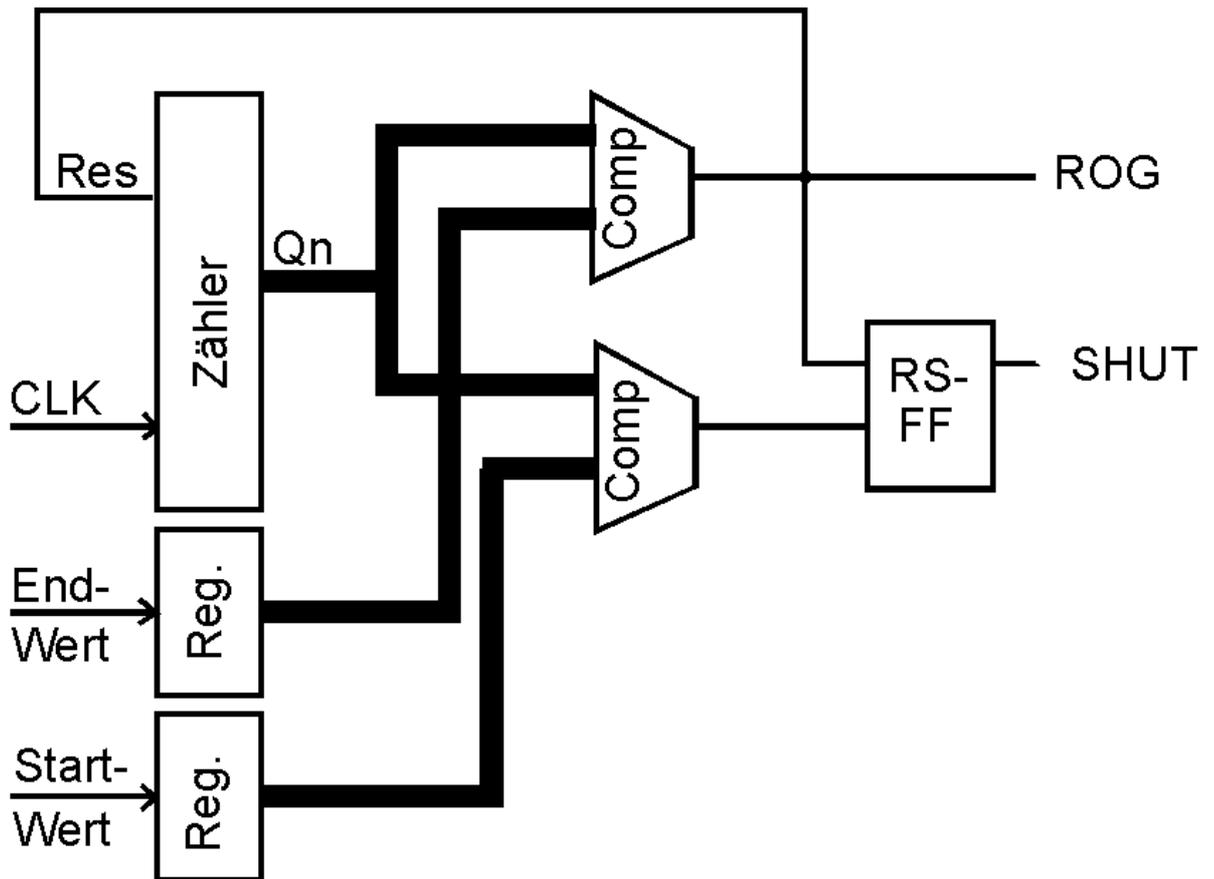


Abb. 4 : Grundstruktur der Belichtungssteuerung

2.4. Ansteuerung per Software (positive Zeit)

Im Gegensatz zur Hardwareansteuerung des Sensors hat die Softwarevariante den Vorteil, dass die Daten im Zuge der Generierung sofort verarbeitet werden können. Es entfällt dadurch eine Zwischenspeicherung der Sensordaten vor der Verarbeitung in einem externen Bereich. Die extern einzusetzenden Bauelemente reduzieren sich dabei auf ein Minimum und bestehen nur noch aus der Beschaltung in Abbildung 1 zuzüglich eines ADC.

