

Digitale Bildverarbeitung

Einheit 2

Visuelle Wahrnehmung des Menschen

Lehrauftrag WS 2007/2008

Fachbereich M+I der FH-Offenburg



Dr. Bernard Haasdonk

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Ziele der Einheit

- Das **Menschliche Auge** als Beispiel für ein Kamerasystem
 - Anatomie und Physiologie des Auges
- Der **Mensch** als Beispiel für ein **BV-System**
- **Visuelle Phänomene**
 - erlauben einen Einblick in den Prozess der Menschlichen BV
- Die **enorme Leistungsfähigkeit** des menschlichen Sehsystems
 - verdeutlicht die Schwierigkeit und die Anforderungen an maschineller BV
 - gibt aber auch Anregungen für neue Entwicklungen

Beispiele zur Bildwahrnehmung



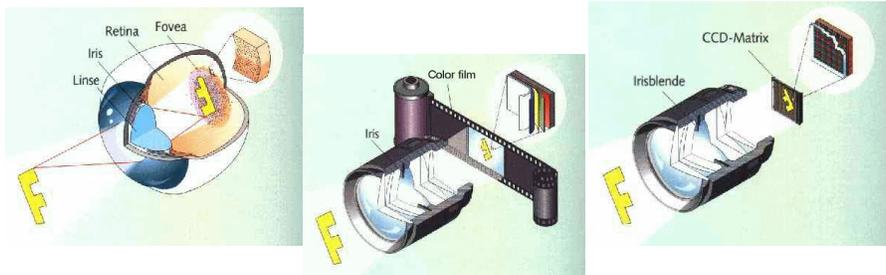
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

3

Das Auge als Kamera

- Das **Linsen-Auge** und **moderne Bildaufnahmetechniken** haben erstaunliche Parallelen:



- Gründe für „gemeinsames, funktionell ähnliches Ergebnis“:
 - **Verständnis** und Anwendung der **geometrischen Optik** erlaubt Konstruktion effektiver Abbildungssysteme
 - Das menschliche Auge hat sich durch die **Evolution** ideal an die optischen Gesetze der physikalischen Welt angepasst
 - Menschliche Konstruktionen beruhen oft auf „**Nachahmen**“ der Natur

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

4

Das Auge als Kamera

■ J. Kepler: Erster Vergleich des Auges mit Kamera

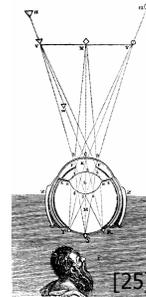


- „*Paralipomena in Vitellionem*“ 1604:
- Feststellung, dass das **Bild kopfüber** steht
- Vergleich des Auges mit der *Camera obscura*, (Lochkamera ohne Linsensystem)
- Auge ist komplizierter: **Pupille ist viel zu groß** für scharfe Abbildung. Daher resultiert Abbildung auf der Retina durch Zusammenwirken von Hornhaut, Kammerwasser, Linse und den Glaskörper.

■ R. Descartes: geometrische Optik und Experimente



- „*La Dioptrique*“ 1637
- In einem seiner Experimente schabte Descartes die der Linse gegenüberliegende Fläche eines Ochsenauges an, so dass diese durchsichtig wurde und sah auf der Retina das **umgekehrte verkleinerte Bild** seines Objekts.



1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

5

Das Physiologische Auge

■ Hornhaut:

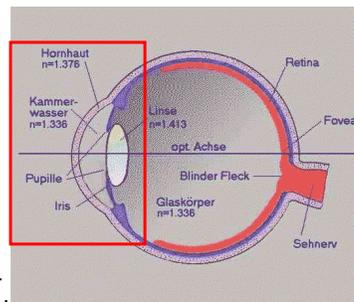
- Grenzfläche zwischen Luft und Hornhaut hat **größten Beitrag zur Gesamtbrechkraft**:
 $n_{\text{Luft}} / n_{\text{Hornhaut}} = 1.00 / 1.376$.
- Bewirkt die Abbildung eines anvisierten Objektes auf die Netzhaut

■ Pupille:

- Öffnung der vor der Linse liegenden **Regenbogenhaut (Iris)**
- Entspricht der *Aperturblende* bei der Kamera.
- Stellt sich auf ca. **2 mm bis 8 mm** Durchmesser ein, d.h. 16-fache Veränderung der Lichtmenge!

