

# Digitale Bildverarbeitung

## Einheit 3

### Das Bildverarbeitungssystem

---

Lehrauftrag SS 2006

Fachbereich M+I der FH-Offenburg



Dr. Bernard Haasdonk

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Ziele der Einheit

---

- **Machinelles Visuelles System**
  - In der **Maschinellen Bildverarbeitung** ist wie beim Menschen auch ein "visuelles System" nötig, das die aufgenommenen Bilder verarbeitet.
- **Hardware**
  - Wir werden die **Hardware-Komponenten** eines Bildverarbeitungssystems kennenlernen
- **System-Konzeption**
  - Es werden fachliche Grundlagen für die **Konzeption** eines Bildverarbeitungssystems erarbeitet
- **Technische Vergleichskriterien**
  - Es wird nötiges Grundwissen bereitgestellt, um Komponenten verschiedener Firmen auf Leistungsfähigkeit und Kompatibilität hin miteinander **vergleichen zu können**.

## Gliederung

- Das Bildverarbeitungssystem
- Beleuchtung in der Bildverarbeitung
  - Lichtquellen
  - Beleuchtungsarten
- Die CCD-Kamera
  - Videonormen
  - CCD-Wandler-Techniken und Chipformate
  - Bauformen von CCD-Kameras
- Neuere Kameraentwicklungen
- Kameraobjektive
  - Optische Grundlagen
  - Objektivarten
  - Zubehör für Objektive
- Die Bildverarbeitungskarte
- Digitalisierung von Bildern

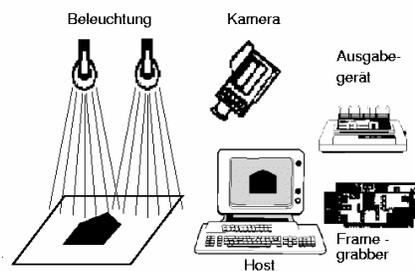
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

3

## Das Bildverarbeitungssystem

- Ein Bildverarbeitungssystem besteht aus
  - Beleuchtungsanlage
  - Bildsensormsystem, Beispiel: digitale Kamera
  - Bildverarbeitungskarte (Analog-Digital-Wandlung)
  - Rechner, der die Infrastruktur zur Verfügung stellt
  - Ausgabeperipherie (Monitor, Drucker, Projektor)



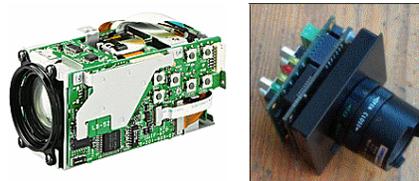
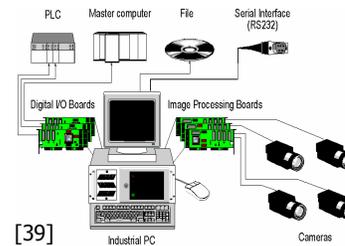
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

4

## Beispiele für BV-Systeme

- **Großes System**
  - In der Regel ist ein Bildverarbeitungssystem in eine größere Rechnerlandschaft eingebettet und über interne und externe Netze verbunden.
- **Kleine Systeme**
  - Das gesamte Bildverarbeitungssystem kann auch direkt auf der Kamera realisiert sein.
  - **VLSI Technik** (*Very Large Scale Integration*) ermöglicht die Realisierung des gesamten Bildverarbeitungssystems direkt auf einer Minikamera.



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

5

## Beleuchtung

- **Relevanz:**
  - „Jeder in die Beleuchtung investierte Euro spart zwei in der Weiterverarbeitung“
  - Das Beleuchtungsproblem ist oft das größte Problem in der Bildverarbeitung
  - Beleuchtung entscheidet wie leicht die BV-Aufgabe gelöst werden kann
- **Ziel:**
  - Optimaler **Dynamikbereich** und **Kontrast**
  - **Homogene** und **zeitlich konstante** Beleuchtung
- **Auswahl an Lichtquellen:**
  - Tageslicht            Glühlampen            Leuchtstoffröhren
  - Halogenlampen      Entladungslampen    Leuchtdioden (LEDs)
  - Laserdioden          Infrarotlichtquellen
- **Auswahl von Beleuchtungsmöglichkeiten:**
  - Auflichtbeleuchtung                      Durchlichtbeleuchtung
  - Hellfeldbeleuchtung                      Dunkelfeldbeleuchtung
  - Diffuse Beleuchtung                      Strukturierte Beleuchtung

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

6

## Lichtquelle Tageslicht

- Vorteil: **kostenlose und allgegenwärtige** Verfügbarkeit
- Für Bildverarbeitung ist es i.a. **nachteilig** durch seine Unkontrollierbarkeit
  - Keine Einstellungsmöglichkeiten
  - Helligkeits- und Farbschwankungen
  - Abhängig von Wetterverhältnissen Tageszeit und Jahreszeit
- Ähnlich ungeeignet ist das **unkontrollierte Licht** in einer Produktionshalle.
- Oft ist unkontrolliertes Licht unvermeidbar, dies stellt immer eine besondere Herausforderung für die nachfolgende Bildverarbeitung dar.
- **Beispiel** einer der wenigen erfolgreichen Anwendungen:
  - Überwachung des Pflanzenwachstums
  - Aufnahmen jeden Tag zur selben Tageszeit
  - Lichtfarbe in etwa konstant, es ändert sich lediglich die Intensität.
  - Intensitätsschwankungen und geringe Schwankungen in der Farbe können jedoch durch Kalibrierung bei der nachfolgenden Bildverarbeitung ausgeglichen werden.



[40]



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

7

## Lichtquelle Glühlampen

- Vorteil: **sehr preiswert**
- Nachteile
  - **Ungleichförmiges** Beleuchtungsfeld
  - Starke **Eigenwärmeentwicklung** (Draht fast 2500 °C)
  - **Geringe Lichtausbeute** (Größtenteils nicht-sichtbare Wärmestrahlung)
  - Geringe **Lebensdauer** des Wolframdrahts (750-1000h)
  - **Helligkeitsschwankung** durch Spannungsänderung
- **Frequenzkonflikt:**
  - Sie sind ungeeignet, wenn die Bildauslesefrequenz kein Vielfaches der Netzfrequenz beträgt.
  - Dies ist oft bei Kameras der Fall, die nicht der Videonorm unterliegen, beispielsweise bei Zeilenkameras.
  - Phasenverschiebungen können hier zu Interferenzen führen, die sich durch Streifen auf dem Bild bemerkbar machen



Glühlampe: 230 V, 60 W, 720 lm, E27, Höhe etwa 110 mm

[41]

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

8

## Lichtquelle Halogenlampen

- Glühlampen mit einem Halogen als Füllgas-Zusatz (Jod, Brom)
- Vorteil gegenüber Glühlampen:
  - Höhere Betriebstemperatur (3300 °C),
  - dadurch weniger Intensitätsschwankungen,
  - quasi-konstante Lichtquellen
  - keine Frequenzprobleme
  - Lebensdauer ist erhöht (2000-4000h)
- Halogen-Kreisprozess:
  - Verdampfen der Wolfram-Atome und Abkühlung
  - Gasförmige Verbindung mit den Halogen-Atomen
  - Thermische Strömung der Verbindung zur Wendel
  - Zerlegung in ihre Bestandteile
  - Wolfram kondensiert an der Wendel.