In der realisierten Applikation wurden die Signale CLK, ROG und SHUT des Sensors direkt an ein Ausgabeter des Prozessors gelegt. Der Takteingang des Sensors lag parallel mit dem Takt des ADC, welcher über ein Tristate-Puffer als Eingabeter geschaltet war. In der Verarbeitungsphase wurde der Takt für den Sensor durch einen Timer generiert, welcher im Bereich einiger 100 KHz lag und der Aufrechterhaltung der Sensorfunktionen dient. Der Sensor wurde in dieser Zeit gesperrt (Shutter = 0), so daß auch keine Übersteuerung der Pixelzellen durch das einfallende Licht erfolgen kann. Wird eine neue Bildinformation benötigt, wird der Shutter für die gewünschte Belichtungszeit aktiviert und am Ende dieser Zeitspanne der ROG-Impuls ausgelöst. Mit den nachfolgenden Takten werden die Daten in den Rechner übernommen und sofort die ersten Auswertungen durchgeführt. In den Kameras war das die Dateninvertierung und die Histogrammbildung bzw. die Bestimmung von Minimum und Maximum. Nach der Datenübernahme wird das Taktregime wieder an den Timer übergeben und mit der Datenauswertung fortgefahren.

Diese Lösung besitzt den Nachteil, das der Sensor nicht mit der maximalen Geschwindigkeit arbeiten kann. Dieser Weg bietet sich dennoch für Anwendungen mit geringeren Anforderungen an, da der technische Aufwand ein Minimum darstellt und mit modernen RISC-Controllern doch erhebliche Verarbeitungsleistungen realisiert werden können.

Diese Lösung wurde mit einem Signalprozessor für eine Stereokamera umgesetzt. Der DSP diente dabei außer zur Sensorsteuerung auch zur Belichtungsreglung und Normierung der beiden Datenkanäle. An Hand von bestimmten Kennwerten der Bilddynamik wurde bereits entschieden, ob das erfaßte Bild der folgenden Verarbeitungsstufe übergeben wird oder eine neue Aufnahme erfolgen muß. Der nachfolgende DSP (gleichen Typs) berechnete aus den beiden Bildzeilen ein Entfernungsprofil, wuzu er je Sekunde 30.000 Korellationskoeffizienten berechnen mußte. [1]

Das nachfolgende Listing zeigt ein Beispiel für eine Softwaresteuerung des ILX703 ohne integrierte Verarbeitung der Daten auf einem TMS320C50.

```

;-----
; Auslesen einer Zeile
;
read:
rd0:   ldp    b1
       lacl  preg2
       and   #1
       bcnd  rd0,neq      ; warten, bis Takt low
rd1:   ldp    b1
       lacl  preg2
       and   #1
       bcnd  rd1,eq      ; warten, bis Takt high (Flanke)
;
       lacl  #31h        ; Timer halt
       samm  tcr         ; Takt ausschalten
; Übernahme der Steuerung für Takterzeugung vom Timer
;
; Freigabe Shutter signal und abwarten Belichtungszeit (bei lfd. Takt)
       lar   ar2,shut
       larp  ar2         ; Shutterzeit 16 Bit
       opl  #4,preg2
       out  preg2,2     ; Shutter aktiv (belichten)
sh5:
       xpl  #01h,preg2  ; CLK=0-1-0-1-...
       out  preg2,2
       rpt  long        ; x Taktzustaende
       nop
       banz sh5,*-      ; 12 Takte je Runde = 300ns

       opl  #01h,preg2  ; CLK=1
       out  preg2,2
;
; Start des Lesevorganges (Impuls ROG bei CLK=1)
       rpt  #3
       nop          ; ca. 100 ns
       apl  #0ddh,preg2 ; Bit 1 = 0 (ROG) + LED 2,1 ein
       out  preg2,2
       rpt  #17
       nop          ; 500 ns Impulsdauer ROG
       opl  #012h,preg2 ; Bit 1 = 1 (ROG) + LED 2 ein
       out  preg2,2   ; CLK=1

```

```

    rpt    #31
    nop                                ; ca. 750 ns
;
    apl    #0feh,preg2                 ; CLK=0
    out    preg2,2
    rpt    #15
    nop                                ; ca. 500 ns
;
    apl    #0fbh,preg2                 ; Shutter & ROG aus
;
; Datenübernahme
    lar    ar1,#daten                 ; Pufferadresse
    lar    ar2,#ccdline+ccdvor+ccdnach ; Anzahl
    larp   ar1
rd2:    opl    #01h,preg2              ; CLK=1
    out    preg2,2
    rpt    period-period4             ; 3/4 Taktzustand
    nop
    in     *+,0                       ; Lesen Daten ADU
    rpt    period4                    ; 1/4 Taktzustand
    nop

    apl    #0beh,preg2                 ; CLK=0
    out    preg2,2
    rpt    period                      ; 1 Taktzustand
    nop

    larp   ar2
    banz   rd2,*-,ar1                 ; Pixelanzahl ablegen
;
; Abgabe der Steuerung an Idle-Mode für Takterzeugung durch Timer
    lacl   #21h                       ; Timer weiter
    samm   tcr                         ; Takt einschalten
    opl    #072h,preg2                 ; Bit 1 = 1 (ROG) + LED aus
    apl    #0fbh,preg2                 ; Shutter low
    ret
; -----

