

# Informatik im Kontext (IKON-1)

## 3. Vorlesung

### Neurone und neuronale Systeme

- Neurone und neuronale Systeme
  - Aufbau und Funktionsweise von neuronalen Systemen (im Grossen)
  - Informationsfluss in neuronalen Systemen
  - Brain-Computer Interfaces (Ein Exkurs)
  - Aufbau und Funktionsweise von Neuronen und neuronalen Systemen (im Kleinen)
    - Natürliche und künstliche Neurone

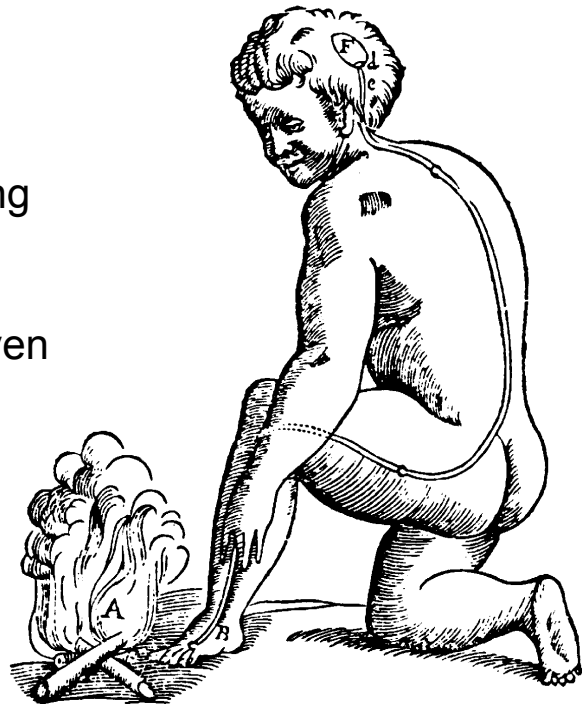
### Nervensystem & Gehirn

- Nervensystem:
  - CNS (central nervous system)
    - Gehirn
    - Rückenmark
  - PNS (peripheral nervous system)
- Das menschliche Gehirn
  - Masse (Gewicht) / Volumen:  $\approx 1500$  gr. /  $\approx 1,7$  l
  - Anzahl der Neuronen:  $10^{12} - 10^{13}$
  - Energieverbrauch (bei physischer Ruhe): 20 % der Sauerstoffzufuhr
- Nervensystem des Rückenmarks
  - Axonlänge bis zu 1000 mm

## Descartes 1664

### Reflexbewegung

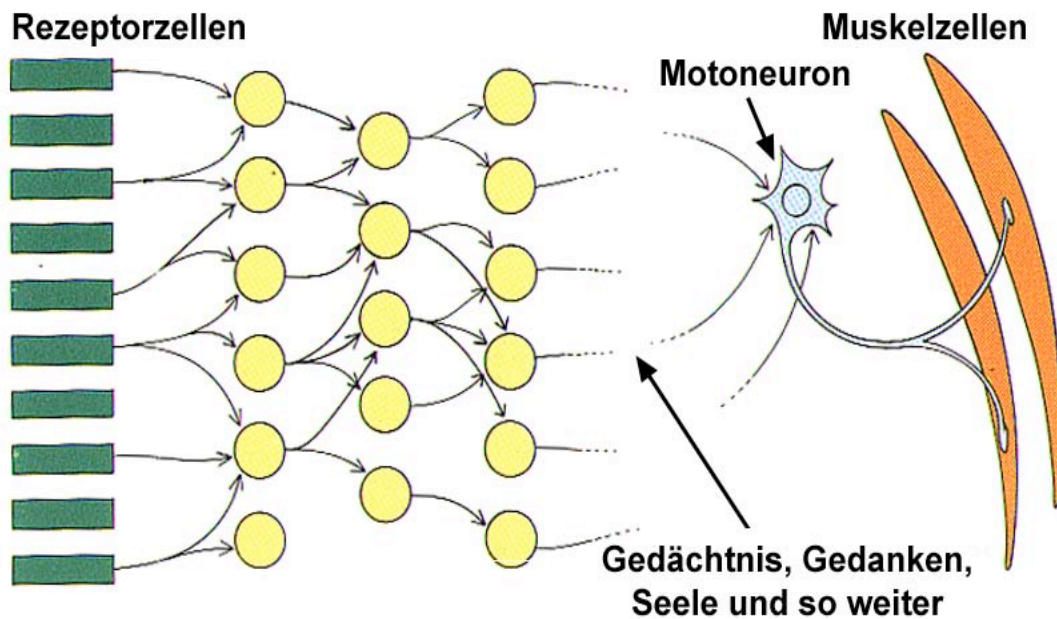
- sensorische Wahrnehmung
- Weiterleitung zum Gehirn
- **Verarbeitung im Gehirn**
- Rückleitung über die Nerven
- Bewegung der Muskeln



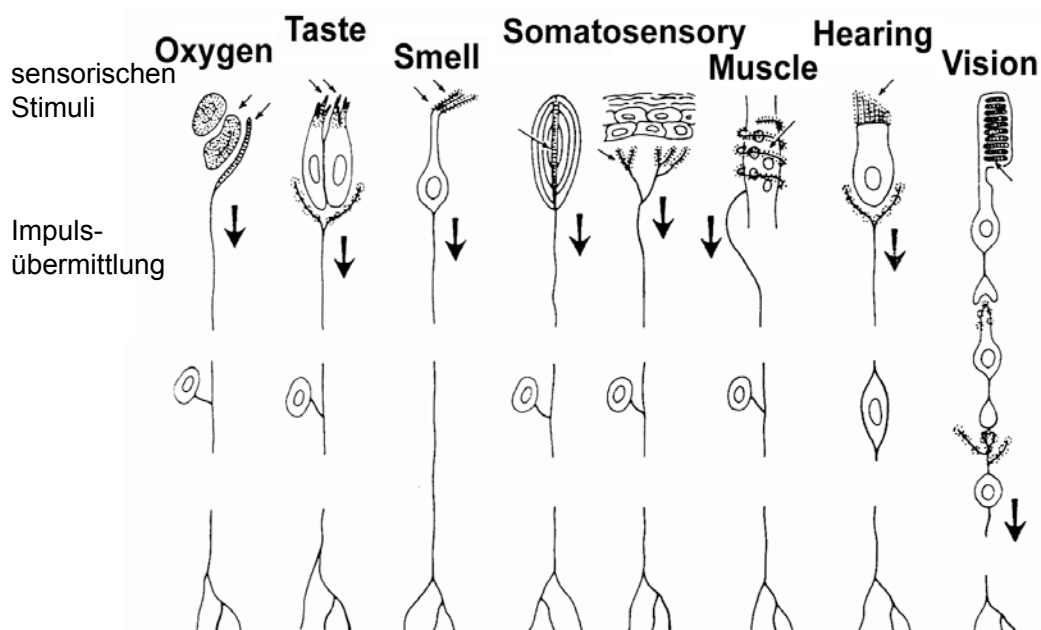
## Neurone: Typen & Aufgaben

- **Sensor-Neurone**  
setzen physikalische Signale (Licht, mechanische Deformation, etc.) oder chemische Signale in elektrische Signale um.
  - **Afferente Neurone** (afferre – herbeitragen)
- **Motor-Neurone**  
enden in den Muskeln, wo sie Kontraktionen auslösen
  - **Efferente Neurone** (efferre – wegtragen)
- **Interneurone**  
„vermitteln zwischen Neuronen“.
- Spezialisierung von Neuronen (Arbeitsteilung) ist bei niederen Lebewesen wenig(er) ausgeprägt.

