

# Neuronale Reizleitung

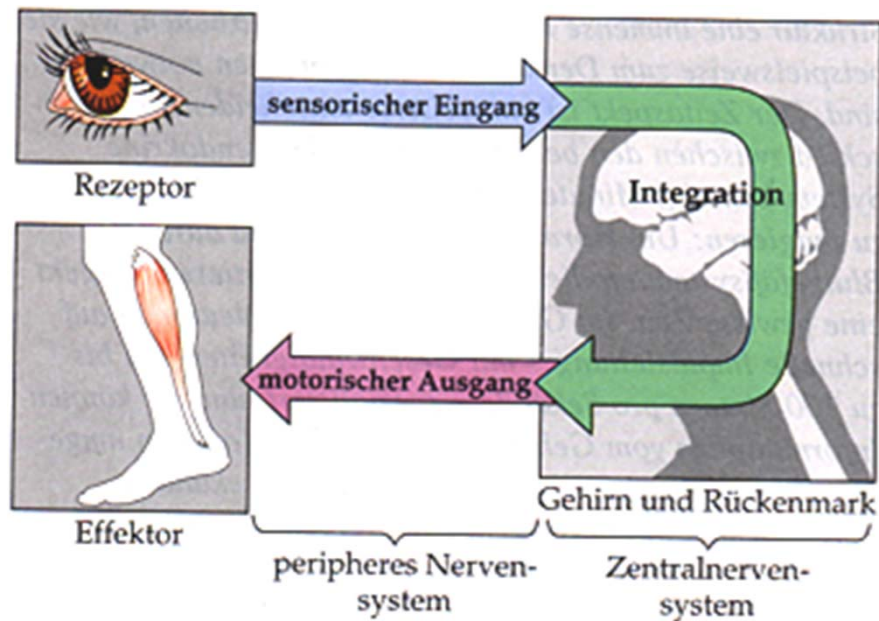
# Ionen und elektrische Signale

- Kurzer Blick auf die Zellbiologie
- Bildung und Aufrechterhaltung des Ruhepotentials
- Voraussetzungen für die Entstehung eines Aktionspotentials
- Weiterleitung und Geschwindigkeit der Ausbreitung des Aktionspotentials, sowie beteiligte Faktoren

# **Funktionelle Organisation des Nervensystems**

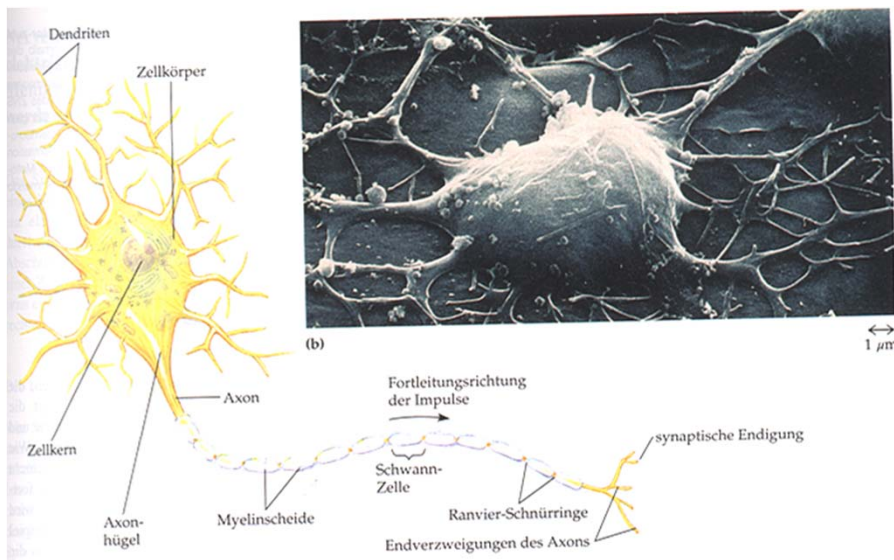
Zellbiologie

# Reizweiterleitung am Beispiel des Nervensystems



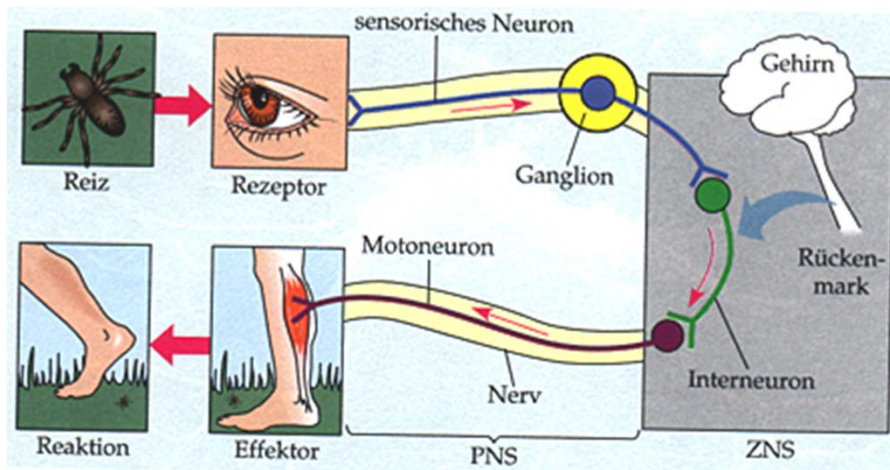
- Sensorischer Eingang
  - Sinnesrezeptor
  - Signalwandlung
  - Signalweiterleitung
- Integration der Information
- Adäquate Antwort
  - Motorischer Output