```

3. Belichtungsregelung

Nachdem wir uns mit der Art der Belichtungssteuerung befaßt haben kommen wir zu dem Punkt der Parameterbestimmung für die Belichtung.

Bei einer Belichtungsregelung auf analoger Seite hat man die Möglichkeit den Istwert in Form der maximalen oder der mittleren Bildhelligkeit zu bestimmen. Bei Verwendung der maximalen Bildhelligkeit kann das zur Folge haben, das ein einziger helle Bildpunkt das gesamte Bild herunterregelt. Verwendet man den mittleren Helligkeitswert kann dagegen ein großer Teil des Bildes überbelichtet sein - in beiden Fällen sind die Ergebnisse nicht verwendbar. Realisiert man die Belichtungsregelung auf digitaler Seite stehen wesentlich mehr mathematische Methoden zur Bestimmung der effektiven Bildhelligkeit zur Verfügung. Die einzige Grenze stellt dabei die für diese Aufgabe verfügbare Rechenleistung dar.

In den nachfolgenden Punkten werden die drei Regelmethode an Hand von Bildern mit CMOS-VGA-Sensoren dargestellt, um auch eine Visualisierung der Auswirkungen zu bieten. Die Methoden wurden mit dem Zeilensensor ILX703 auf dem DSP erarbeitet und hier für Matrixsensoren in Hardware (FPGA) implementiert.

3.1. Zweipunktregelung auf Min-Max-Basis

Die Regelung auf Basis der maximalen Pixelhelligkeit ist die technisch einfachste Form. Sie hat natürlich auch in der digitalen Form den Nachteil, das ein einzelner heller Bildpunkt das gesamte Ergebnis stören kann. Sie eignet sich aber z.B. bei technischen Anwendungen, wo eine relativ homogene Beleuchtung herrscht und keine Reflexionen auftreten.

Mit dem gewonnenen Helligkeitswert aus dem Bild wird in den eigentlichen Regelalgorithmus gegangen. Für ein günstiges Verhalten hat sich eine Zweipunktregelung mit einem Totbereich bewährt. Es ergeben sich dadurch keine hektischen Regelvorgänge durch minimale Helligkeitsänderungen. Erfahrungsgemäß haben sich als Schwellwerte die Punkte 253 und 245 bezogen auf den Wertebereich von 0..255 bewährt. Übersteigt der Istwert die obere Schwelle, erfolgt eine Verkürzung der Belichtungszeit, unterschreitet er die untere Schwelle, wird sie verlängert. Der obere Schwellwert darf dabei nicht 255 sein, da in diesem Fall eine Übersteuerung nicht mehr erkannt werden kann. Den Totbereich von 8 Graustufen kann man ggf. auch noch etwas verringern.

Wie man die Belichtungszeit verändert, hängt von den zeitlichen Anforderungen ab. Es wurde dabei mit zwei Methoden gearbeitet - der arithmetischen und der incrementellen Regelung. Die *arithmetische Regelung* bestimmt aus der Differenz zwischen Soll- und Istwert einen Korrekturkoeffizienten, welcher mit der alten Belichtungszeit multipliziert den neuen Wert ergibt. Damit wird jede Zeile / Bild mit den optimalen Werten (des vorhergehenden Bildes) belichtet. Bei dieser Methode kann man anstelle des Totbereiches auch eine gleitende Mittelung der Istwerte vornehmen.

Bei der *incrementellen Regelung* wird der Belichtungswert im Fall einer Abweichung um einen festen Betrag erhöht oder erniedrigt. Damit reagiert die Kamera zwar langsamer auf Helligkeitsänderungen, es erübrigt sich aber eine Glättung der Istwerte, da dies über die Reaktionsgeschwindigkeit bereits erfolgt.