# Neurone: Von der Wahrnehmung zur Bewegung



## Sensor-Neurone Spezialisierung der Rezeptorzellen

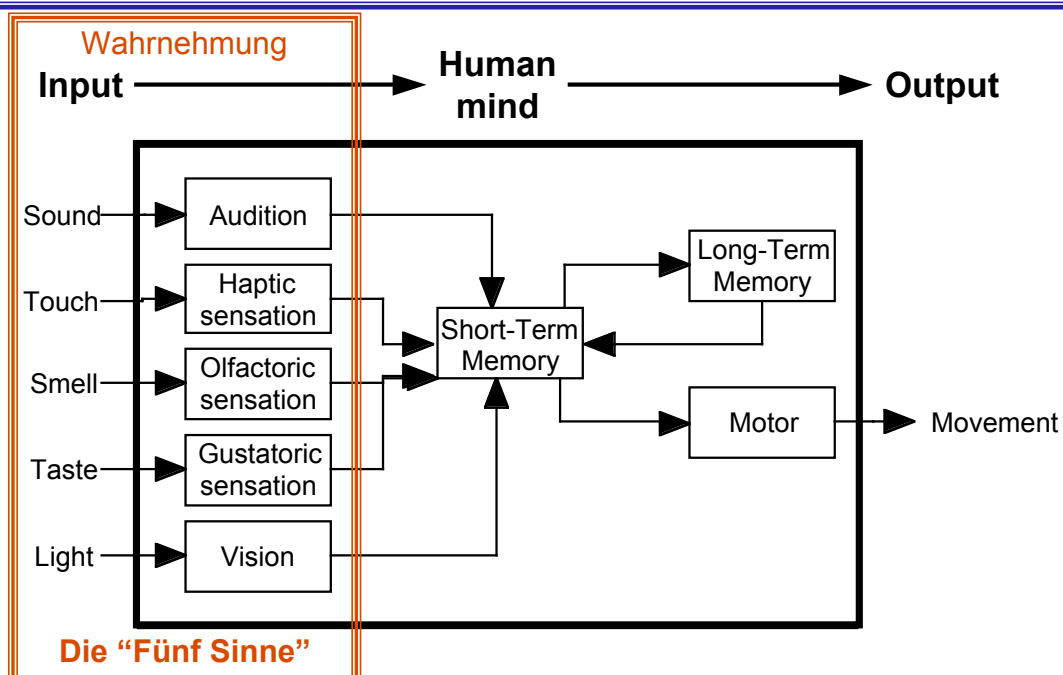


## Neurone: Funktionsweise

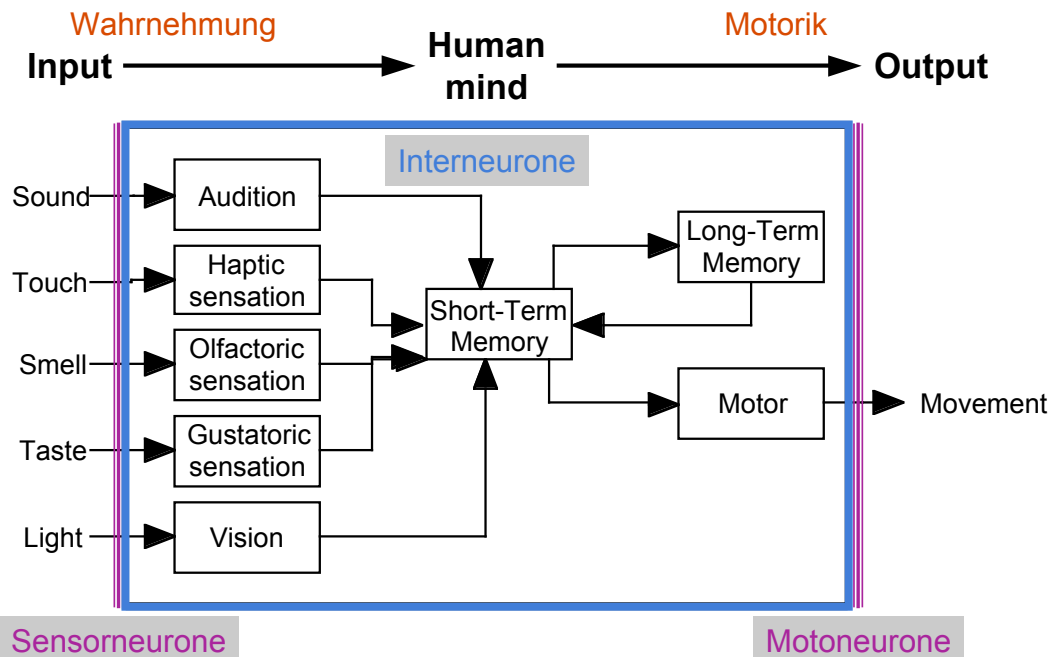
Die funktionelle Aufgabe von *Interneuronen*:

- *Integration* von Eingabe-Aktivität (Eingabe-Information)
- *Weiterleitung* der integrierten Eingabe-Aktivität (= Ausgabe-Aktivität / Ausgabe-Information) an andere Neurone.
  - Sensorneurone erhalten ihre Eingabeaktivität nicht von anderen Neuronen.
  - Motoneuronen leiten ihre Ausgabeaktivität nicht an andere Neurone weiter.
  - *Integration* und *Weiterleitung* basieren auf biochemischen Prozessen.

## Wahrnehmung: Die Schnittstelle zur menschlichen Kognition

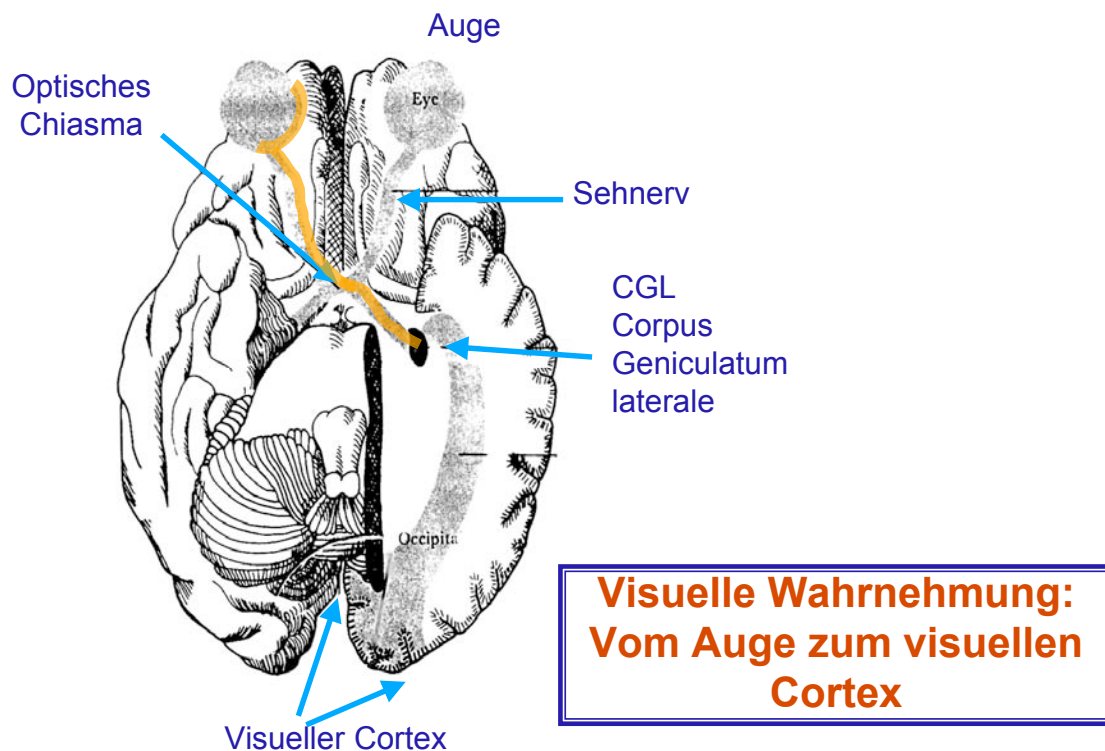
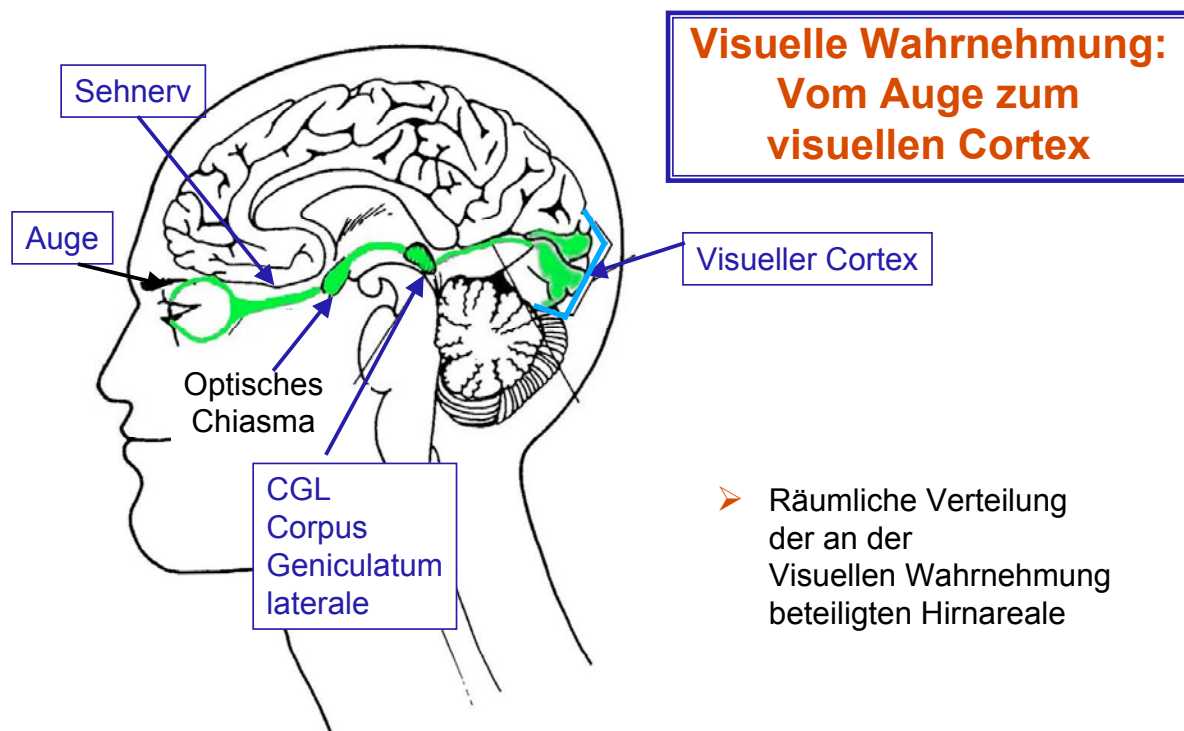