■ Linse:

- Einzelne Schichten, deren Brechzahl von außen nach innen hin zunimmt.
- Hat **nur einen Korrektoreinfluss** auf die Abbildung, da sie in Medien mit wenig abweichender Brechzahl eingebettet ist
- Anpassung an die jeweilige Objektentfernung durch **Akkommodation**: Kontraktion des Akkomodationsmuskels => stärkere Krümmung der Linse => kürzere Brennweite
- Einstellbare **Brennweite** zwischen 70 mm und 40 mm



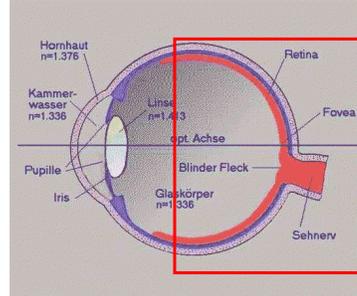
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

6

Das Physiologische Auge

- **Netzhaut, Retina:**
 - bekommt ein **umgekehrtes, reelles Bild**
 - **Rezeptorfläche** mit zwei Empfängerarten:
 - ca. 75-150 Millionen **Stäbchen** (*Helligkeit*),
 - ca. 6-7 Millionen **Zapfen** (*Farben*).
 - Empfängerarten sind ungleichmäßig verteilt: Mit zunehmendem Abstand von der optischen Achse nimmt die Zapfendichte ab und die Stäbchendichte zunächst zu.
- **Fovea, gelber Fleck, Netzhautgrube:**
 - Kleiner zentraler Bereich, 1° - 4° Raumwinkel
 - Hohe Konzentration von Zapfen (ca. 150.000 pro mm^2), wenige Stäbchen
 - Hohe Sehschärfe (d.h. Auflösungsvermögen von ca. 1 Bogenminute).
- **Sehnerv:**
 - Die Zapfen und Stäbchen sind mit Nervenfasern verbunden, die zum *Sehnerv* zusammengefasst sind. Er leitet die Reizempfindung an das Gehirn weiter.
 - Die Eintrittsstelle des Sehnervs in den Augapfel ist nicht lichtempfindlich und heißt deshalb *blinder Fleck*.

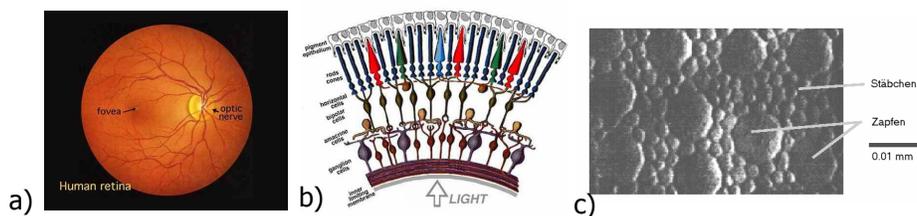


1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

7

Das Physiologische Auge



- a) Die Sauerstoffversorgung
 - geschieht über Adern, die beim Sehnerv in das Auge eintreten
 - Ebenfalls gut zu sehen ist die relativ kleine Fovea
- b) Die Zapfen und Stäbchen
 - Es gibt drei Arten von Zapfen für die Lichtkomponenten **Rot, Grün, Blau**
 - Kein direkter Kontakt zum Glaskörper, sondern davor liegen noch einige Zellschichten, die das Licht, durchdringen muss.
- c) Elektronenmikroskopisches Bild
 - durch eine mittlere Ebene der Zellschicht mit Zäpfchen und Stäbchen.
 - Stäbchen liegen dicht gepackt, Dichte der Zapfen ist weitaus geringer.

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

8

Das Physiologische Auge

- Stäbchen und Zapfen im menschlichen Auge
 - Reagieren auf Licht mit **Spannungs- und Stromänderungen**, Schwankungen bis zu 25 mV bzw. 30pA pro Sinneszelle
 - Elektrochemische Abläufe: Membranen, Änderung der Durchlässigkeit für **Kalium- und Natrium-Ionen**
- Sakkaden
 - Kleine **Zitterbewegungen** des Auges von etwa 1/20s Dauer
 - Verhindern eine Ermüdung der Sinneszellen