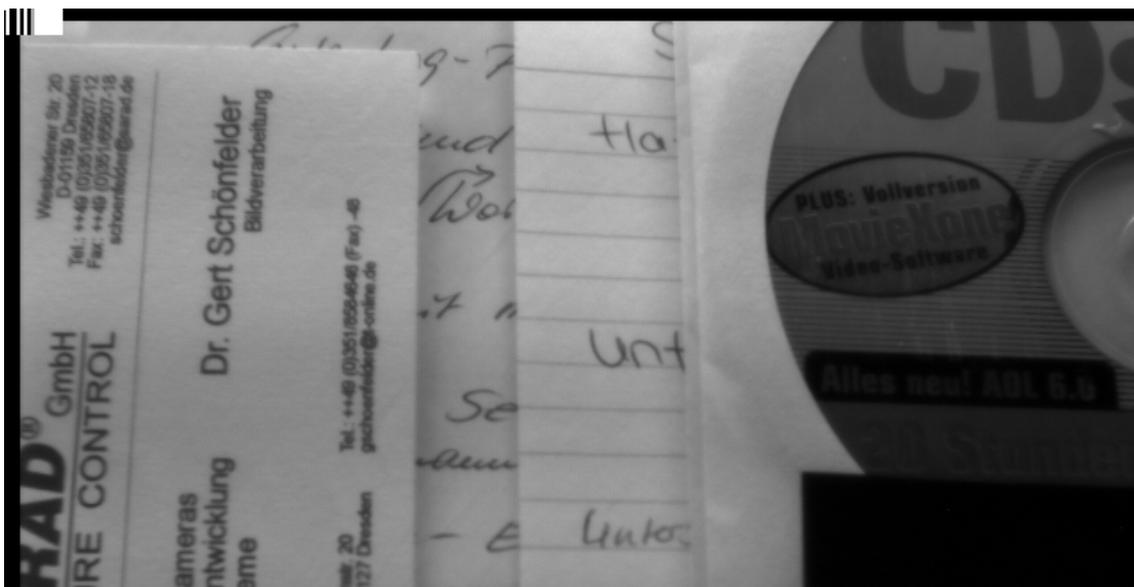


Abb. 5 : Vergleichsaufnahme mit Min-Max-Regelung

3.2. Zweipunktregelung auf Histogramm-Basis (relativ)

Eine erheblich bessere Bildqualität erreicht man durch die Bestimmung der Bildhelligkeit mittels eines Histogramms. Dazu wird mit allen Pixelwerten ein Histogramm aufgebaut. Durch Summation aller Häufigkeiten beginnend beim Grauwert 0 wird der Grauwertbereich gesucht, in dem sich 95% der Pixel aufhalten. Dieser höchste einbezogene Grauwert ist der Istwert für die Regelung.

Die Belichtungszeit wird so eingestellt, das dieser Istwert sich an einem festgelegten Helligkeitswert befindet. Mit dieser Methode läßt man zu, das sich im Beispiel 5% der Pixel oberhalb dieses Wertes befinden, also auch überbelichtet sein können. Es lassen sich aber damit z.B. Reflexe auf einem Gegenstand gezielt aus der Regelung ausblenden, da der Bezugwert durch die Masse der Bildpunkte gebildet wird.