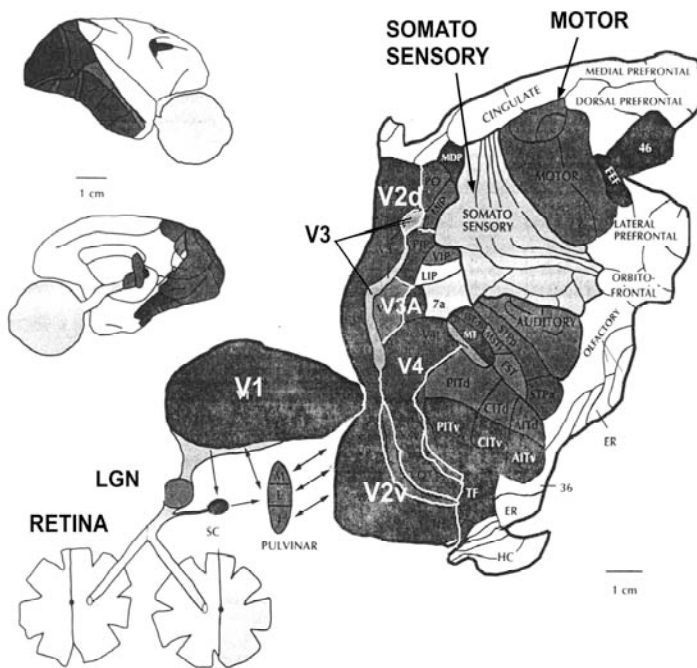
## Zur Arbeitsteilung der Neurone



## Informationsfluss in neuronalen Systemen: Gehirnareale und ihre Funktionalität

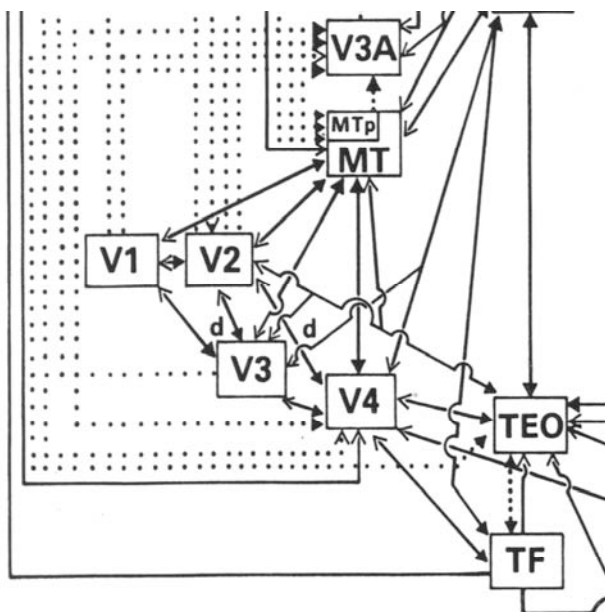
- „Spezialisierung von Regionen“
  - ≈ gewisse Gehirnareale sind an der Erbringung gewisser kognitiver Leistungen massgeblich beteiligt.
  - ist bei allen Tieren zu finden (bei höheren in stärkerem Masse)
  - ist ein „large grain feature“ von Regionen, d.h.
    - Basiert auf statistischen Verteilungen von Zellverhaltens-eigenschaften
    - Nicht alle Zellen einer „spezialisierten Region“ bearbeiten die entsprechende Aufgabe
  - Die Grenzen zwischen Regionen sind unscharf. Insbesondere existieren – in gewissem Umfang – individuelle Unterschiede.
  - Trotz Ausbildung von Spezialisierung liegt – in gewissem Umfang – eine *Plastizität des Gehirns* vor.





## Visuelle Areale im Gehirn des Makaken

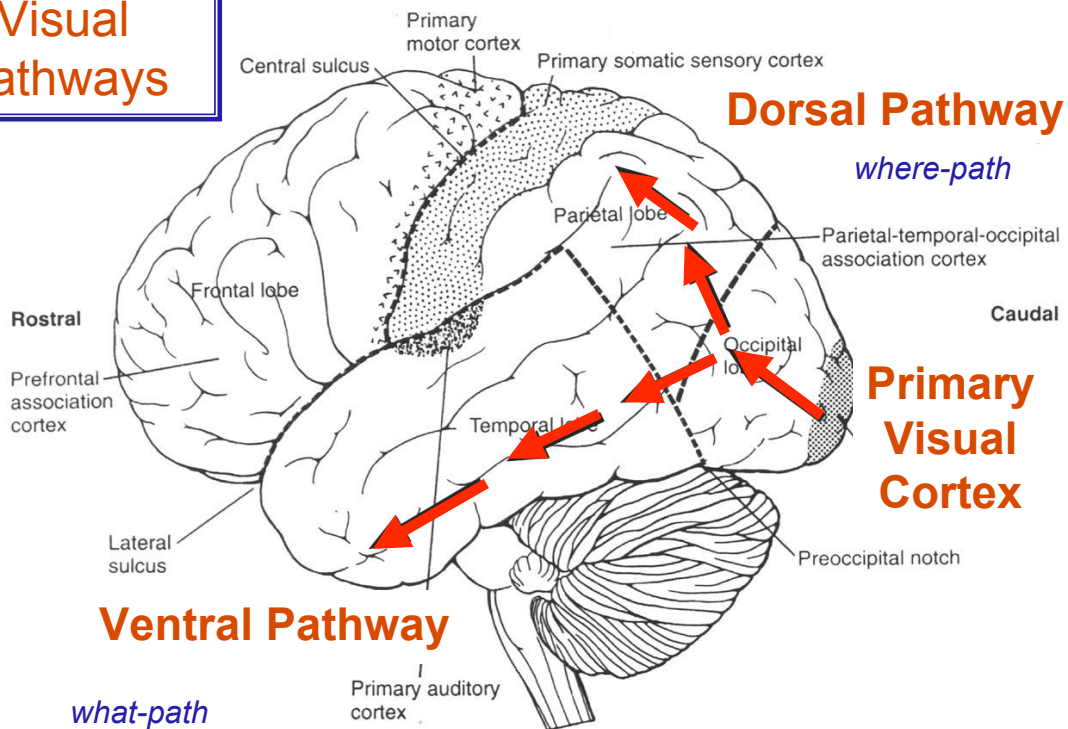
## Verbindungen zwischen den Arealen des visuellen Cortex



- Modellierung empirischer Befunde über die Aktivationsausbreitung (Informationsfluss) im Gehirn von Makaken
- Ähnliche Grundstruktur beim Menschen
- neuroinformatische Verschaltungsanalyse



## Visual Pathways



## Informatik im Kontext (IKON-1)

### 3. Vorlesung

## Neurone und neuronale Systeme

- Neurone und neuronale Systeme
  - Aufbau und Funktionsweise von neuronalen Systemen
  - Informationsfluss in neuronalen Systemen
  - Brain-Computer Interfaces (Ein Exkurs)
  - ➔ Basisidee: Lokalisierung neuronaler Aktivität wird über das Interface interpretiert
  - Aufbau und Funktionsweise von Neuronen und neuronalen Systemen (im Kleinen)
    - Natürliche und künstliche Neurone



# Brain-Computer Interfaces

- Die Zielsetzung: direkte Verbindung von Mensch und Computer, z.B.
  - zur Unterstützung von schwerstbehinderten Personen
  - zur Unterstützung von Personen, deren Motorik oder Kommunikation anderweitig ausgelastet ist
- nicht- invasive Schnittstellen, z.B.
  - Elektroenzephalographie (EEG) misst die summierte elektrischen Aktivität des Gehirns durch Aufzeichnung der Spannungsschwankungen an der Kopfoberfläche.