[43]

[43]

[43]

Zeilen-, Ring- und Flächenleuchte

[42]

[42]

Punkt, Zeilen-, Flächen- und Ringleuchten

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

9

## Lichtquelle Leuchtstoffröhren

- Lichtentstehung
  - Quecksilber in Füllgas strahlt UV Licht ab
  - wird von Leuchtstoff auf der Oberfläche in sichtbares Licht verwandelt
- Vorteile im Vergleich zu Glühlampen
  - großes, homogenes Ausleuchtungsfeld
  - Können mit Frequenzgleichrichtern betrieben werden, um eine Modulation des Lichts und Interferenzen zu verhindern.
  - wenig Eigenwärmeentwicklung.
  - Längere Lebensdauer (6000-18000h)
- Eventueller Nachteil
  - spektrale Begrenzung durch das Füllgas
  - je nach Einsatzort kann dies sogar gewünscht sein.
- Leuchtstoffröhren oft zur Ausleuchtung einer Szene eingesetzt



[41]

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

10

## Lichtquelle Leuchtdioden

- **Lichtentstehung**
  - Durch Halbleiter bei **korrekt gerichteter** Spannung.
- **Vorteile:**
  - Klein, geringes Gewicht
  - Günstige Anschaffung und Betrieb
  - Nahezu trägheitslose Steuerung der Lichtintensität
  - Abstrahlen in engem Wellenlängenbereich
  - Lange Lebensdauer (100000h)
  - Keine Hitze, Geräusch, Vibration oder hohe Spannung
  - Unempfindlich gegenüber Erschütterungen
- Auch als Einspeiseliichtquellen für Lichtwellenleiter verwendet



LED Ringleuchte



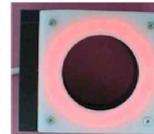
LED Array



Zwei LED Zeilen



Mehr-Farben  
Ringleuchte



Ringleuchte  
mit Diffusor

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

11

## Weitere Lichtquellen

- **Laserdioden**
  - Ähnlich zu Leuchtdiode, zusätzlich optischer Resonanzprozess und Besetzungsinversion
  - Hohe Strahlungsleistung auf kleinstem Raum
  - Monochromasie und Kohärenz.
  - Aus Sicherheitsgründen verwendet man auch ein *Lasermodul*, das Endprodukt aus Laserdiode, Elektronik, Optik + Gehäuse
  - Ein Laserdiodenmodul ist etwa fingernagelgroß und kann damit in räumlich limitierten Systemen integriert und als Laserquelle genutzt werden.
  - Beispiel: Laserpointer, Animationstechnik (Linien-Muster-Projektionen)
- **Gasentladungslampen**
  - Füllgas gibt unter Spannung Licht ab
  - Spektrum in Abhängigkeit vom Füllgas kontinuierlich oder diskret
  - Hohe Strahlungsdichten
  - Zeitlich konstante Leuchtkraft
  - Möglichkeit zur stroboskopischen Beleuchtung
- **Infrarotlichtquellen**
  - Verwendung mit Infrarotkameras und Tageslichtsperrfilter verhindert Umgebungslicht-Einflüsse.

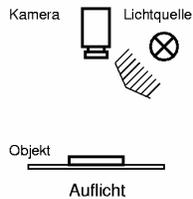


1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

12

## Beleuchtung mit Auflicht



- Kamera und Lichtquelle befinden sich auf derselben Seite des Objekts.
- Man erhält ein Bild der vom Objekt reflektierten Lichtintensitätsverteilung.
- Bildgebend ist sowohl das direkt reflektierte als auch ein Teil des gestreuten Lichts.
- Problematisch: Stark spiegelnde Oberflächen

- Beispiele für Auflichtbeleuchtung:
  - Tageslichtbeleuchtung in einem Gewächshaus
  - Beleuchtung mit Flächenleuchten
  - Beleuchtung mit faseroptischen Punktleuchten
  - Lesen von Etiketten

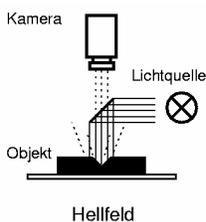


1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

13

## Hellfeld-Beleuchtung



- Wie bei der Auflicht-Beleuchtung sind Kamera und Lichtquelle auf derselben Seite des Objekts.
- Ein halbdurchlässiger Spiegel verhindert, daß Streulicht in die Kamera gelangt.
- Bildgebend ist hauptsächlich das **direkt reflektierte** Licht.
- Hellfeldbeleuchtung ergibt ein helles Bild, worin die interessierenden Bereiche dunkel dargestellt sind.

- Beispiel für Hellfeld-Beleuchtung:
  - „Bärtierchen“



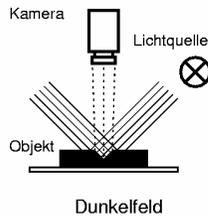
[44]

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

14

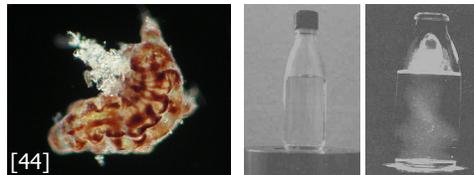
## Dunkelfeld-Beleuchtung



- Auch hier sind Kamera und Beleuchtung auf derselben Objektseite
- **Großer Winkel** zwischen Licht und Kamerarichtung verhindert dass direkt reflektiertes Licht aufgenommen wird.
- Hier ist das **gestreute Licht** bildgebend
- Man erhält ein dunkles Bild, worin die interessierenden Bereich hell dargestellt sind.

### Beispiele für Dunkelfeld-Beleuchtung:

- „Bärtierchen“
- Flasche mit klarem Inhalt und Aufsichtbeleuchtung. Unreinheiten im Glas oder in der Flüssigkeit können nicht erkannt werden.
- Flasche und Dunkelfeldbeleuchtung. Unreinheiten werden sichtbar.

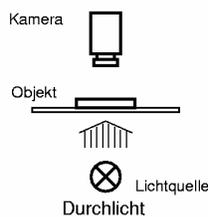


1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

15

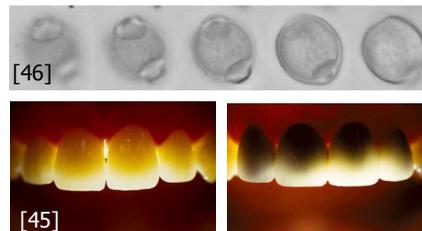
## Beleuchtung mit Durchlicht



- Kamera und Lichtquelle sind auf **gegenüberliegenden Seiten** des Objekts angeordnet.
- In der Aufnahme ist die dunkle Form des Objekts vor hellem Hintergrund sichtbar
- Diese Anordnung kommt zum Einsatz, wenn ein Objekt durch seine Form beschrieben werden soll
- Anwendung auch bei Aufnahmen des Inneren von Objekten

### Beispiele für Durchlichtbeleuchtung:

- Beleuchtung für Mikroskopische Aufnahmen
- Durchlichtbeleuchtung macht Unterschied zwischen Kronen aus Keramik und Kronen mit Metallgerüst sichtbar