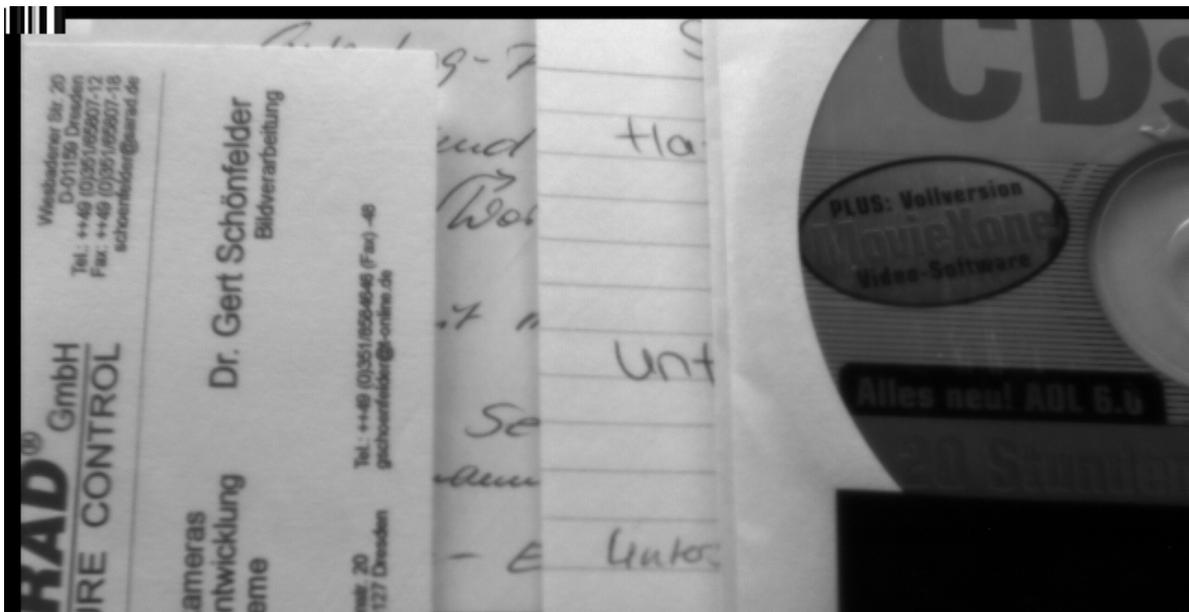


Abb. 6 : Vergleichsaufnahme mit relativer Histogramm-Regelung

Die relative Histogrammregelung bezieht sich hier auf die Festlegung des Grenzwertes, der als Prozentsatz der Gesamtpixelanzahl definiert wird. Diese Variante ist zu nutzen, wenn das Bildformat (oder das Meßfenster im Bild) über die Aufnahmen variieren kann. In Abbildung 6 wurde mit einem Grenzwert von 3 % für die Überschreitung gearbeitet.

3.3. Zweipunktregelung auf Histogramm-Basis (absolut)

Die absolute Histogrammregelung unterscheidet sich nur in der Festsetzung des Grenzwertes. Hier wird für das Bild eine absolute Anzahl von Pixeln festgelegt, welche den definierten Grenzwert überschreiten dürfen.

In Abbildung 7 wurde mit 1200 Pixeln gearbeitet. Es ist im Vergleich zu Abbildung 5 und 6 zu erkennen, das das Bild brillanter ist.

Da die absolute und relative Histogrammregelung sich technisch kaum unterscheiden, sollte man in einer Applikation beide Möglichkeiten implementieren und am Prozeß die Auswahl treffen.

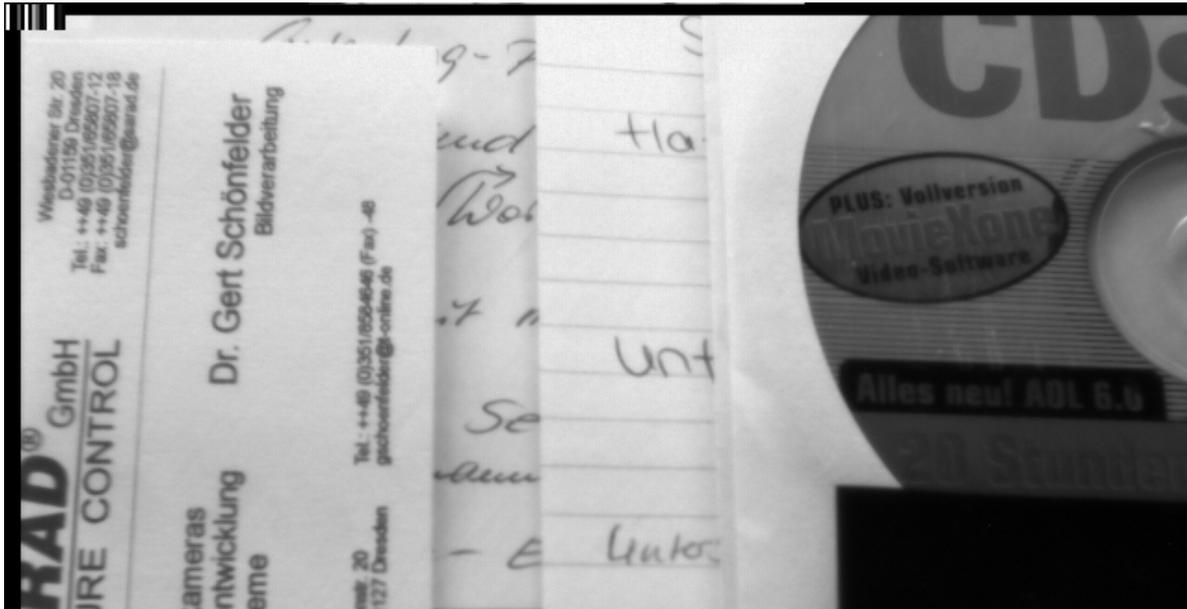


Abb. 7 : Vergleichsaufnahme mit absoluter Histogramm-Regelung

4. Sonderfunktionen in der Sensorauswertung

Wenn Hardware und/oder Rechenleistung am Sensor zur Verfügung steht, bietet es sich an, weitere Funktionen zu implementieren.