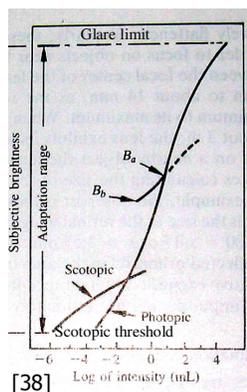
Stäbchen	Zapfen
Kein Farbsehen	Farbsehen
Große Helligkeitsempfindlichkeit	Geringe Helligkeitsempfindlichkeit
Wichtig beim Nachtsehen	Wichtig beim Tagessehen
75-150 Millionen	6-7 Millionen
2µm Durchmesser	4µm Durchmesser
Höchste Dichte bei 25°	Höchste Dichte bei 0°
Großes Gesichtsfeld mit geringer Sehschärfe	Kleines Gesichtsfeld mit hoher Sehschärfe
Ansprechzeit 300ms	Ansprechzeit 80-90ms

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

9

Helligkeits-Wahrnehmung



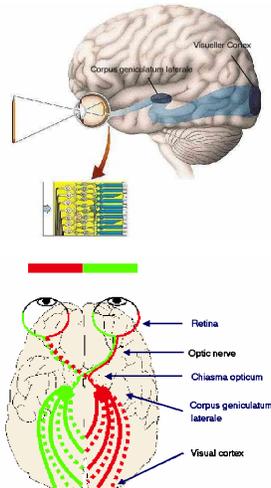
- Hoher Intensitätsbereich wird vom Auge erfasst
 - 10 Größenordnungen: 0.000001 bis 10000 mL
 - Bei niedrigen Intensitäten: Stäbchen-Sehen (scotopic)
 - Bei höheren Intensitäten: Zapfen-Sehen (photopic)
 - Nicht simultan, sondern ausschnittsweise durch Helligkeitsadaptation:
- Helligkeitsadaptation durch zwei Mechanismen
 - 1. Änderung des Pupillendurchmessers und
 - 2. Änderung der Empfindlichkeit der Sehzellen.
 - z.B. Adaption auf Punkt „Ba“ ermöglicht Helligkeitsempfinden bis Punkt „Bb“, darunter ist alles schwarz
- Subjektiv wahrgenommene Intensität
 - In etwa logarithmische Kurve der physikalischen Intensität

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

10

Menschliche Bildverarbeitung



- Der Signalweg bis zur Wahrnehmung
 - Die **Stäbchen und Zäpfchen** produzieren Signale
 - Weiterleitung durch den **Sehnerv**
 - Am Kreuzungspunkt **Chiasma opticum** kommen die Informationen beider Augen zusammen
 - Ende des Sehnervs in der Relaisstation **Corpus geniculatum laterale**
 - **Weiterverteilung** an z.B. Augenmuskulatur und den **Occipitallappen des visuellen Cortex**
 - Von dort Ausbreitung zu Bereichen der **Hirnrinde**, wo Dinge wie Form, Farbe und Bewegung verarbeitet werden
- Die Bahnen der Sehnerven von oben.
 - Wie bei den meisten unserer Organe gibt es einen **Spiegelungseffekt**: Der rechte Halbraum wird von der Linken Gehirnhälfte verarbeitet, der linke Halbraum von der Rechten.

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

11

Menschliche Bildverarbeitung

- Das Auge ist also ähnlich zur Kamera, aber wie ist die weitere **Verarbeitung und Speicherung**?
 - Weiterleitung und Speicherung wie in einem Fotoalbum in voller Auflösung?
- Unbewusste **Vorverarbeitung**
 - **Informationsfülle** eines Echtzeitbildstroms ist **zu hoch** für vollständige Informationsübertragung und Speicherung im Gehirn.
 - Daher führt bereits das **Auge** eine **Reduktion** und Vorverarbeitung der Signale aus, so dass nur noch ein Bruchteil zur tatsächlichen Verarbeitung ins Gehirn weitergeleitet wird
 - Z.B. **Informationsreduktion durch Sakkaden**: Das Auge reduziert Information in homogenen Flächen
 - Nicht nur Informationsreduktion, sondern auch **Ergänzungen von Informationen im blinden Fleck**
- Probleme durch die Vorverarbeitung/Informationsreduktion:
 - Informationen im blinden Fleck sind **nicht real**
 - Z.B. Unterschiedliche oder widersprüchliche **Zeugenaussagen**
 - Wenn es darauf ankommt, Details über längere Zeit **fotografisch genau** festzuhalten, ist das menschliche Sehsystem **ungeeignet**.