# Aufbau eines Wirbeltierneurons



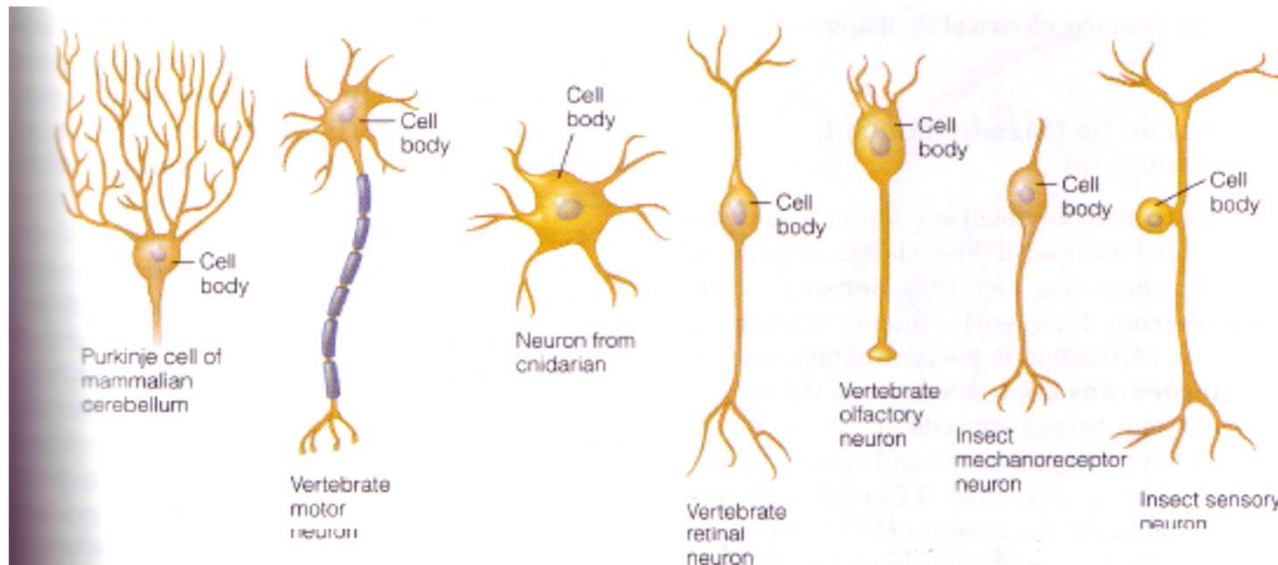
- **Zellkörper (Soma)**
- **Dendriten**
  - Leiten Signale **zum** Zellkörper
- **Axone**
  - Leiten Signale **zu** ihrer Spitze (**vom** Zellkörper **weg**)