Als eine sinnvolle Ergänzung hat sich die Detektion von Leerbildern erwiesen. Solche Bilder sind daran zu erkennen, dass die Differenz zwischen minimalem und maximalem Grauwert unterhalb einer Rauschschwelle liegt.

Mit dieser Information kann ggf. die Belichtungsregelung beeinflusst und die Informationsübertragung an nachfolgende Einheiten unterbrochen werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Auswertung der Bildschärfe, welche über eine FFT erfolgen kann. Bei geringeren Ansprüchen kann unter Umständen auch bereits die maximale Differenz zwischen benachbarten Pixeln ausreichend sein. Diese Funktion läßt sich mit vertretbarem Aufwand auch in einem FPGA implementieren.

Beim Aufbau von Stereosystem wurden in der Aufbereitung der Sensordaten sofort einige Korrekturen mit realisiert. So erfolgte der Ausgleich des Fehlers in den optischen Achsen durch einen Versatz der Startpunkte für das Auslesen der Daten aus dem Sensor. Ebenfalls ausgeglichen wurden die Toleranzen der Optik und der Empfindlichkeit des Sensors. Bei baugleichen Optiken und identisch angesteuerten Sensoren (Parallelschaltung) ergaben sich Unterschiede in der Ausgangsspannung von bis zu 20%. Mit Hilfe der ermittelten Min-Max-Werte wurden die Pixelinformationen so umgerechnet, dass die Min-Max-Werte an den Bereichsgrenzen anstießen.

5. Technische Umsetzung der Funktionen

Die Erkenntnisse aus der Arbeit mit CCD-Zeilensensoren wurden vor allem in der Entwicklung von Stereo-Zeilen-Kameras umgesetzt [1][3].

Die Weiterentwicklung der Kameras führte zu einem Modulsystem, welches mit einer großen Auswahl von Sensoren bestückt werden kann.

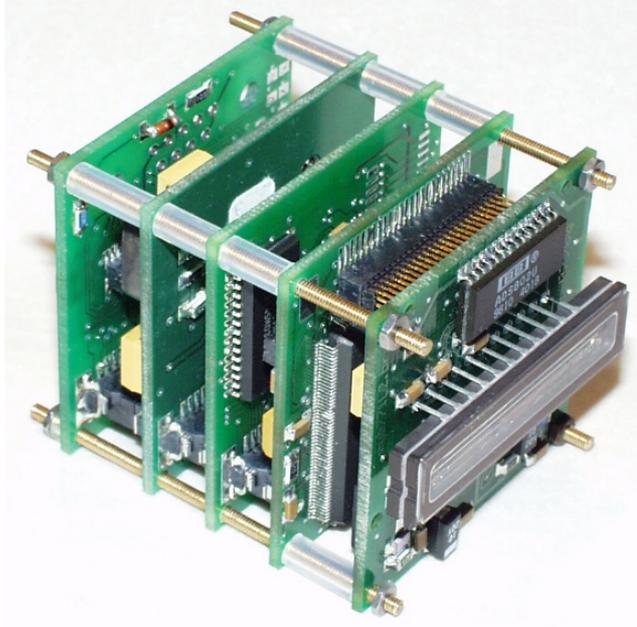


Abb. 8 : Kameramodul mit Zeilensensor ILX751A

Die Leiterplatten der Kamera haben 42mm Kantenlänge. Die Plattenfolge von vorn beginnend ist: Sensorträger - Sensorsteuerung - Pufferspeicher - Netzteil - Interface (hier RS232/485).

Das Systemkonzept zu diesem Kameras wird in [2] beschrieben. Es ist schwerpunktmäßig auf CMOS-Sensoren orientiert, läßt aber den Einsatz von CCD-Sensoren zu.

6. Verweise, Quellen

[1] siehe : www.sarad-mikrosysteme.de --> produkte --> Stereokameras

[2] siehe : www.sarad-mikrosysteme.de --> produkte --> modulares Kamerasystem

[3] siehe : www.sarad-mikrosysteme.de --> dokumente --> applikationen

[4] siehe auch : www.shb-computer.de