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

12

Menschliche Bildverarbeitung

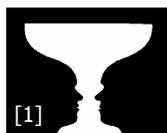
- Weiterer Prozess des „Sehens“ nicht präzise geklärt:
 - noch immer Gegenstand der Gehirnforschung/Wahrnehmungspsychologie.
- Speicherung von Seherfahrungen in Modellen:
 - Aus Seherfahrungen und Gelerntem bilden wir durch Verknüpfungen im Gehirn „Modelle“ von Szenen und Objekten
- Modellbasiertes Sehen:
 - Aus dem Retinabild werden in Zukunft bevorzugt nur die Informationen weiterverarbeitet, die auf abgespeicherte Modelle passen
 - Durch diese Modellbildung ist der Mensch in der Lage, in Bruchteilen von Sekunden eine wahre Informationsflut aufzunehmen und zu verarbeiten.
- Optische Täuschungen und optische Phänomene
 - erlauben Einblicke in die Prozesse der menschlichen Bildverarbeitung

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

13

Bistabile Bilder



[1]

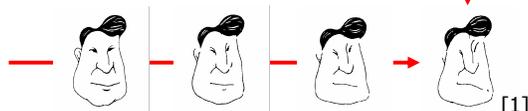


[1]



[1]

- Bistabile Bilder:
 - Bilder können wahlweise eines von **zwei** Objekten **stabil** darstellen, man „sieht“ jedoch nicht beide simultan
 - Das gesehene Objekt kann durch eine Zeitsequenz von **vorhergehenden** Bildern **beeinflusst** werden
- Mögliche Erklärung:
 - Unser Gehirn hat **Modelle für Objekte** gespeichert, auf welche Seheindrücke abgebildet werden.
 - Das visuelle System nimmt bevorzugt „**Stetigkeit**“ zwischen registrierten Objekten in Sequenzen an.



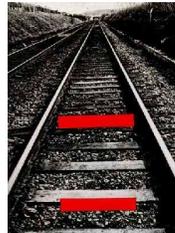
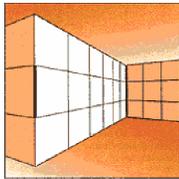
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

14

Längentäuschungen

- Die *Railway lines* Illusion:
 - Welcher der beiden waagerechten Balken erscheint länger?
 - Tatsächlich sind die Balken **gleich lang**, es handelt sich also um eine Längentäuschung
- Mögliche Erklärung:
 - Unser Gehirn versucht, das Gesehene in den **3D-Raum einzubetten**.
 - Schräg nach oben führende Linien werden als in die Tiefe gehend interpretiert.
 - Damit liegt der obere Balken weiter hinten, wird also als länger empfunden.
- Dreidimensionales Äquivalent:



[9]

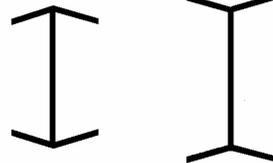
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

15

Längentäuschungen

- Die *Müller-Lyer* Illusion:
 - Welcher der beiden senkrechten Balken erscheint länger?
 - Tatsächlich sind beide wieder **gleichlang**, es liegt also eine Längentäuschung vor
- Mögliche Erklärung:
 - Wieder kann eine **3D-Einbettung** Grund für das Phänomen sein
 - Der rechte Balken scheint eine hinten liegende Kante eines Zimmers- o.ä. zu sein. Dieser muss daher bei gleicher optischer Ausdehnung länger sein als der andere Balken.
- Das dreidimensionale Äquivalent:



[9]

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

16

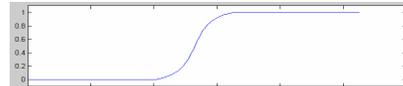
Intensitätstäuschungen

- Überschwing-Phänomene bei Kontrastübergängen:

- **Treppeneffekt:**
kein Grauwertverlauf innerhalb der Stufen!



- **Mach-Band-Effekt:**
Dunkler und heller Streifen!



- Umgebungsabhängige Intensität
- Quadrate mit **identischem Grauton!**



- Erklärung:

- Wahrgenommene Intensitäten sind **nicht** einfach eine Funktion der physikalischen Intensität
- **Lokaler Kontrast** spielt eine wesentliche Rolle.