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

16

## Diffuse Beleuchtung

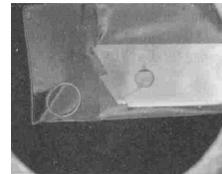
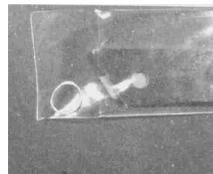


[42]



[47]

- Falls die Oberfläche eines zu beleuchtenden Objekts **stark reflektiert**, kann keine direkte Beleuchtung eingesetzt werden
  - Abhilfe schafft hier der Einsatz von **diffusem Licht**, wie es etwa durch einen völlig bewölkten Himmel entsteht.
  - Dazu richtet man das direkte Licht auf einen **Diffusor**, im einfachsten Fall ein weißes Laken, so das auf das Objekt lediglich das Streulicht fällt.
- Beispiel für Diffuse Beleuchtung:
    - Reflektierende Verpackung unter direkter Aufsichtbeleuchtung: die Reflexe verhindern ein Erkennen der verpackten Objekte.
    - Diffuse Aufsichtbeleuchtung: die Reflexe werden vermindert, so dass der Packungsinhalt erkennbar wird

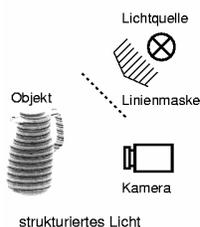


1.4.2006

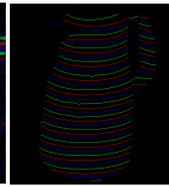
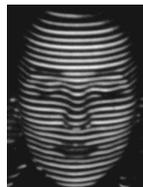
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

17

## Strukturierte Beleuchtung



- Anwendung zur Vermessung von dreidimensionalen Objekten
  - Es werden durch Blenden oder ein Lasermodul Linien oder ein Gitter auf das Objekt projiziert
  - Aus den Positionen des Gitters, der Beleuchtung und der Kamera kann man die wirkliche dreidimensionale Form des Objekts zurückrechnen
- Beispiele von strukturierten Beleuchtung
    - Projizierte Linien auf ein Gesicht, Höhere Auflösung durch Farbeinsatz
    - Liniextraktion durch „Skelettierung“



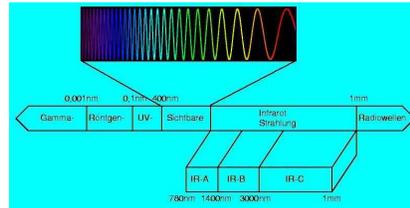
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

18

## Bildgebende Verfahren / Sensorsysteme

- BV erfordert nicht notwendig „optische Bildinformationen“
- Jedes Sensorsignal, welches Intensitätswerte in Abhängigkeit des Ortes liefert, eignet sich zur Bildaufnahme
- Bildgebende Systeme:
  - Photokamera, Videokamera, Laserscanner
  - Computer-Tomograph, Thermographie-Aufnahmeverfahren, etc.
- meist spielen CCD - Sensoren eine zentrale Rolle
- Empfindlichkeit für einen Ausschnitts des elektromagnetischen Spektrums
  - Gamma-Strahlung
  - Röntgen
  - Sichtbares Licht
  - Infrarot
  - Radiowellen
- Andere Sensoren zur Bildgewinnung
  - Schallsensoren, magnetische Sensoren



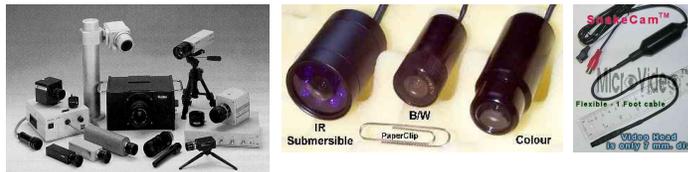
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

19

## Beispiele für CCD Kameras

- Auswahl an „Charge-Coupled Device“ Kameras:



- Was wir in diesem Abschnitt lernen werden

- Was heißen Begriffe wie

- Progressive Scan
- IT
- Micro-Lens
- 2/3"
- Full-Frame Sensor
- TV-Linien
- C-Mount
- Integrationszeit, ...



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

20

## Videonorm

- Die meisten angebotenen Kameras unterliegen einer Videonorm
  - eine Art „Übertragungsprotokoll“ des Videosignals, eine Schnittstellendefinition zwischen Echtzeitbildgebungs- und Darstellungs-Systemen
- Sinn einer Normierung
  - Austauschbarkeit, Kombinierbarkeit von Komponenten verschiedener Hersteller
- Ideale Folgeerscheinung
  - Sehr weite Verwendbarkeit, Massenproduktion, günstigen Preise, die auch im privaten Anwenderbereich erschwinglich sind
- Übliche Fernsehnormen:

	Schwarzweiß	Farberweiterung
Europa	CCIR	PAL / SECAM
USA	RS-170	NTSC

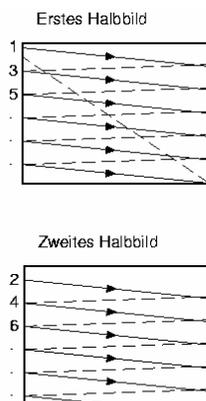
- Basierend auf Röhrenkameras und –Monitoren, bei Digitalgeräten wirkt es sehr seltsam...

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

21

## Videonorm



Nachteil: Kammefekt bei schnell bewegten Szenen:

- Interlace (Zeilensprung) Verfahren:
  - Flimmerfreies Bild (Frame) durch Abtasten von 2 Halbbildern (Fields)
  - Der Strahl beginnt in der linken oberen Ecke.
  - Nach dem Erreichen des ersten Zeilenendes läuft der dunkelgetastete Strahl zurück an den Beginn der dritten Zeile.
  - Während des Strahlrücklaufs erfolgt der Horizontal Synchronisations-Impuls (*H-Sync*)
  - Auf diese Weise scant der Strahl das erste Halbbild mit allen ungeraden Zeilen.
  - Vertikal Synchronisations-Impuls (*V-Sync*) bewirkt Beginn des nächsten Halbbildes



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

22

# Videonorm

## Einige Details

Anzahl der Halbbilder gleich Netzfrequenz, um Schwebungen zu vermeiden

Gesamt-Zeilen-Anzahl entspricht nicht den sichtbaren, da Steuerungssignale einige „Zeilen“ benötigen, insbesondere Bildwechsel

