

Digitale Bildverarbeitung

Einheit 3

Das Bildverarbeitungssystem

Lehrauftrag SS 2008

Fachbereich M+I der FH-Offenburg



Dr. Bernard Haasdonk

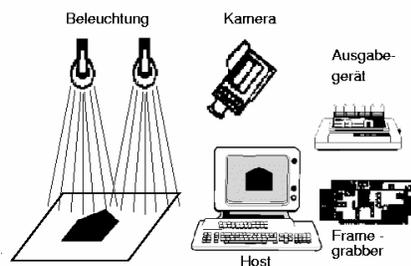
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Ziele der Einheit

- **Machinelles Visuelles System**
 - Analog zur menschlichen Bildverarbeitung ist in der **Maschinellen Bildverarbeitung** ein "visuelles System" nötig, das die aufgenommenen Bilder verarbeitet.
- **Hardware**
 - Neben allgemeinem Aufbau werden wir bestimmte **Komponenten** eines Bildverarbeitungssystems näher behandeln: Optik, Sensortechnik
- **Digitalisierung**
 - Ist der wichtigste Schritt zum Erzeugen von digitalen Bildern, dem Ausgangspunkt der eigentlichen elektronischen Weiterverarbeitung.
 - Quantisierung in Ort und Intensität

Das Bildverarbeitungssystem

- Ein Bildverarbeitungssystem besteht aus
 - Beleuchtungsanlage (Lichtquellen und Beleuchtungsart)
 - **Bildsensorysystem**, Beispiel: digitale Kamera
 - Bildverarbeitungskarte (Analog-Digital-Wandlung)
 - keine Grafikkarte! Interface von Kamera(s) zu Computer
 - Rechner, der die Infrastruktur zur Verfügung stellt
 - Ausgabeperipherie (Monitor, Drucker, Projektor)



3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

3

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

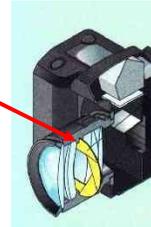
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

4

Kameraobjektive

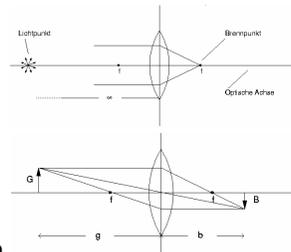
- Ein Kameraobjektiv besteht aus
 - einem **Linsensystem** und
 - einer oder mehreren **Blenden**



- 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 **Schärftiefe** und die **hyperfokale Distanz**

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**
 - Der **Vergrößerungsfaktor m** ist das Verhältnis von **Bildhöhe B** und **Gegenstandshöhe G** . Dies ist gleich dem Verhältnis von Bildweite und Gegenstandsweite
 - Die **Brechkraft D** (Einheit **Dioptrie**) ist der Kehrwert der Brennweite:
- Näherungsweise Gültigkeit bei dicken Linsen und Linsensystemen



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

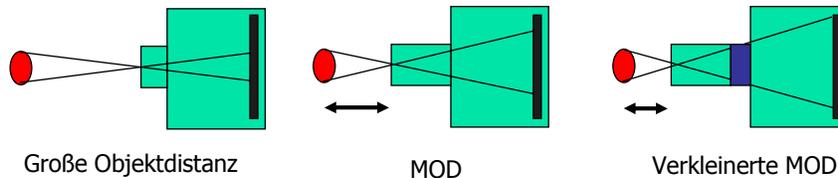
$$m = \frac{B}{G} = \frac{b}{g}$$

$$D = 1/f$$

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



3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

7

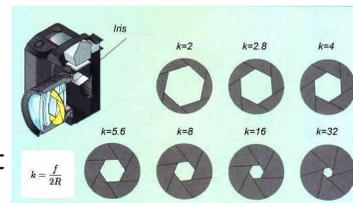
Optische Grundlagen

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.



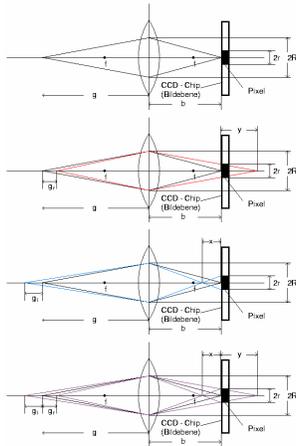
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

8

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.