1.10.2007

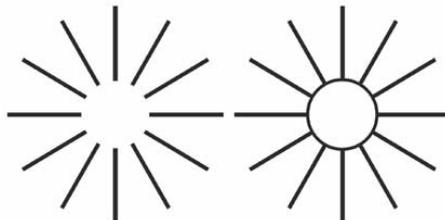
B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

17

Intensitätstäuschungen

- Die **Ehrenstein-Illusion**

- **Anomale Helligkeitsinduktion:**



- **Szintillierender Glanz:**



- Teil-Erklärung:

- Endgestoppte Neuronen
- Konkurrenz verschiedener Signale

- Details:

www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,497212-3,00.html

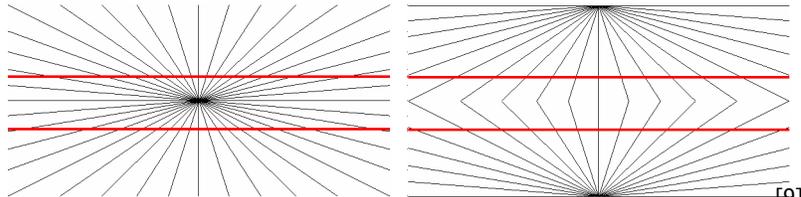
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

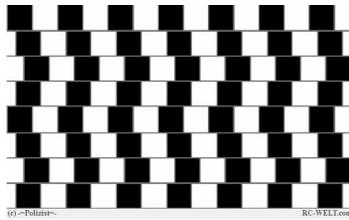
18

Vortäuschung von Krümmung

- Die *Hering lines* Illusion:
 - Sind die beiden roten horizontalen Linien **waagrecht**?



- Ähnliche Täuschung:



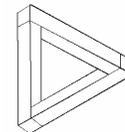
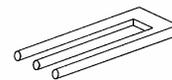
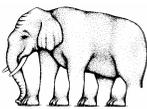
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

19

3D Paradoxa

- Phänomen:
 - Bei machen Bildern gibt es **keine konsistente räumliche Interpretation**, diese wird ständig modifiziert, ist **instabil**
- Erklärung:
 - Unser visuelles System versucht, dreidimensionale Objekte zu sehen, auch wenn ganz klar ist, dass ein solches Objekt nicht möglich ist.
- Beispiel: „Waterfall“ von M. C. Escher (1898 - 1972) und weitere



[17]



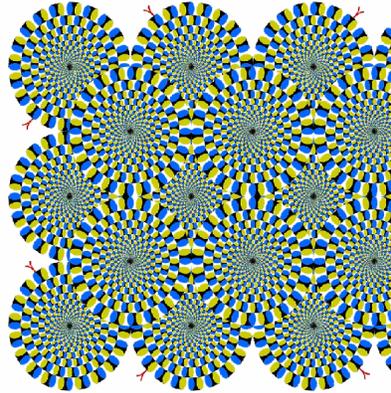
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

20

Vortäuschen von Bewegung

- Phänomen:
 - Drehen sich die Zahnräder wirklich?



- Weitere Beispiele: Siehe <http://www.michaelbach.de/ot/> oder WBT von Prof. A. Erhardt.

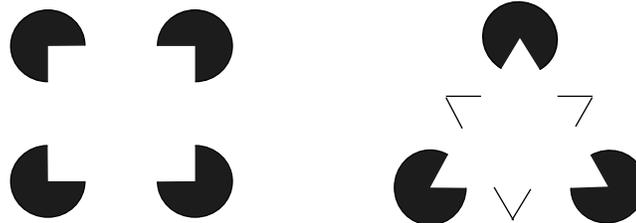
1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

21

Fähigkeit: Kontur-Interpolation

- Kreissegmente oder Quadrat und Dreieck?



- Das Gehirn ist bestrebt, möglichst **einfache Erklärungen** für gegebene Situationen zu finden
- **Einfache Figuren** werden bevorzugt erkannt: gerade Linien, Dreiecke, Quadrate, Kreise
- Eher wird eine „3D“-Interpretation aus sich verdeckenden einfachen Objekten als eine komplizierte 2D-Beschreibung gesehen.
- **Kontur-Interpolation** ist eine starke Fähigkeit des menschlichen Sehens

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

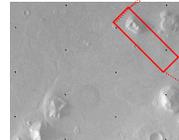
22

Fähigkeit: Gesichtserkennung

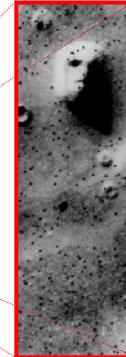
- Sensibilität für Gesichter ist Eigenheit des menschlichen visuellen Systems
- Gesichtserkennung, Personenerkennung, Mimikerkennung auch bei stark verzerrten Bildern ist möglich
- Erstaunliche Fähigkeit: Hängt von sehr diffizilen Details ab
- Erklärung in sozialer Evolutionsgeschichte: Gruppenmitglieder unterscheiden, Mimik deuten sind überlebenswichtig.
- Pareidolia: „Mann im Mond“-Phänomen: Manchmal übertreibt es unsere „Gesichtserkennung“



Krabbe oder Mensch?