Die Parameter der Videonormen CCIR und RS-170		
	CCIR	RS-170
Bildaufbau	Interlace	Interlace
Farbsystem	PAL/SECAM	NTSC
Halbbilder pro Sekunde	50	60
Zeit für ein Halbbild	20 ms	16.6 ms
Zeit für einen Bildaufbau	40 ms	33.3 ms
Zeilenzahl gesamt	625	525
Zeilendauer	40 ms/625 = 0.064 ms	33.3 ms/525 = 0.0635 ms
Zeilenfrequenz	1/0.064 ms = 15.625 kHz	1/0.0635 ms = 15.750 kHz
Bildinformation pro Zeile	0.052 ms	0.0527 ms
Austastimpulsdauer	0.012 ms	0.0108 ms
Bildwechsel	3.25 ms = 50 Zeilen	2.54 ms = 40 Zeilen
Sichtbare Zeilenzahl	575	485
Bildformat (Breite-Höhe)	4:3	4:3
Pixel pro Zeile	575 x 4/3 = 767	485 x 4/3 = 647
Pixeldauer	0.052 ms/767 = 67.8 ns	0.0527 ms/674 = 78.2 ns
Pixelfrequenz	1/67.8 ns = 14.75 MHz	1/78.2 ns = 12.8 MHz
Linienpaare	767/2 = 383.5	647/2 = 323.5
Horizontale Auflösung	14.75 MHz/2 = 7.375 MHz	12.8 MHz/2 = 6.15 MHz
Kanalbreite	5 MHz	4.2 MHz

PAL und NTSC sind nicht kompatibel allein schon durch unterschiedliche Frequenz

Seitenverhältnis 4:3 bestimmt horizontale Pixelanzahl

Vertikale „Linienpaare“ oder „TV-Linien“ ist entscheidendes „Auflösungs“-Maß

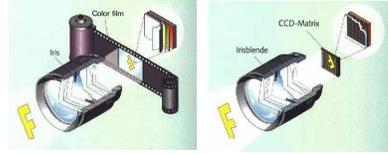
# Videonorm

- Probleme:
  - Kammeffekt
  - Geringe Integrationszeit: Pro Pixel 20 ns!
  - Schwierige Problemanpassung
- Lösung:
  - Videonorm-freie Kameras mit Langzeitintegration
  - Progressive Scan Kameras: wirklich zeilenweise Übertragung
  - Nachteil: teurer, da nicht Massenprodukte
- Die neueste Norm ist die HDTV-Norm
  - Japan voraus, USA etwas verzögert, Europa sehr langsam
  - Vorteile:
    - Das Interlace-Verfahren wird durch das Progressive-Scan Verfahren abgelöst
    - Das Seitenformat 16:9
    - Sehr hohe Bildqualität
  - Nachteil:
    - Inkompatibel zu bestehenden Videonormen



## CCD-Wandler Techniken

- **Filmkamera**
  - der fotoempfindliche Film wird zum Objektiv bewegt, belichtet und weitertransportiert.
- **CCD-Kamera:**
  - An die Stelle des Films tritt der CCD - Sensor
- **Qualität des Bildsensors ist verantwortlich für möglichst hohe**
  - Bildauflösung, Farbtreue, guten Signal- zu- Rauschabstand.
- **Die Funktionsweise beruht auf dem *inneren Photoeffekt***
  - Einfallendes Licht erzeugt auf Halbleitermaterial Ladungsträger
  - diese werden getrennt und wie in einem Kondensator gespeichert.
  - Ein verbundener MOS-Transistor funktioniert wie ein Schalter: Ladung wird auf dem Kondensator gesammelt (*integriert*) oder bei Schließen des Schalters abgeführt
  - Die integrierte Ladungsmenge ist proportional zum Lichteinfall.



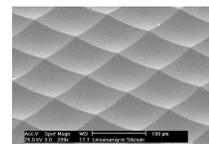
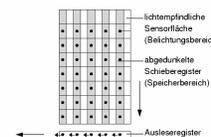
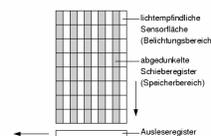
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

25

## CCD-Wandler Techniken

- **Interline-Transfer-Sensor**
  - *Deutsch: Zwischenzeilen-Transfer-Sensor*
  - streifenförmig in Belichtungs- und Speicherbereiche unterteilt
- **Der Ladungstransport beim Interline-CCD-Sensor:**
  - 1. Schritt: Aufintegrierte Ladungen werden in die abgedunkelten Schieberegister übernommen
  - 2. Schritt: Ladungen werden in das horizontale Ausleseregister übernommen
  - 3. Schritt: Ladungen werden seriell ausgelesen.
- **Reduzierte Lichtempfindlichkeit**
  - aktive, lichtempfindliche Sensorfläche nimmt nur kleinen Teil der Sensorzelle ein.
  - **Lens-on-Chip-Technik:** Mikrolinsen auf einzelnen Sensorzellen lenken Licht um, welches auf die Stege und den Speicherbereich fallen würde



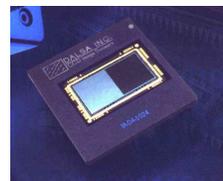
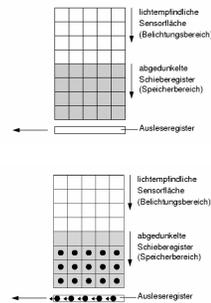
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

26

## CCD-Wandler Techniken

- **Frame-Transfer-Sensor**
  - Belichtungs- und der Speicherbereich sind in zwei großen Blöcken angeordnet
- Der Ladungstransport beim Frame-Transfer CCD-Sensor:
  1. Schritt: Aufintegrierte Ladungen werden parallel in die abgedunkelten Schieberegister übernommen
  2. Schritt: Ladungen werden in das horizontale Ausleseregister übernommen
  3. Schritt: Ladungen werden seriell ausgelesen.
- Foto eines Frame-Transfer-CCD-Sensors.
  - Deutlich ist der lichtempfindliche und der abgedunkelte Speicherbereich zu erkennen.



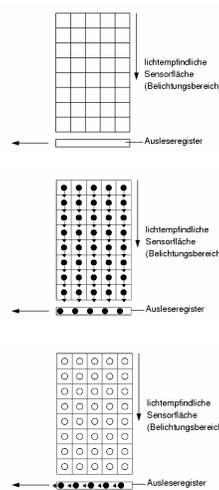
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

27

## CCD-Wandler Techniken

- **Full-Frame-Transfer-Sensor**
  - Es existiert kein eigener Speicherbereich
  - Die komplette Sensorfläche ist lichtempfindlich
  - Ladungen werden integriert solange der Shutter geöffnet ist.
- Der Ladungstransport beim Full-Frame-Transfer CCD-Sensor:
  1. Schritt: Nach der Integrationszeit wird der Kamera-Shutter geschlossen und die Ladungen zeilenweise ausgelesen.
  2. Schritt: Ladungen werden seriell ausgelesen.
- Keine interne Steuerung der integrationszeit möglich
- Sehr hohe Bildübertragungsraten, hochauflösende Kameras möglich



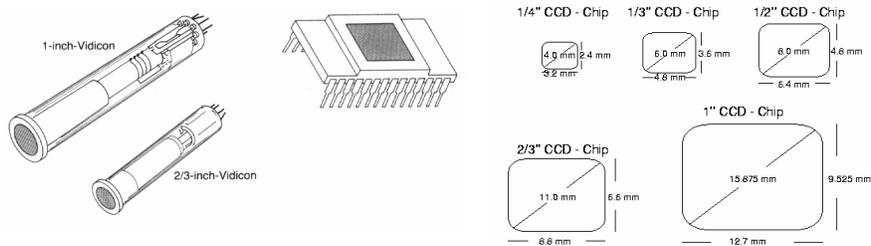
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

28

## CCD-Chip Formate

- CCD-Chips werden in verschiedenen Aufnahmeformaten angeboten.
  - Chipgrößen von Röhrenkameras übernommen.
  - Typische Durchmesser dieser Röhren sind 1" (Zoll), 2/3" und 1/2"
  - Eine Aufnahmeröhre mit 1" Außendurchmesser (25.4 mm) hatte ein rechteckiges, aktives Fenster mit einer Diagonalen von 16 mm.
  - 1/2" und 1/3"-Chips finden immer mehr Anwendung, vor allem bei Überwachung, Miniaturkameras und bei Home-Videokameras.
  - In der Meßtechnik ist dagegen der 2/3 Zoll-Chip immer noch dominierend und wird es auch noch in absehbarer Zeit bleiben.