Abb aus: Krepki et al, 2007

## EEG

Anordnung der Elektroden auf eine EEG-Kappe

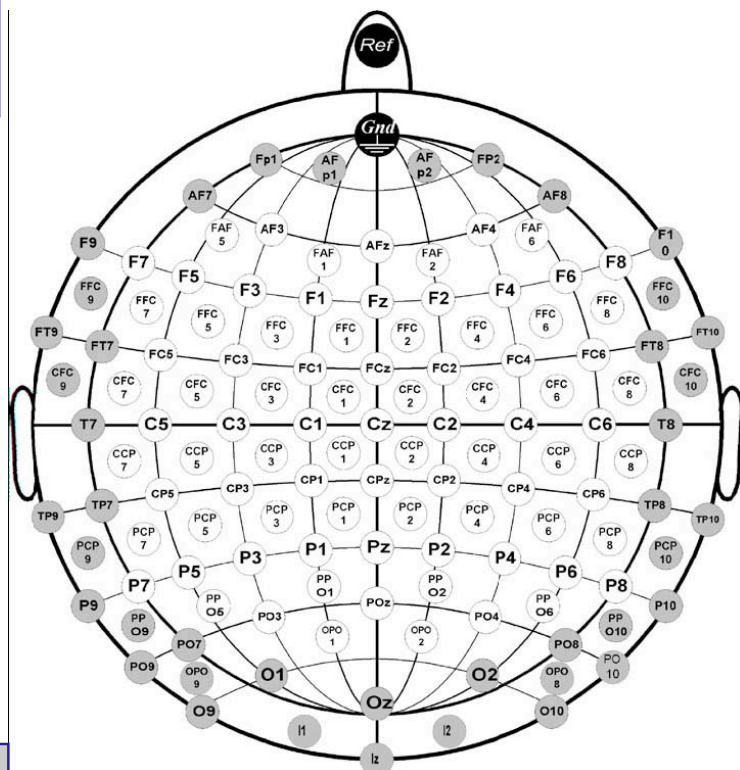


Abb aus: Krepki et al, 2007

# BCI

## Verteiltes Design des BBCI

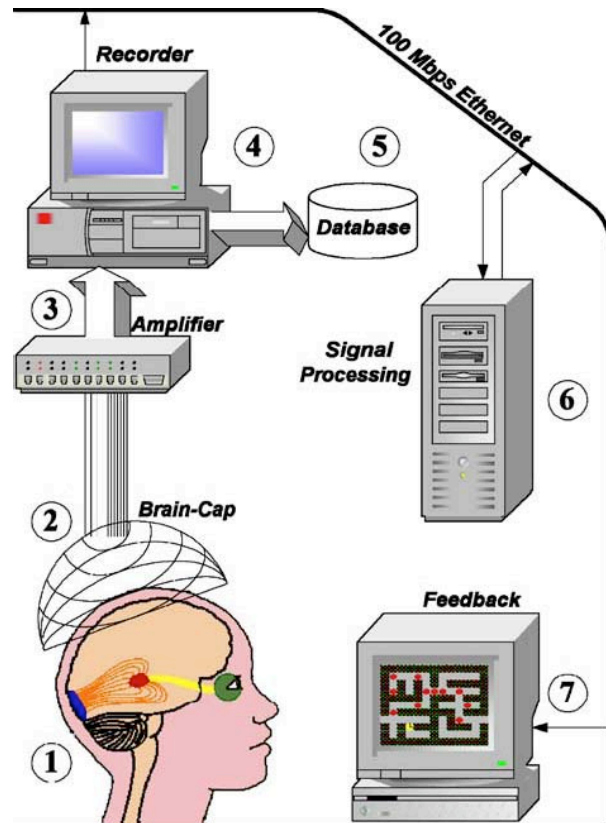
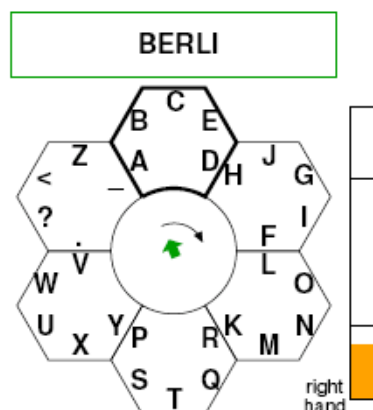


Abb aus: Krepki et al, 2007

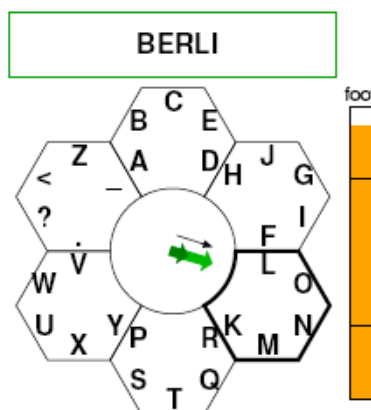
## BBCI – Hex-o-spell

- Buchstabieren durch Imagination von Bewegungen
  - der rechten Hand (drehen des Pfeils) und
  - des rechten Fusses (vergrössern der Pfeils = auswählen)

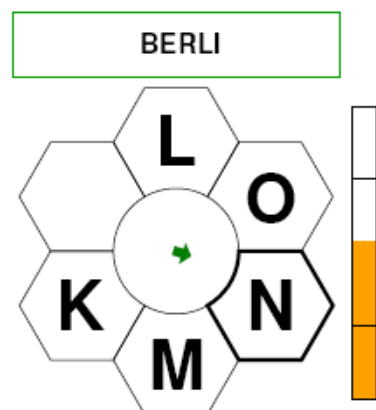
right hand imagery: turn arrow



foot imagery: extend arrow



level two of selection



# Informatik im Kontext (IKON-1)

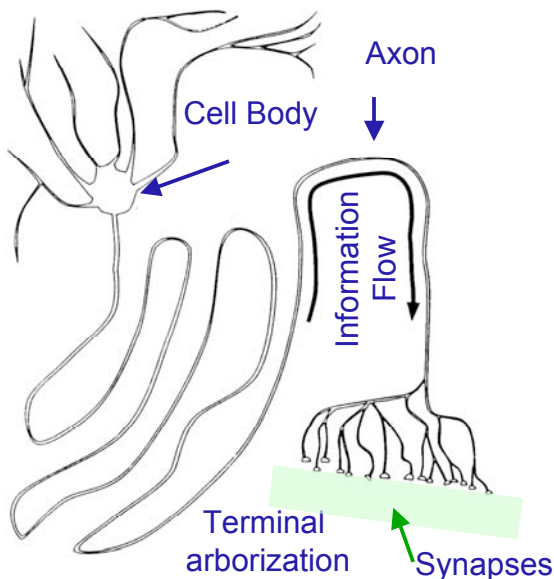
## 3. Vorlesung

### Neurone und neuronale Systeme

- Neurone und neuronale Systeme
  - Aufbau und Funktionsweise von neuronalen Systemen
  - Informationsfluss in neuronalen Systemen
  - Brain-Computer Interfaces
  - Aufbau und Funktionsweise von Neuronen und neuronalen Systemen (im Kleinen)
    - Natürliche Neurone
    - Künstliche neuronale Netze
    - Beispiele der Verarbeitung: Kantenerkennung

### Generic biological neuron

Dendrites

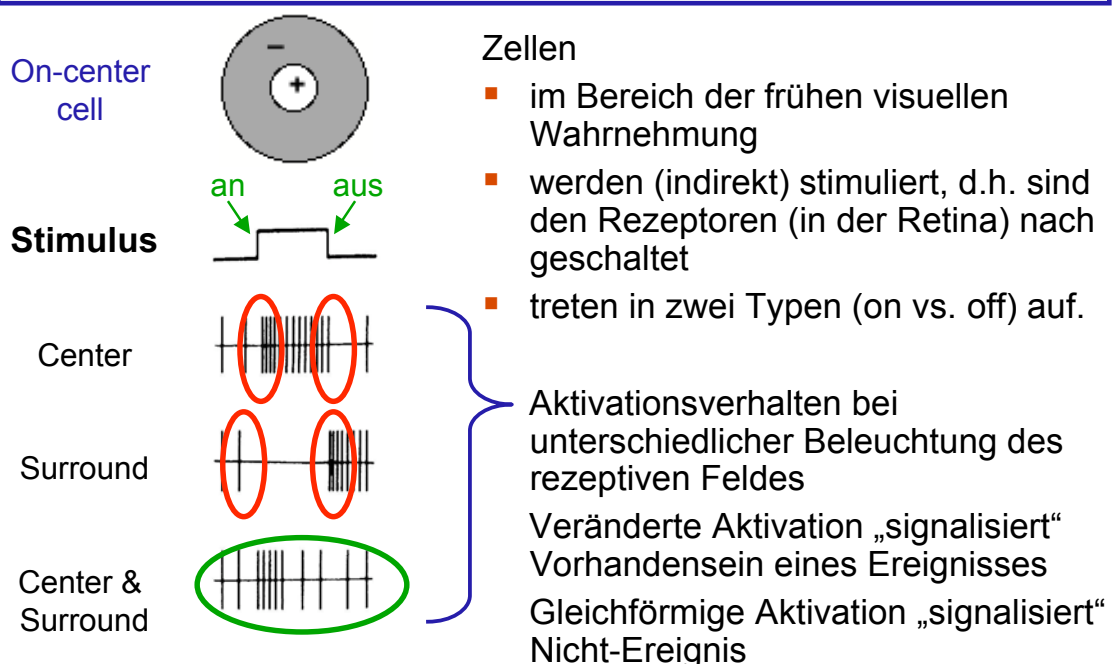


- **Dendriten** sammeln Informationen von anderen Neuronen
- **Zellkörper** integriert die – von den Dendriten – eingehenden Signale und konvertiert diese zu Ausgabesignalen
- Das **Axon** leitet das Ausgabesignal weiter
- In den **Terminalen** findet eine Konversion in chemische Signale statt.
- **Synapsen** sind der Bereich zwischen Terminalen eines Neurons und Dendriten eines anderen Neurons.