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

3.3.2008

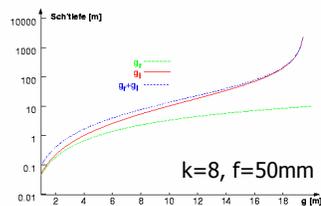
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

9

Optische Grundlagen

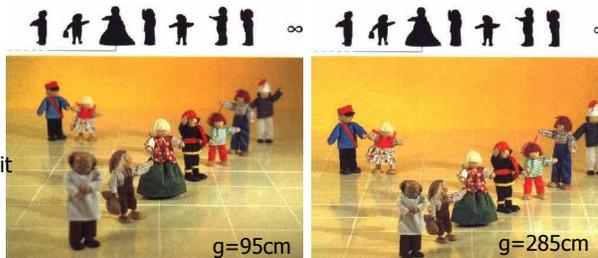
Die hyperfokale Distanz

- 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.



3.3.2008

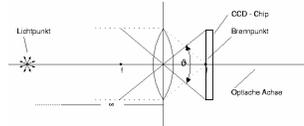
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

10

Optische Grundlagen

- Der **Bildwinkel theta** und der **Bildausschnitt**

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



- Bildausschnitte für verschiedene CCD - Formate (f = 70mm)



Kleinbildformat theta = 34.4° 1" CCD Chip theta = 12.9° 1/2" CCD Chip theta = 6.5° 1/4" CCD Chip theta = 3.3°

3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

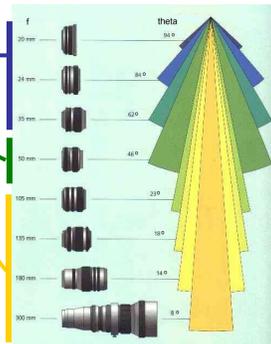
11

Objektivarten

- Weitwinkel-, Normal- und Teleobjektive

- Namensgebung ist historisch bedingt, bezieht sich auf eine Bildgröße von 36x24mm (Kleinbildfilm)
- Einteilung nach Brennweite
 - Weitwinkel:** f kleiner als 50mm
 - Normal:** f ist 50mm
 - Tele:** f größer als 50mm

Format	36x24mm	1"	2/3"	1/2"	1/3"	1/4"
Diagonale [mm]	43.3	15.9	11.0	8.0	6.0	4.0
f=20mm	56°	43°	31°	23°	17°	11°
f=24mm	54°	37°	26°	19°	14°	10°
f=35mm	53°	26°	18°	13°	10°	7°
f=50mm (Normal)	47°	18°	13°	9°	7°	5°
f=105mm	23°	9°	6°	4°	3°	2°
f=135mm	18°	7°	5°	3°	3°	2°
f=180mm	14°	5°	4°	3°	2°	1°
f=300mm	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.

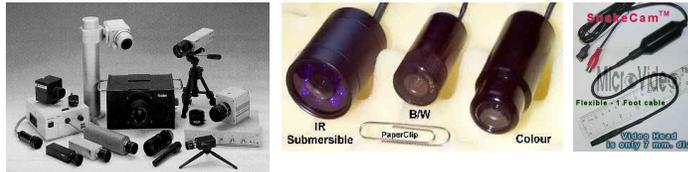
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

12

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
- Integrationszeit, ...



3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

13

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, günstige Preise, die auch im privaten Anwenderbereich erschwinglich sind
- Übliche Fernsehnormen:

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

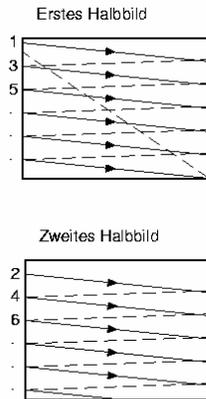
- Basierend auf Röhrenkameras und –Monitoren, bei Digitalgeräten wirkt es sehr seltsam...

3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

14

Videonorm



- 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



Nachteil: Kammeffekt bei schnell bewegten Szenen:

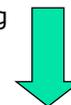
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

15

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



3.3.2008

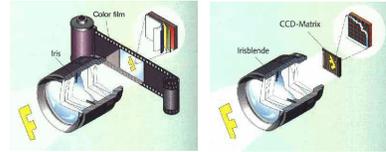
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

16

CCD-Sensor Techniken

- **Filmkamera**

- der fotoempfindliche Film wird zum Objektiv bewegt, belichtet und weitertransportiert.

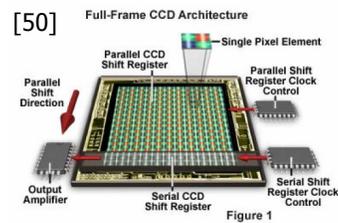


- **CCD-Kamera:**

- An die Stelle des Films tritt der CCD - Sensor

- **Die Funktionsweise:**

- Einfallendes Licht erzeugt auf Halbleitermaterial Ladungsträger (innerer Photoeffekt)
 - Ladung wird wie in einem Kondensator gesammelt (*integriert*)
 - Ladungsmenge ist proportional zum Lichteinfall.
 - Ladung-Spannung-Wandlung am Ausgang des Chips



3.3.2008

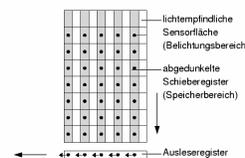
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

17

CCD-Sensor Techniken

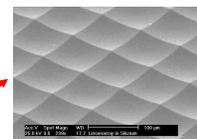
- **Interline-Transfer (IT) Sensor**

- streifenförmig in Belichtungs- und Speicherbereiche unterteilt
- **Der Ladungstransport beim IT-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.