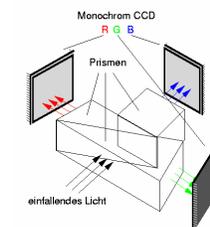
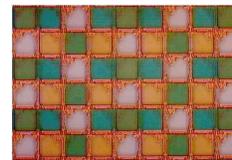
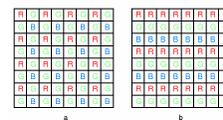
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

29

## CCD-Kamera-Bautechniken

- Schwarzweiß-Kameras:
  - Einzelner CCD-Chip
- Einchip-Farbkameras
  - Mikro-Streifen oder Mikro-Mosaikfilter auf CCD-Pixeln
  - Reduzierte Auflösung
  - Schwierigere Verarbeitung
- Dreichip - Farbkameras
  - Für jede Primärfarbe einen CCD-Sensor
  - Über vorgeschaltete Prismen wird das Licht in die drei Grundfarben zerlegt und auf den jeweiligen Sensor gelenkt
  - Die drei CCD-Sensoren können dann in verschiedenen Bildspeicherbereichen ausgelesen und getrennt verarbeitet werden.
  - einfache Verarbeitung durch Pixelkorrespondenzen



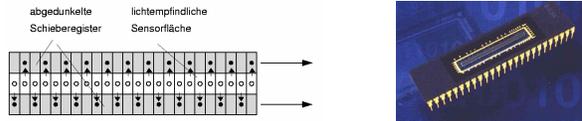
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

30

## CCD-Kamera-Bautechniken

- Zeilenkameras
  - Hohe Auflösung, z.B: 8000 Pixel
  - Hohe Pixeltaktrate, mehr als 30 MHz möglich unter dem Nachteil der geringen Integrationszeiten
  - Wechselseitiges Auslesen der Ladungen um Verluste bei Ladungsverschiebung zu reduzieren



- Hochgeschwindigkeitskameras
  - Frame-Transfer Kamera, Bildgröße 512x512 Pixeln bis zu 1000 Bilder pro Sekunde



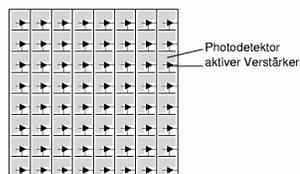
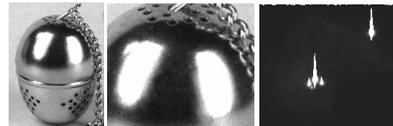
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

31

## Neuere Kamera-Techniken

- CCD-Sensoren haben noch **gravierende Nachteile**.
  - Flaschenhals des seriellen Auslesens
  - Kleiner Dynamikbereich
  - Blooming: Überlaufen der Ladungen in benachbarte Pixel
- CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
  - Herstellung wie Mikrochips
  - Pixel: Photoempfindliche Dioden mit Widerstand in Reihe
  - Statt „Integration“ kontinuierliche Spannungsanpassung
  - Rauschverminderung durch APS (Active Pixel Sensor)



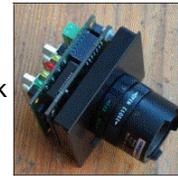
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

32

## Neuere Kamera-Techniken

- Vorteile von CMOS-kameras
  - Spannung ist Logarithmische Kurve der Intensität
  - Hoher Dynamikbereich: 6 Dekaden statt 2-3
  - Wahlfreier Zugriff
  - Alle Kamera-Funktionen auf einem Chip durch VLSI Technik
  - Niedriger Stromverbrauch: Faktor 100 reduziert zu CCD
  - Niedriger Preis
  - Kein Pixelüberlauf
  - Hohe Datenrate durch parallele Übertragung. Grenze etwa bei 1000 Bildern mit 1 Megapixel pro Sekunde
- Beispiele für hohen Dynamikbereich:



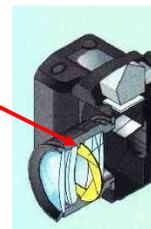
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

33

## Kameraobjektive

- Ein Kameraobjektiv besteht aus
  - einem Linsensystem und
  - einer oder mehreren Blenden
- Wichtige Parameter eines Objektivs sind
  - die Brennweite  $f$ , die Vergrößerung  $m$  und die Brechkraft  $D$
  - die minimale Objektdistanz MOD
  - Einstellbare Blendenzahl  $k$
  - der Bildwinkel und der Bildausschnitt
  - die Schärfentiefe und die hyperfokale Distanz



1.4.2006

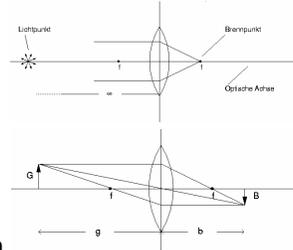
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

34

## Optische Grundlagen

- Das Abbildungsprinzip einer dünnen Linse
  - Lichtstrahlen aus dem Unendlichen fokussieren im **Brennpunkt**
  - Abstand zwischen Linsenmitte und Brennpunkt ist **Brennweite f**
  - Lichtstrahlen durch die Linsenmitte werden nicht abgelenkt
  - Ein scharfes Bild entsteht dort, wo sich die Strahlen eines Objektpunktes schneiden
  - Je kleiner die **Gegenstandsweite g**, desto größer muss die **Bildweite b** sein.
  - Exakter Zusammenhang: **Descartes Linsengleichung**

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$
  - Der **Vergrößerungsfaktor m** ist das Verhältnis von **Bildhöhe B** und **Gegenstandshöhe G**. Dies ist gleich dem Verhältnis von Bildweite und Gegenstandsweite
 
$$m = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$
  - Die **Brechkraft D** (Einheit **Dioptrie**) ist der Kehrwert der Brennweite:
 
$$D = 1/f$$
- Näherungsweise Gültigkeit bei dicken Linsen und Linsensystemen



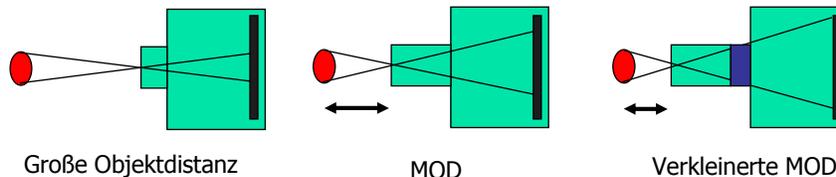
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