## Informationsverarbeitung in Neuronen

- Eingabe in ein Neuron ist analog („kontinuierlich“)
- Ausgabe eines Neurons wird als diskret angesehen („all-or-none“)
  - *Elektrische Potentiale, feuern von Neuronen, Nervenimpulse, Spikes*
- Ausgabe erfolgt, wenn ein Schwellwert (*threshold*) überschritten ist.
  - Ausgabe ist ein Prozess mit zeitlicher Ausdehnung.
- Zwei Arten von Synapsen (Konnektionen zwischen Neuronen)
  - **Exzitatorische**: Das empfangende Neuron wird mit grösserer Wahrscheinlichkeit feuern.
  - **Inhibitorische**: Das empfangende Neuron wird mit geringerer Wahrscheinlichkeit feuern.

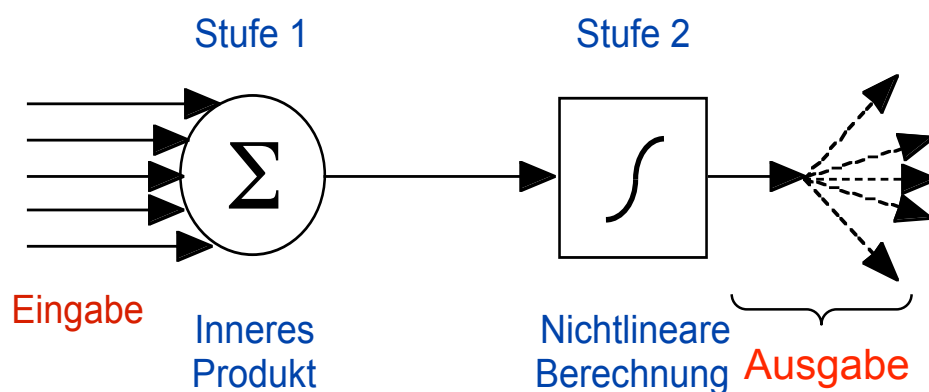
## Beispiel: On-center cells



## Künstliche Neuronale Netze

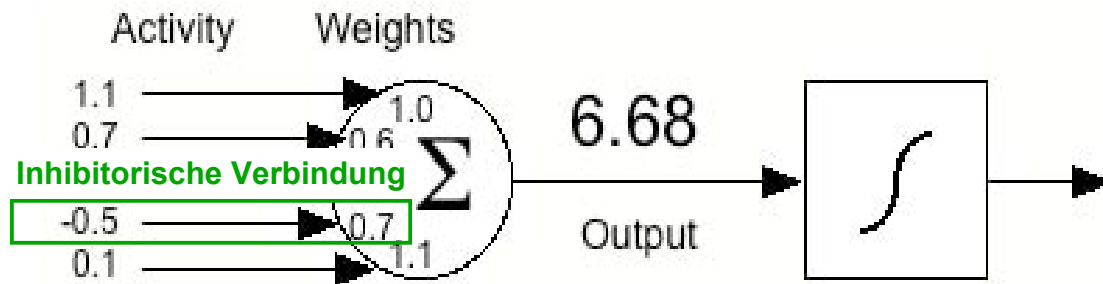
- Systeme / Modellierungen der Informatik (Neuroinformatik), die auf Prinzipien der Informationsverarbeitung in Nervensystemen basieren.
- Perspektiven auf Neuronale Netze:
  - **Entwicklung leistungsfähiger Systeme** für spezifische Aufgaben, z.B. Mustererkennung
  - **Modellierung** natürlicher neuronaler Systeme
    - Diese Forschungsrichtung beginnt mit den Arbeiten von McCulloch & Pitts (1943)
    - Zentraler Forschungsbereich der *Cognitive Neuroscience*

## Generic neural network computing unit



- **Ein- / Ausgabe** wird durch numerische Werte / Aktivationen modelliert.
- Exzitatorische vs. inhibitorische Konnektion wird durch Positivität bzw. Negativität der Aktivationen bzw. der **Gewichte** repräsentiert.
- Berechnung erfolgt in zwei Stufen.

## Integration der Eingabewerte

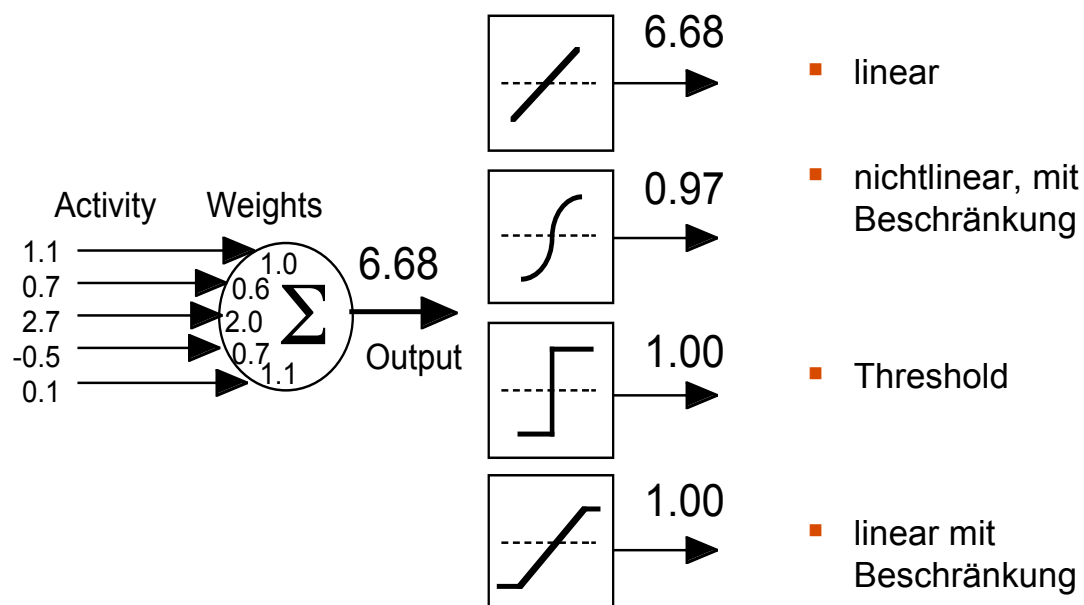


- Die Eingabeverbindungen (*connections*) werden durch Bildung des Inneren Produktes integriert.

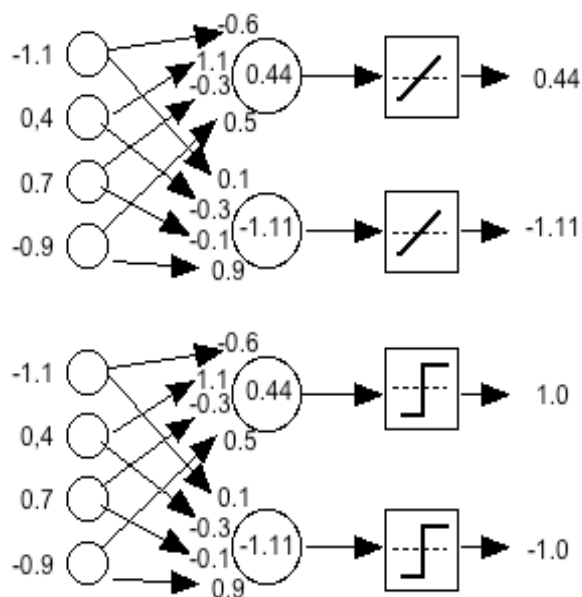
$$\sum a_i w_i$$

- Jede *Konnektion* geht mit einem *Gewicht*, das die Verbindungsstärke repräsentiert, in die Berechnung des Ausgabewertes ein.

## Berechnung des Ausgabewertes (alternative Ausgabefunktionen)



## Simple network computation



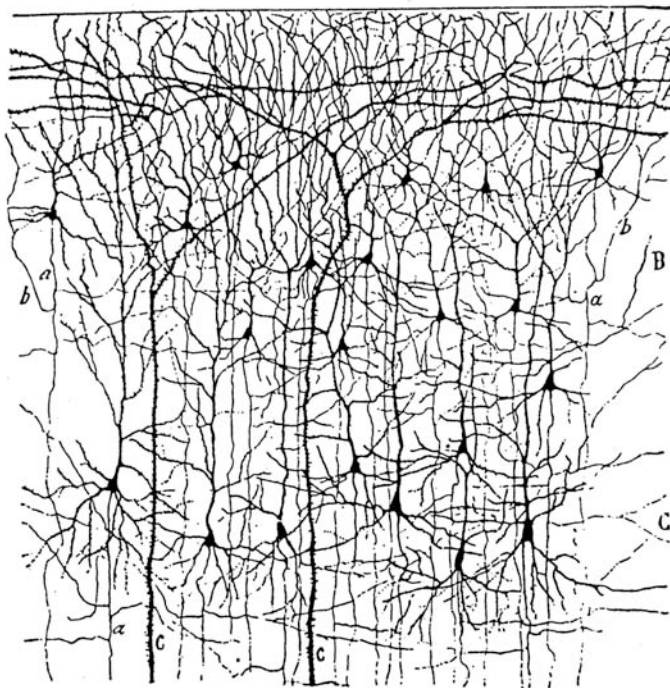
Parameter des Netzwerkes:

- Struktur des Netzwerkes, d.h. Verbindungen
- Gewichte der eingehenden Konnektionen (betr. 1. Schritt)
- Berechnung des Ausgabewertes (2. Schritt)

## Konnektivität von Neuronen

- Menschliches Nervensystem:  
ca.  $10^{12}$  Neurone und  $10^{15}$  Synapsen
  - Mittlere Anzahl der Synapsen je Neuron:  $10^3 - 10^5$
- Neuronale Verbindungen im Cortex:  
Jedes Neuron ist etwa mit 3% der Neuronen verbunden, die in der  $1 \text{ mm}^2$  Nachbarschaft liegen.
  - spärliche Verbindungen in der Nachbarschaft
  - Verbindungen zu anderen Zellklassen
  - *Vorwärts- und Rückwärtsprojektionen*

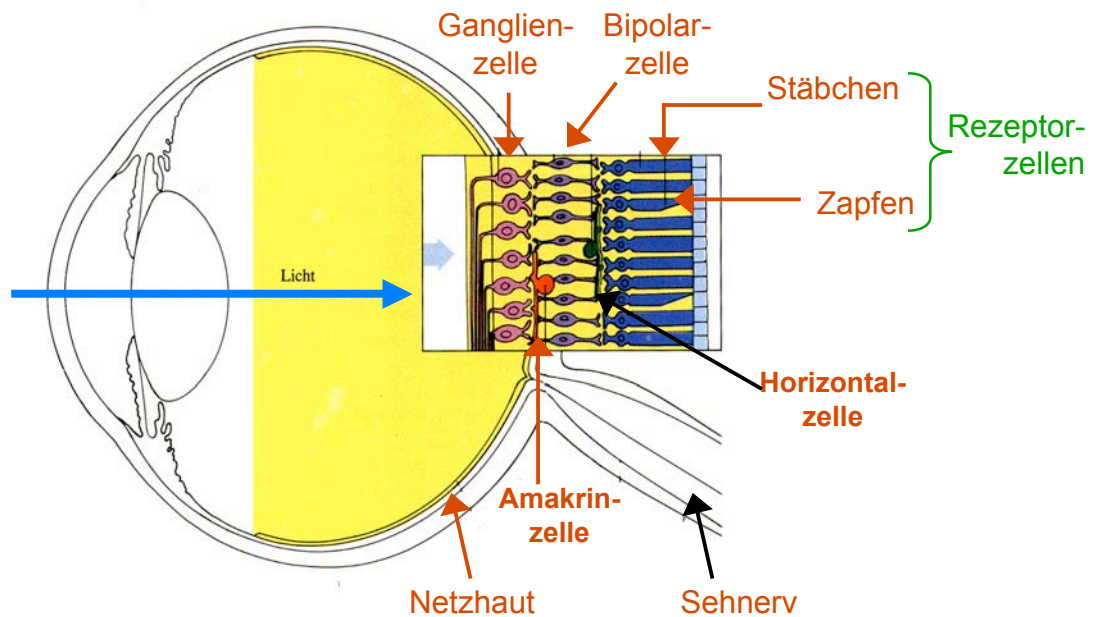




## Neuronale Struktur des visuellen Cortex

Schichten 1 – 3

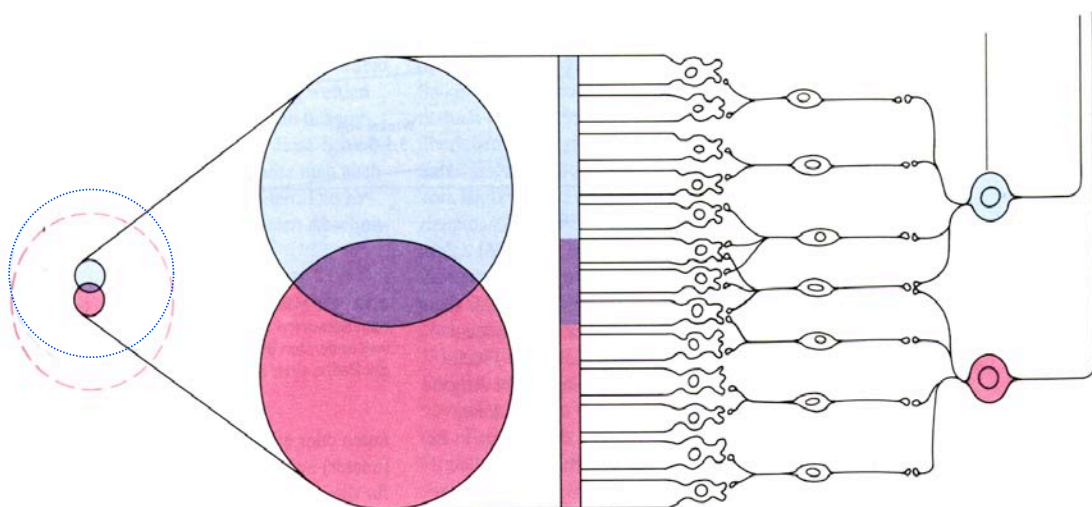
# Das Auge



## Überlappung rezeptiver Felder

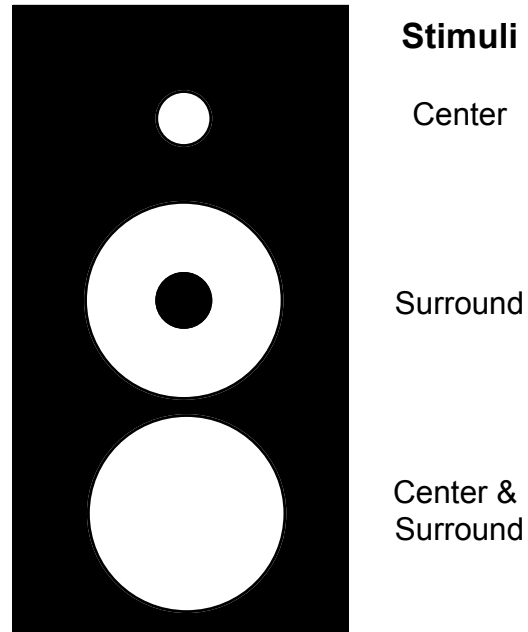
rezeptive  
Felder

Rezeptorzellen    Bipolarzellen    Ganglienzellen

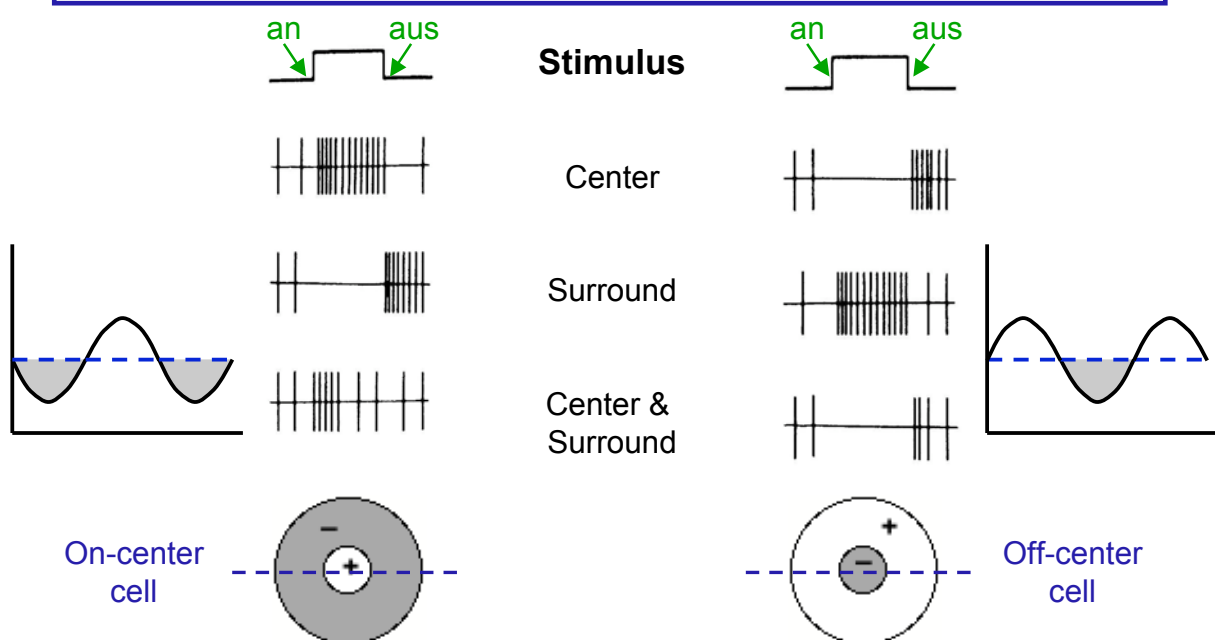


## Rezeptive Felder von Ganglienzellen: On-center cells – Off-center-cells

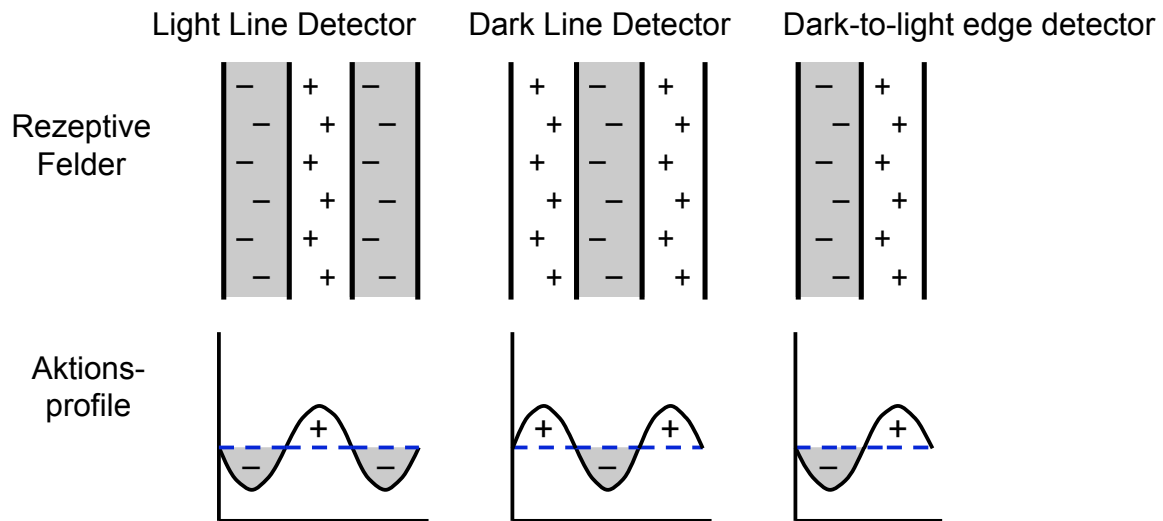
- **Rezeptives Feld** =  
Bereich der Rezeptoren, die  
über ein oder mehrere  
Synapsen zu einem Neuron  
führen.
- Zwei Typen von  
Ganglienzellen in Bezug auf  
ihre rezeptiven Felder:
  - On-center cells
  - Off-center-cells



## On-center cells – Off-center-cells

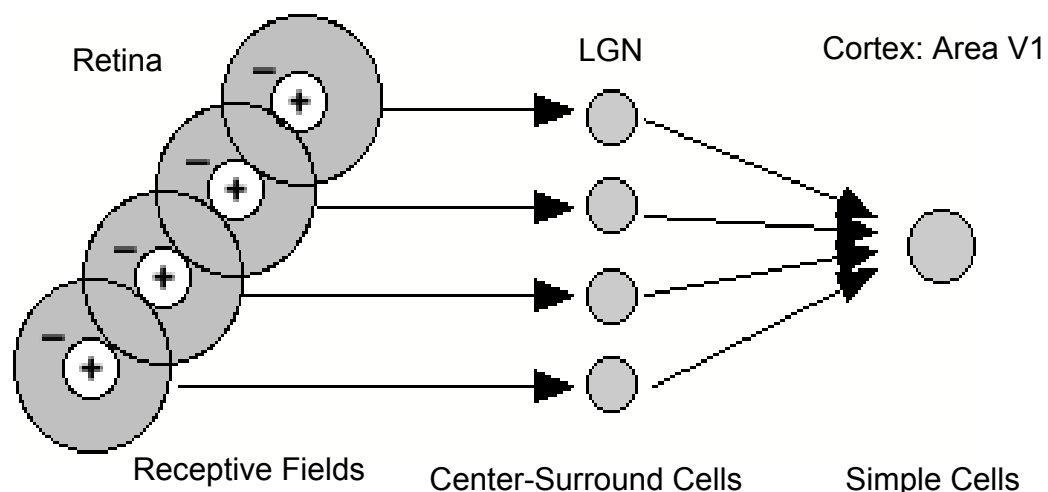


## Linien- und Kantendetektoren im visuellen Cortex



- Spezifische Zellen in der Area V1, die auf Linien bzw. Kanten reagieren.