Viking I: Mars-Gesicht



1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

23

Verhältnis Menschliches Sehen / maschinelle Bildverarbeitung

- Menschliches Sehen ist ein „Existenzbeweis“ für algorithmische Bearbeitungsmöglichkeiten
- Der Mensch ist schwach in präzisen Messfragen: Grauwert, Längen, Flächenschätzung.
- Der Mensch ist stark in Objekterkennung, Zweck-Erkennung, 3D-Rekonstruktion, etc. auch bei fehlenden Teilen, „Interpolation von Objektgrenzen“, Gesichtserkennung
- Maschinelles Sehen: nicht so weit entwickelt, aber in einfachen fest definierten Aufgaben sehr erfolgreich, insbesondere bei objektiven Messaufgaben.
- Nachahmen von physiologischen Erkenntnissen für neue Bildverarbeitungsansätze ist fruchtbar: Bildpyramiden, lokale Orientierung, Bewegungsschätzung durch Filterung

1.10.2007

B. Haasdonk, Digitale Bildverarbeitung, FH Offenburg SS 2007, Einheit 2

24

Zusammenfassung

- Das **Auge kann als Kamera** interpretiert werden, die menschliche Bildwahrnehmung als Bildverarbeitungssystem
- Das visuelle System des Menschen legt Information über abstrakte **Modelle** ab, die menschliche Bildverarbeitung ist unbewusst, auf Modelle zurückgreifend
- Das Sehsystem setzt **zweidimensionale Bilder** auf der Retina in **dreidimensionale Information** um
- Es ist programmiert, **Gesichter und Mimik** zu lesen
- **Optische Täuschungen** eröffnen Einblicke in das Wesen visueller Prozesse. Viele optische Täuschungen belegen, daß unsere Modelle im dreidimensionalen Raum eingebettet sind.
- Längen- Flächen- und Helligkeits-Täuschungen belegen einige **Schwächen des menschlichen Sehens**
- Tieferes Verständnis für biologische Sehprozesse motiviert neue Bildverarbeitungsansätze, **Nachahmen der Natur** ist hier fruchtbar

Weiterführende Literatur

- Deutsche Bücher
 - H. A. Mallot, **Sehen und die Verarbeitung visueller Information. Eine Einführung**, Vieweg-Verlag, 2000
 - F. Crick, **Was die Seele wirklich ist. Die naturwissenschaftliche Erforschung des Bewußtseins**, Rowohlt, 1997
 - A. Zajonc, **Die gemeinsame Geschichte von Licht und Bewußtsein**, Rowohlt, 1997
 - S. Pinker, **Wie das Denken im Kopf entsteht**, Kindler Verlag GmbH, 2002
- Englische Bücher
 - F. Crick, **Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul** Scribner Book Company, 1995
 - A. Zajonc, **Catching the Light : The Entwined History of Light and Mind** Oxford University Press, 1995
 - S. Pinker, **How the Mind Works**, W. W. Norton & Company, 1999

(Bild-)Referenzen

Die Bilder wurden entweder selbst erstellt, Referenzen wurden bereits angegeben, stammen aus dem WBT/Skript von Frau Erhardt oder aus folgenden Quellen (identische Numerierung wie in Skript):

- [1] F. Attneave. „Multistability in Perception“. In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 90-99, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [9] R.L. Gregory. „Visual Illusions“: In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 48-58, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [10] L.D. Harmon. „The Recognition of Faces“, In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 101-112, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [17] J.L. Locher, „The Work of M.C. Escher“, Harry N. Abrahamn, Inc., New York, 1974.
- [25] U. Neisser, „The Process of Vision“, In Image, Object and Illusion, Readings from Scientific American, pp. 4-11, W.H. Freeman and Company, 1974.
- [38] R.C. Gonzalez, W.E. Woods, „Digital Image Processing“, Addison-Wesley Publishing Company, 1992.