35

## Optische Grundlagen

- Die **Minimale Objektdistanz MOD**
  - Fokussierung bedeutet nichts anderes als die Veränderung des Abstandes zwischen Objektiv und CCD-Chip
  - Offensichtlich sind der Veränderung mechanische Grenzen gesetzt.
  - Gewöhnlich erlaubt ein Objektiv die Fokussierung vom Unendlichen bis zur sogenannten **Minimalen Objektdistanz**
  - Die MOD ist mit Hilfe von Zwischenringen verkleinerbar, indem der Abstand zwischen Linse und Chip vergrößert wird



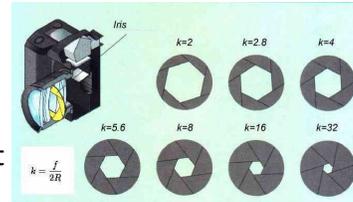
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

36

## Optische Grundlagen

- Die Rolle der Blende
  - Sie legt den Lichteinfall fest.
  - Die auf den Sensor fallende Lichtmenge ist proportional zu Blendenöffnung und Belichtungszeit
- Die Blendenzahl  $k$



- Sie ist proportional zur Brennweite  $f$  und umgekehrt proportional zum Blendenradius  $R$ .
- Bei handelsüblichen Spiegelreflexkameras kann sie in Abstufungen von der Wurzel aus 2 eingestellt werden:  
 $k = 0.71, 1, 1.4, 2.0, 2.8, 4, 5.6, \text{ usw.}$
- Eine kleine Blende impliziert eine große Schärfentiefe, zieht aber unerwünschte Beugungserscheinungen nach sich.
- Eine große Blende führt zu unscharfen Bildern wenn das aufgenommene Objekt Unebenheiten aufweist.
- Vergrößert man die Blendenzahl um den Faktor 2, so verkleinert sich die Lichtmenge um den Faktor 4.

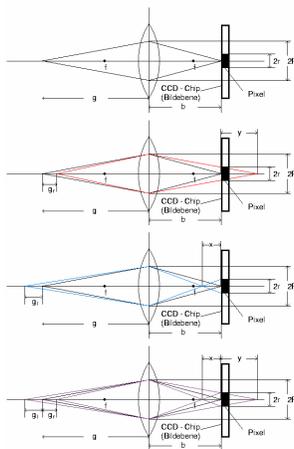
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

37

## Optische Grundlagen

- Die Schärfentiefe



- Ein Lichtpunkt, der bei  $g$  liegt, ergebe ein scharfes Bild
- Wird der Lichtpunkt um den Betrag  $g_r$  nach rechts verschoben, so verschiebt sich das Bild um den Betrag  $y$  nach rechts.
- Wird der Lichtpunkt um den Betrag  $g_l$  nach links verschoben, so verschiebt sich das Bild um den Betrag  $x$  nach links.
- Die Anzahl der Photonen, die während der Integrationszeit auf das Pixel fällt, ist die gleiche in allen drei Fällen, der registrierte Wert im Pixel ist also identisch.
- Die linksseitige Schärfentiefe  $g_l$  und die rechtsseitige Schärfentiefe  $g_r$  ergeben zusammen die Schärfentiefe.
- Die Schärfentiefe ist abhängig von Blendenzahl  $k$ , Brennweite  $f$ , Gegenstandsweite  $g$  und Pixelbreite  $2r$
- Beachten Sie, dass der linke und der rechte Anteil der Schärfentiefe nicht gleich sind.

$$g_l = \frac{2rk g(g-f)}{f^2 - 2rk(g-f)} \quad g_r = \frac{2rk g(g-f)}{f^2 + 2rk(g-f)}$$

1.4.2006

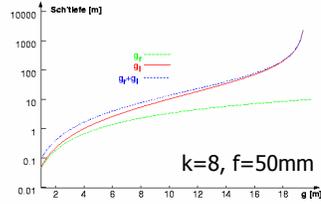
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

38

# Optische Grundlagen

## Die hyperfokale Distanz

- Je weiter das Objekt entfernt ist, desto größer ist die Schärfentiefe
- Ab einer gewissen Entfernung, der hyperfokalen Distanz, wird die Schärfentiefe unendlich groß.
- Die Schärfentiefe für verschiedene Gegenstandsweiten  $g$ :



Blendenzahl  $k=8$   
Brennweite  $f=50\text{mm}$

scharf eingestellt wurde das Püppchen mit dem grünen Rock.



1.4.2006

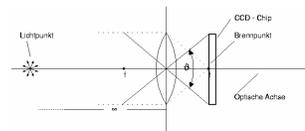
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

39

# Optische Grundlagen

## Der Bildwinkel $\theta$ und der Bildausschnitt

- Sind abhängig von der Brennweite des Objektivs und den Abmessungen des Films oder des CCD-Chips.
- Bildausschnitt und Bildwinkel zu verschiedenen Brennweiten bei einem Kleinbildfilm (36 x 24 mm).



## Bildausschnitte für verschiedene CCD - Formate ( $f = 70\text{mm}$ )



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

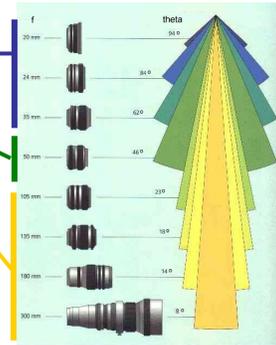
40

# Objektivarten

- Weitwinkel-, Normal- und Teleobjektive
  - Namensgebung ist historisch bedingt, bezieht sich auf eine Bildgröße von 24x36mm (Kleinbildfilm)
  - Einteilung nach Brennweite
    - Weitwinkel:  $f$  kleiner als 50mm
    - Normal:  $f$  ist 50mm
    - Tele:  $f$  größer als 50mm

Öffnungswinkel  $\theta$  für verschiedene Chipgrößen im Vergleich zum 35 mm Film

Format	36x24mm	1"	2/3"	1/2"	1/3"	1/4"
Diagonale [mm]	43.3	16.9	11.0	8.0	6.0	4.0
$f=20\text{mm}$	95°	43°	31°	23°	17°	11°
$f=24\text{mm}$	84°	37°	26°	19°	14°	10°
$f=35\text{mm}$	63°	26°	18°	13°	10°	7°
$f=50\text{mm (Normal)}$	47°	18°	13°	9°	7°	5°
$f=105\text{mm}$	23°	9°	6°	4°	3°	2°
$f=135\text{mm}$	18°	7°	5°	3°	3°	2°
$f=180\text{mm}$	14°	5°	4°	3°	2°	1°
$f=300\text{mm}$	8°	3°	2°	2°	1°	1°

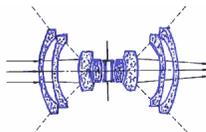


- Für kleine CCD-Chips sind die Begriffe irreführend, da die Bildwinkel kleiner sind
- Namensgebung müsste eigentlich mit jedem neuen, noch kleineren CCD-Chip wieder modifiziert werden.