- ‚Visuelle Atome‘ für die weitere visuelle Perzeption

## Neuronale Verschaltung von ‚Einfachen Zellen‘ der Area V1



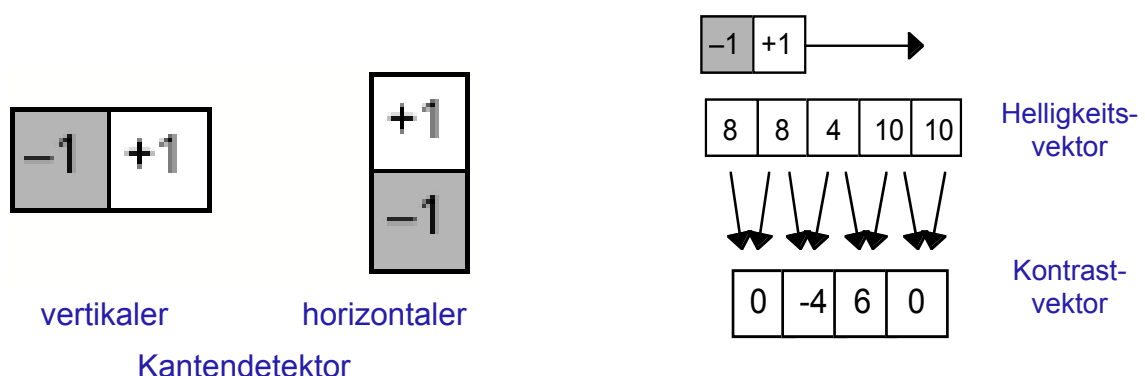
- Kanten- und Liniendetektion basiert auf der Verschaltung von LGN-Zellen, deren rezeptive Felder aligniert sind.

# Computationelle Modelle der Kantenerkennung

- Kantenerkennung in der natürlichen Perzeption
  - Vorbereitung durch Ganglienzellen und Zellen im LGN, die Kontrastinformation verrechnen. (Center-Surround-Zellen)
  - Eigentliche Kanten- und Linienerkennung in V1 („Einfache Zellen“)
  - Zusätzlich in V1 Zellen für die Erkennung von sich bewegend Linien.
- Computationelle Modelle
  - mathematische Methoden zur Berechnung von Kontrastinformation und zur Kantenerkennung. Realisierbar
    - durch Differenzen- und Differentialgleichungen
    - durch neuronale Netze

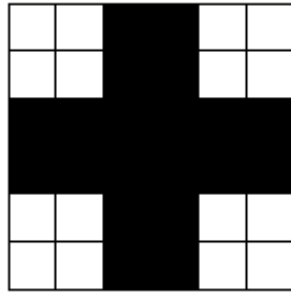
## Kantendetektion mit lokalen Operatoren (1)

- „Kantenoperatoren“: Lokalisierung von Kontrastkonstellationen
  - Anwendung von lokalen Operatoren auf Pixel-Konstellationen (Matrizen)
  - Kantenoperatoren werden auf jedes Paar von Pixeln angewandt, das die für den Operator spezifische Gestalt hat.
  - Anwendung der Kantenoperatoren ist eine Faltung.



## Kantendetektion mit lokalen Operatoren (2)

Graubild



10	10	02	02	10	10
10	10	02	02	10	10
02	02	02	02	02	02
02	02	02	02	02	02
10	10	02	02	10	10
10	10	02	02	10	10

Matrix der  
Bildintensitäten

+1
-1

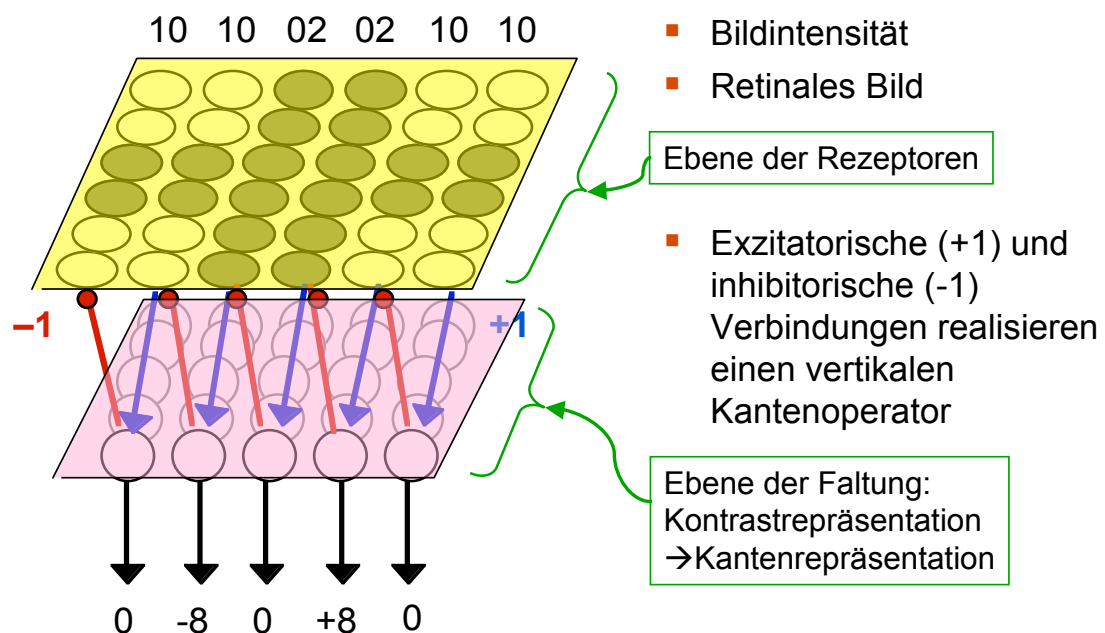
Anwendung  
des **vertikalen**  
Kantenoperators