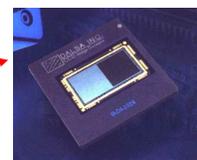
- **Reduzierte Lichtempfindlichkeit**

- 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



- **Weitere CCD-Architekturen:**

- **Frame-Transfer Sensor**
 - Blockweise Belichtung- und Speicherbereich
 - **Full-Frame Transfer Sensor**
 - Komplette Fläche Belichtungsbereich



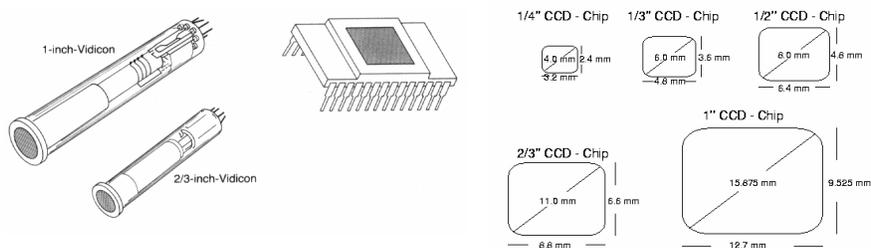
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

18

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.



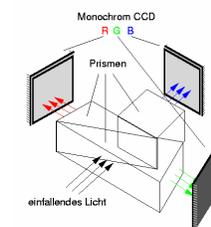
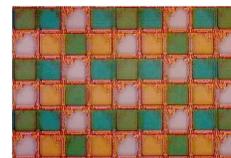
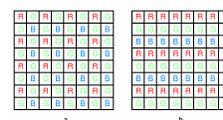
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

19

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



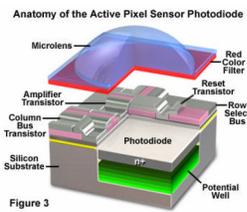
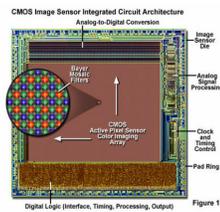
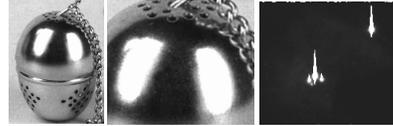
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

20

CMOS-Sensor 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, Steuerelektronik inklusive
 - Pixel: Photoempfindliche Dioden mit Widerstand in Reihe
 - Pixelweise Ladung-Spannung-Wandlung: APS (Active Pixel Sensor)



[50]

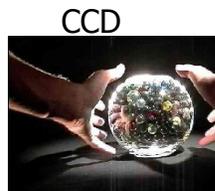
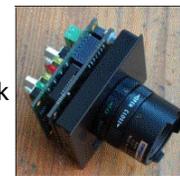
3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

21

CMOS-Sensor Techniken

- **Vorteile** von CMOS-Kameras
 - 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**:



3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

22

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

3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

23

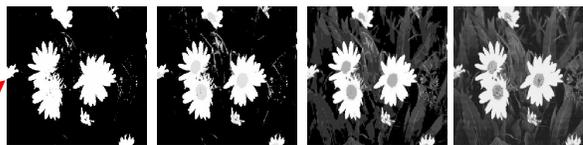
Digitalisierung von Bildern

■ 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

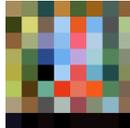
- Der Mensch ist nicht sehr empfindlich für grobe Quantisierung
- Auflösung ist im wesentlichen durch den Speicher begrenzt
- Typische Auflösungen sind 24 Bit (8 Bit pro Farbe) pro Pixel

3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

24

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 ² Pixel
49152 Byte | 256 ² Pixel
196608 Byte | 512 ² 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 (Pixel/Länge)

3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

25

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
 - Ziel ist, **relevante Information** zu erhalten, aber **Speicher-Verschwendung** zu vermeiden



3.3.2008

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2008, Einheit 3

26

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
- [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://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5b/Leuchtstofflampen-ctaube050409.jpg/800px-Leuchtstofflampen-ctaube050409.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
- [48] Optronics GmbH, <http://www.optronics.com/>
- [49] Prof. Dr. M. Wülker, FH-Offenburg, <http://mv-sirius.m.fh-offenburg.de/wuelker/mwuelker.htm>
- [50] <http://www2.informatik.hu-berlin.de/~goehring/papers/ccd-vs-cmos.pdf>