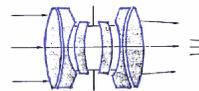
# Objektivarten

- Beispiele von Objektiven mit Linsensystemen [49]

- Weitwinkel-Objektive:

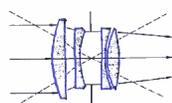


Wild-Aviogon-Objektiv

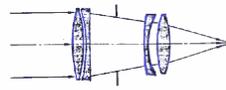


Zeiss Orthogometer-Objektiv

- Normal-Objektive:



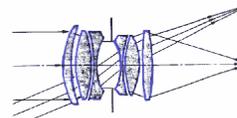
Tessar - Objektiv



Petzval - Objektiv

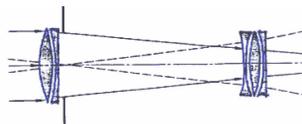


Cooke-(Taylor)-Triplet



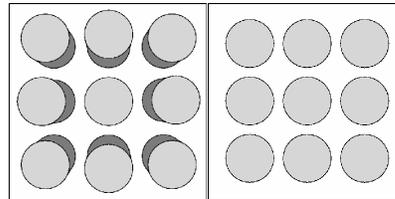
Doppelobjektiv des Gauß-Typs (Biotar)

- Tele-Objektiv: Magnar-Objektiv



## Objektivarten

- Makro-Objektive
  - Anwendung bei **sehr kleinem Abstand zwischen Kamera und Objekt**
  - Abbildungsmaßstäbe zwischen 0.1 und 10
  - Sehr präzise und robust
  - In konsequentester Form verfügen sie weder über eine einstellbare Blende noch über einen einstellbaren Fokus
  - Im Gegensatz zu normalen Objektiven ist das typische Kennzeichen eines Makroobjektivs der Abbildungsmaßstab statt Brennweite
- Telezentrische Objektive
  - Anwendung, falls **perspektivische 3D-Darstellung von Objekten nicht erwünscht** ist.
  - Idee: direkt im Brennpunkt wird eine Blende positioniert, so daß nur zur optischen Achse (nahezu) parallele Strahlen auf den CCD-Chip auftreffen.
  - Nachteil: nur relativ weit entfernte oder kleine (bzgl Linsendurchmesser) Gegenstände oder Flächen können abgebildet werden



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

43

## Objektivarten

- C-Mount und CS-Mount Objektive
  - werden auf das Kameragehäuse aufgeschraubt
  - C-Mount bzw. CS-Mount unterscheiden sich lediglich durch den Abstand zwischen dem Ende des Objektivgewindes und der Brennebene, welches 17.5 mm bzw. 12.5 mm beträgt.
  - Der Ursprung der C- Mount- und der CS-Mount-Objektivformate liegt wieder in der Zeit der Röhrenkameras. Die üblichen Größen sind auch hier 1/3 Zoll, 1/2 Zoll, 2/3 Zoll und 1 Zoll.
  - Generell muss das Objektivformat größer oder gleich dem Chipformat sein, damit Verzeichnissfehler des Objektivs, die hauptsächlich am Linsenrand auftreten, nicht auf dem CCD-Chip abgebildet werden.
- Zoomobjektive
  - Manuelle und motorische Verstellbarkeit der Brennweite
- Videosignalgesteuerte Blende und Fokus
  - Automatische Anpassung der Blendenzahl und Bildweite an die Szene
- Fotografie und Mikroskopie-Objektive
  - Können durch Adapter für CCD-Kameras verwendet werden

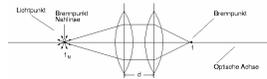
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

44

## Kamera-Zubehör

- Nahlinsen/Makrovorsatzlinsen
  - Werden auf der Kameraabgewandten Seite des Objektivs aufgeschraubt
  - Zweck ist Verringerung der MOD
  - Entfernungsangaben müssen korrigiert werden!
- Zwischenringe
  - zwischen Objektiv und Kamera eingeschraubt
  - Zweck ist ebenfalls Verringerung der MOD durch vergrößern der Bildweite
  - Dicke Zwischenringe ähneln eher Röhren und heißen Verlängerungstubus
- Polarisationsfilter
  - Werden auf der Kameraabgewandten Seite des Objektivs aufgeschraubt
  - Sinnvoll, um Spiegelungen und Reflexe im Bild zu verhindern
  - Von einer Fläche reflektierte Lichtstrahlen sind weitgehend in eine bestimmte Richtung polarisiert, ein Polarisationsfilter kann so gedreht werden, dass es diese Schwingungsrichtung absorbiert.
- Farb- und Effektfilter



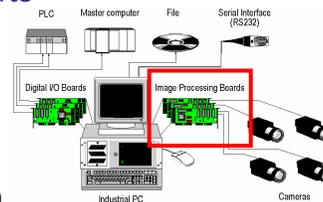
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

45

## Die Bildverarbeitungskarte

- Die **Framegrabber-Karte** oder **Bildaufnahmekarte**
  - Ist keine Grafikkarte!
  - Interface zwischen Kamera(s) und Computer
- Die Anforderungen
  - Daten von **unterschiedlichen Bildgebern**
  - **Daten schnell** verwertbar ablegen
  - Benutzerorientierte und interaktive **Oberfläche**
  - **Anpassbarkeit** für spezielle Einsatzumgebungen
  - **Programmibliotheken** für direkten Hardware-Zugriff
- Die Relevanz nimmt ab
  - Ist im Moment noch die zentrale Einheit eines Bildverarbeitungssystems, besonders bei zeitkritischen Anwendungen und vielen Datenquellen.
  - Jedoch werden mit zunehmender Verfügbarkeit von **CMOS-Bildsensoren** Bildverarbeitungsroutinen mehr und mehr direkt in die Kamera verlegt
  - Mit **steigender Leistungsfähigkeit von PCs**, deren Schnittstellen (USB 2.0, Firewire) und günstigen Speicherbausteinen werden spezielle BV-Kartenzunehmend überflüssig



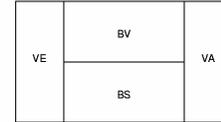
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

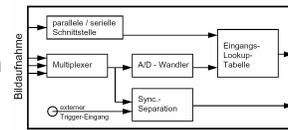
46

## Die Bildverarbeitungskarte

- Modularer Aufbau, um vielfältigen Aufgaben gerecht zu werden
- Konfiguration der Komponenten durch Benutzer
- Die Komponenten
  - das **Videoeingangsteil (VE)**
  - der **Bild - Speicher (BS)**
  - der **Bildverarbeitungsprozessor (BV)**
  - das **Videoausgangsteil (VA)**



- **Videoeingangsteil**
  - Ist die Schnittstelle Bildgeber/Bildspeicher
  - Multiplexer: Kann aus einer Vielzahl von analogen/digitalen Bildquellen selektieren
  - A/D-Wandler: Digitalisieren von analogen Signalen
  - Sync-Separation: Entfernen von Sync-Signalen aus Quelle, Synchronisieren von Bildgebern
  - Vorverarbeitung: frei programmierbare Eingangs-Lookup-Tabelle



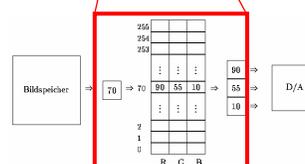
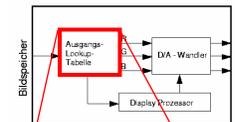
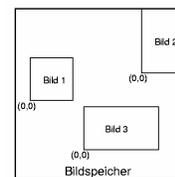
1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