0	-8	0	8	0
0	-8	0	8	0
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	-8	0	8	0
0	-8	0	8	0

0	0	0	0	0	0
8	8	0	0	8	8
0	0	0	0	0	0
-8	-8	0	0	-8	-8
0	0	0	0	0	0

Anwendung  
des **horizontalen**  
Kantenoperators

## Kantendetektion mit einem Neuronalen Netzwerk



## Second-order Edge Operators

- Operatoren zweiter Stufe berücksichtigen Nachbarschaften zu mehreren Zellen.
- Hierdurch können Differenzen von Differenzen berücksichtigt werden.
- Summe aller Zellen eines Kantendetektors ist NULL.

-1	+2	-1
----	----	----

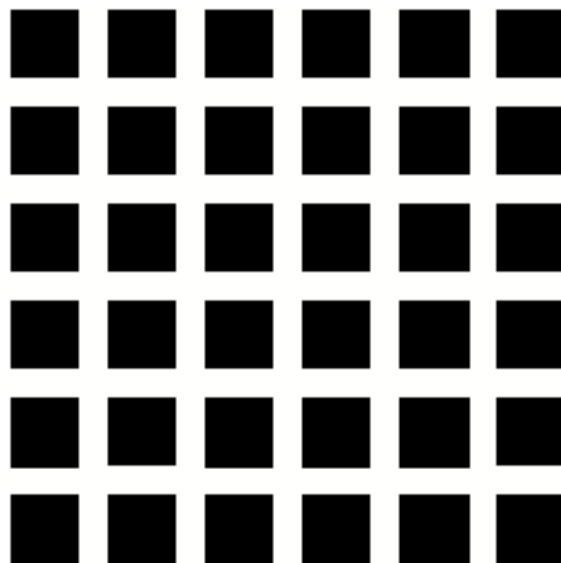
vertikal

-1	-1	-1
-1	+8	-1
-1	-1	-1

omnidirektional

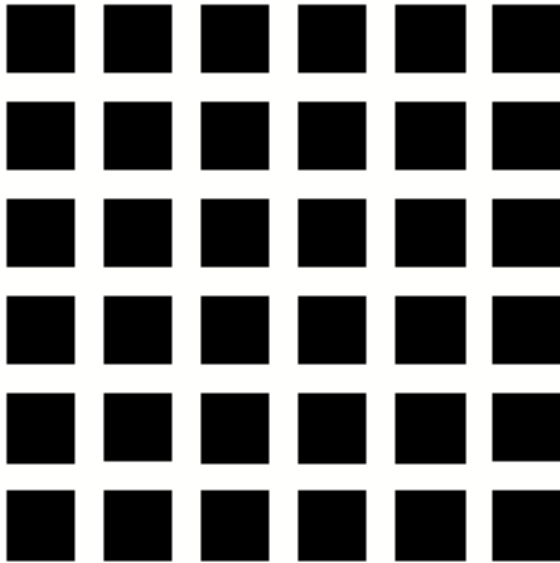
10	10	02	02	10	10
10	10	02	02	10	10
02	02	02	02	02	02
02	02	02	02	02	02
10	10	02	02	10	10
10	10	02	02	10	10

40	-16	-16	40
-16	-8	-8	-16
-16	-8	-8	-16
40	-16	-16	40



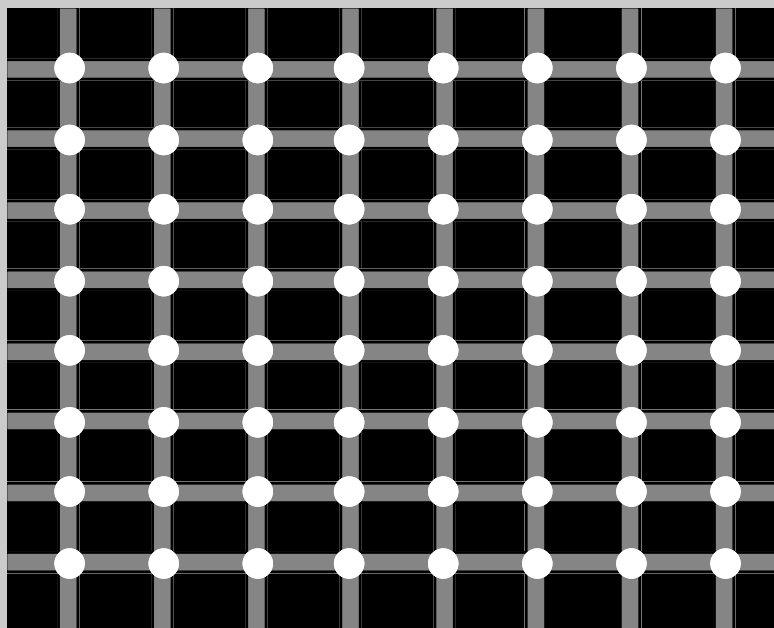


## Kontur- und Kontrastillusionen (1)



### ■ Hermann-Gitter Illusion:

- Welche Prozesse produzieren den Eindruck von „grauen Flecken“ im Kreuzungsbereich?
- Warum gelingt keine Unterdrückung dieses Eindrucks?

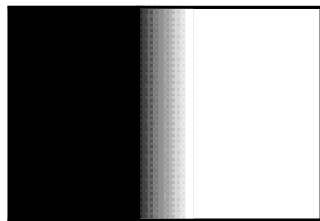


## Chevreul Streifen

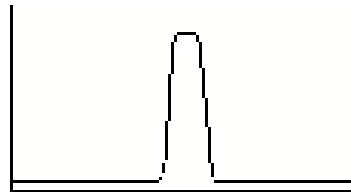


## Luminanzkanten & Luminanzprofile

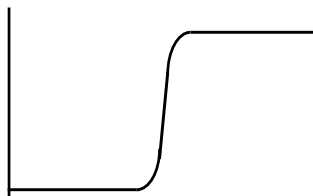
Luminanz-  
kante



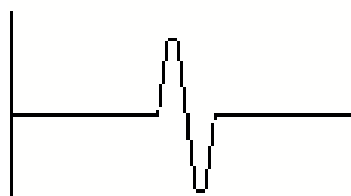
1. Ableitung



Luminanz-  
profil



2. Ableitung



- Berechnung des Nulldurchgangs der 2. Ableitung (zero crossing) ist das differential-analytische Analogon zur Anwendung von Kantenoperatoren.

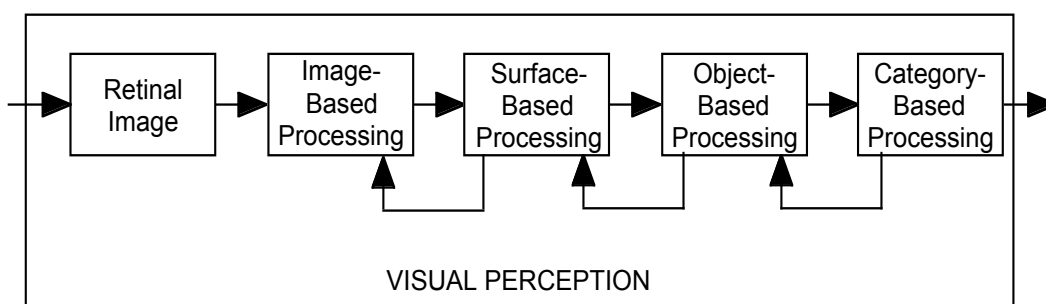
# Informatik im Kontext (IKON-1)

## Neurone und neuronale Systeme

### ↓ Wahrnehmung

- 3. Neurone und neuronale Systeme
  - Neuronale Systeme: Aufbau, Funktionsweise und Informationsfluss
    - Brain-Computer Interfaces
    - Natürliche Neurone & künstliche neuronale Netze
- 4. Wahrnehmung
  - Visuelle Wahrnehmung
    - Farbwahrnehmung, Gestaltprinzipien, Objekterkennung
  - Haptische Wahrnehmung

## Vier Stufen der visuellen Wahrnehmung



- Retinal image: 2-D Projektion der Umwelt
- Image based processing: Erkennen von Bildatomen, z.B. Kanten
- Surface based processing: 2-D-Primitive: Regionen,...
- Object based processing: 3-D-Primitive,
- Category based processing: Erkennen, Beziehung zum Wissen