47

## Die Bildverarbeitungskarte

- **Bildspeicher**
  - Frei konfigurierbar: Pixeltiefe, Bildformate
  - Wahlfreier Speicherzugriff über Programmbibliothek
    - Zeilen-, Spaltenweise
    - Rechteckbereiche, Bitebenen
- **Bildverarbeitungsprozessor**
  - Grundlegende Bildverarbeitungsoperationen:
    - Faltung, Filterung
    - Transformationen, Kompression
- **Videoausgangsteil**
  - Signalvorbereitung für analoge Bilddarstellung
  - D/A-Wandlung und Display-Prozessor
  - Ausgangslookup-Tabelle für Einzelkomponenten: ermöglicht z.B. Falschfarben-Darstellung



1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

48

# Digitalisierung von Bildern

- Digitalisierung
  - bezeichnet die Einschränkung einer kontinuierlichen (analogen) Größe auf eine endliche (diskrete) Menge von Werten
- Ist in zweifacher Form im BV-System realisiert:



1. Digitalisierung des Ortes: **Abtasten**
  - Der CCD-Chip liefert kein Intensitätssignal, welches kontinuierlich im Raum ist, sondern Werte für endlich viele Positionen, den Mittelpunkten der CCD-Pixeln.
  - Dies wird „Rastern“, „Abtasten“, „Sampling“ genannt
2. Digitalisierung der Intensität: **Quantisieren**
  - Der A/D-Wandler liefert keine kontinuierlichen Intensitätswerte pro Pixel, sondern eine endliche Menge von Graustufen
  - Dies wird „Quantisierung“ genannt, der Extremfall ist „Binarisierung“ bei lediglich zwei Intensitätswerten

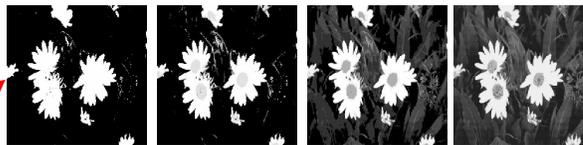
# Digitalisierung von Bildern

## ■ Quantisierung

- Beispiel  
400x400  
Pixel Bild



Grauwert-Quantisierung mit 1,3,4,6 Bit:



Quantisierung mit 1,2,3,4 Bit pro RGB-Farbkanal:



60000      120000      180000      240000 Byte

- Der Mensch ist nicht sehr empfindlich für grobe Quantisierung
- Auflösung ist im wesentlichen durch den Speicher begrenzt
- Typische Auflösungen sind 24 Bit (8 Bit pro Farbe) pro Pixel

## Digitalisierung von Bildern

- Abtastung

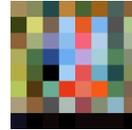
- Beispiel:  
Farbbild  
24 Bit  
pro Pixel



2x2 Pixel  
12 Byte



4x4 Pixel  
48 Byte



8x8 Pixel  
192 Byte



16x16 Pixel  
768 Byte



32x32 Pixel  
3072 Byte



64x64 Pixel  
12288 Byte



128<sup>2</sup> Pixel  
49152 Byte



256<sup>2</sup> Pixel  
196608 Byte



512<sup>2</sup> Pixel  
786432 Byte

- Der Mensch ist relativ empfindlich für Unterabtastung
- Auflösung ist durch den CCD-Chip begrenzt
- Überabtastung verbessert nicht den Bildeindruck
- Speicherbedarf steigt quadratisch mit der Abtastrate

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

51

## Digitalisierung von Bildern

- Falsche Wahl der Diskretisierungsaufösung kann also
  - zu großem Informationsverlust oder
  - zu großem Speicherverbrauch führen.
- Was ist die Richtige Wahl der Quantisierungsaufösung?
  - Die CCD-Pixel-Intensitäten schwanken durch Photonen-Rauschen, es macht keinen Sinn, die Schrittweiten der Graustufen unterhalb der Rausch-Amplitude zu wählen
- Was ist die richtige Wahl der Abtast-Rate?
  - Shannon's Abtast-Theorem:
  - Bei bandbegrenzten Bildern kann die Abtastung durchgeführt werden, so dass KEIN Informationsverlust entsteht.
  - Hierzu muss die Abtastrate kleiner als die doppelte Grenzfrequenz gewählt werden:  $\Delta x \leq \frac{1}{2f_0}$

1.4.2006

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2006, Einheit 3

52

## Zusammenfassung

- Eine Bildverarbeitungsanlage besteht aus:
  - einer **Beleuchtungsanlage**
  - einer **Sensoreinheit**, beispielsweise einer CCD –Kamera
  - Einem zugehörigen **Objektiv** (Format größer/gleich Chip)
  - einer **Bildverarbeitungskarte** bei zeitkritischen Aufgaben
  - **Rechner** zur weiteren Verarbeitung, Weiterleitung der Resultate
  - geeigneter **Peripherie zur Ausgabe** der Ergebnisse
- Alle Komponenten sowie die Optik müssen optimal aneinander und dem Ziel angepasst werden.
- Die Entwicklung geht in Richtung von
  - „**Intelligenten Kameras**“, die komplette BV-Systeme darstellen
  - BV-Systemen unter Verwendung von **herkömmlichen PCs**
- Beim Digitalisieren von Bildern
  - erfolgt eine **Diskretisierung** in Ort und Intensität
  - Die **Auflösung** muss der Aufgabe angepasst sein, um **relevante Information** zu erhalten, aber **Speicher-Verschwendung** zu vermeiden

## Bild-Referenzen

Die Bilder stammen aus dem WBT/Skript von Frau Prof. Erhardt oder aus den angegebenen bzw. folgenden Quellen (identische bzw. fortgesetzte Nummerierung wie im Skript):

[39] NeuroCheck, [http://www.neurocheck.com/index\\_e.html](http://www.neurocheck.com/index_e.html)

[40] Staatliche Bibliothek von Queensland, <http://map.slq.qld.gov.au/map-construction.mpg>

[41] Wikipedia

- [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gluehlampe\\_01\\_KMJ.jpg](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gluehlampe_01_KMJ.jpg),
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5b/Leuchtstofflampen-ghtaube050409.jpg/800px-Leuchtstofflampen-ghtaube050409.jpg>
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/da/Ledmrp.jpg>

[42] Polytec GmbH, <http://www.polytec.com>

[43] Schott-Fostec GmbH, <http://www.us.schott.com/fiberoptics/english/>

[44] <http://www.baertierchen.de/okt2004.html>

[45] AG Keramik, D. Edelhoff, <http://www.ag-keramik.de/news20edelhoff.htm>

[46] O. Ronneberger, E. Schultz, and H. Burkhardt. Automated Pollen Recognition using 3D Volume Images from Fluorescence Microscopy. *Aerobiologia*, 18, pages 107-115, 2002.

[47] Medical and Scientific Photography, [http://msp.rmit.edu.au/Article\\_03/02b.html](http://msp.rmit.edu.au/Article_03/02b.html)

[48] Optronics GmbH, <http://www.optronics.com/>

[49] Prof. Dr. M. Wülker, FH-Offenburg, <http://mv-sirius.m.fh-offenburg.de/wuelker/mwuelker.htm>