# Funktionelle Typen von Neuronen

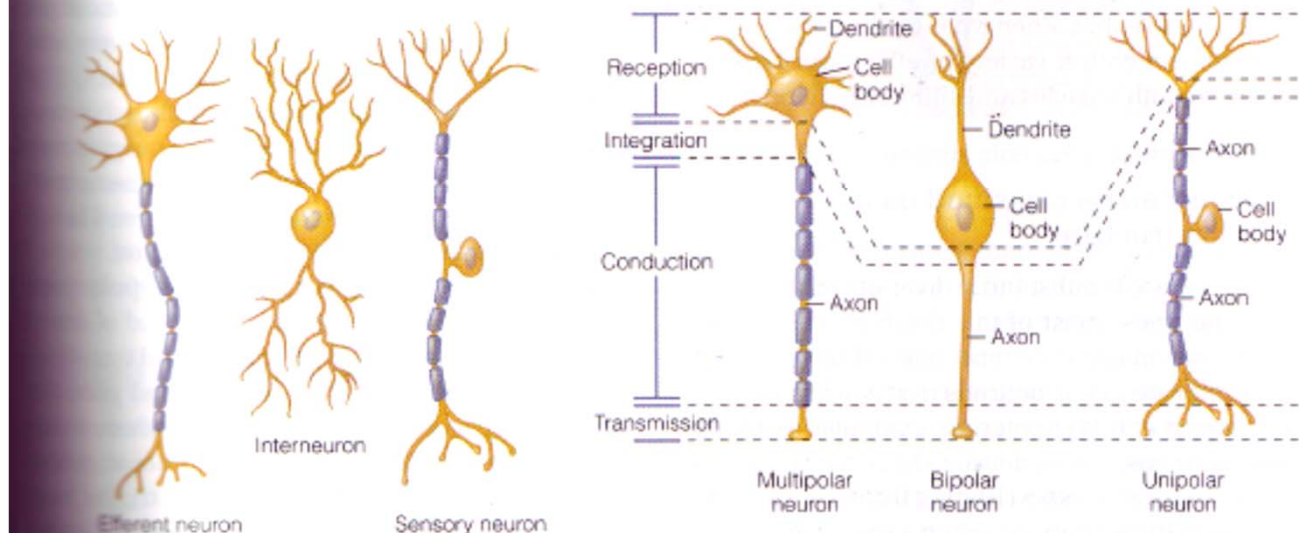


- Sensorische Neuronen
- Interneuronen
- Motoneuronen
- Innerhalb der Klassen morphologisch unterscheidbare Untergruppen

# Strukturelle Vielfalt von Neuronen



Structural diversity of neurons

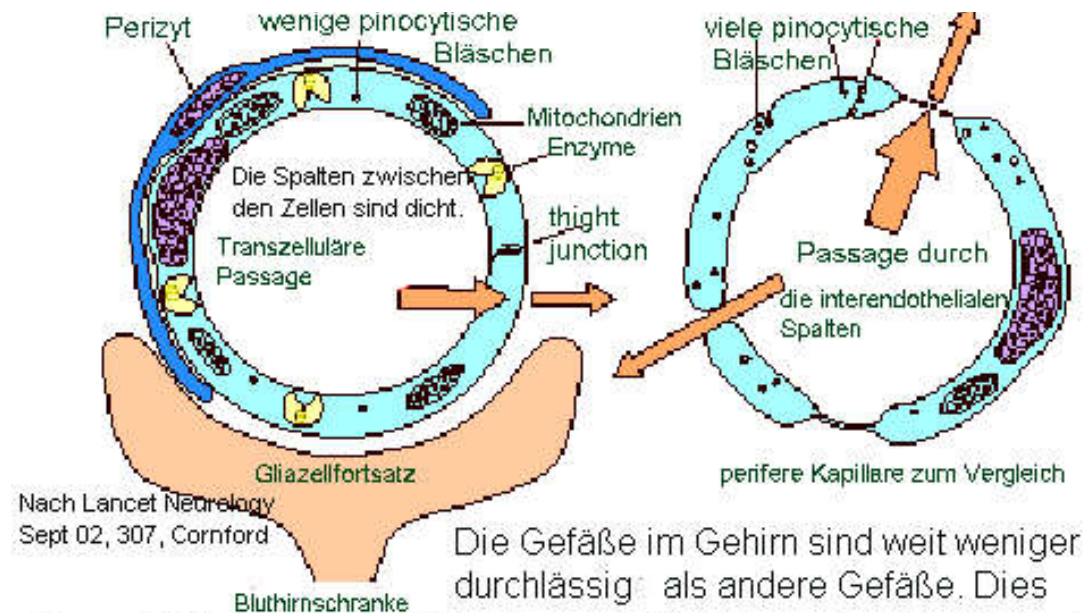
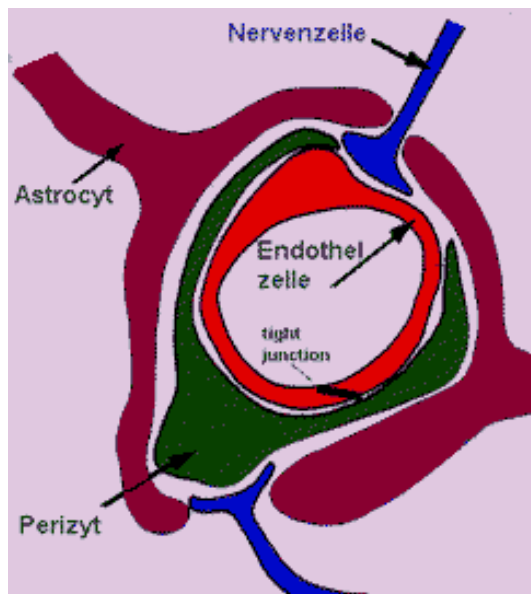


(c) Structural classes of neurons

- Sensorische Neuronen
- Interneuronen
- Motoneuronen
- Innerhalb der Klassen morphologisch unterscheidbare Untergruppen

# Gliazellen

- **Glia = Leim:** Gliazellen bedingen strukturelle Integrität
- **Astrozyten:** Umschließen Blutkapillaren im Gehirn => Blut/Hirn-Schranke
  - Zusammen mit Pericyten, Microglia



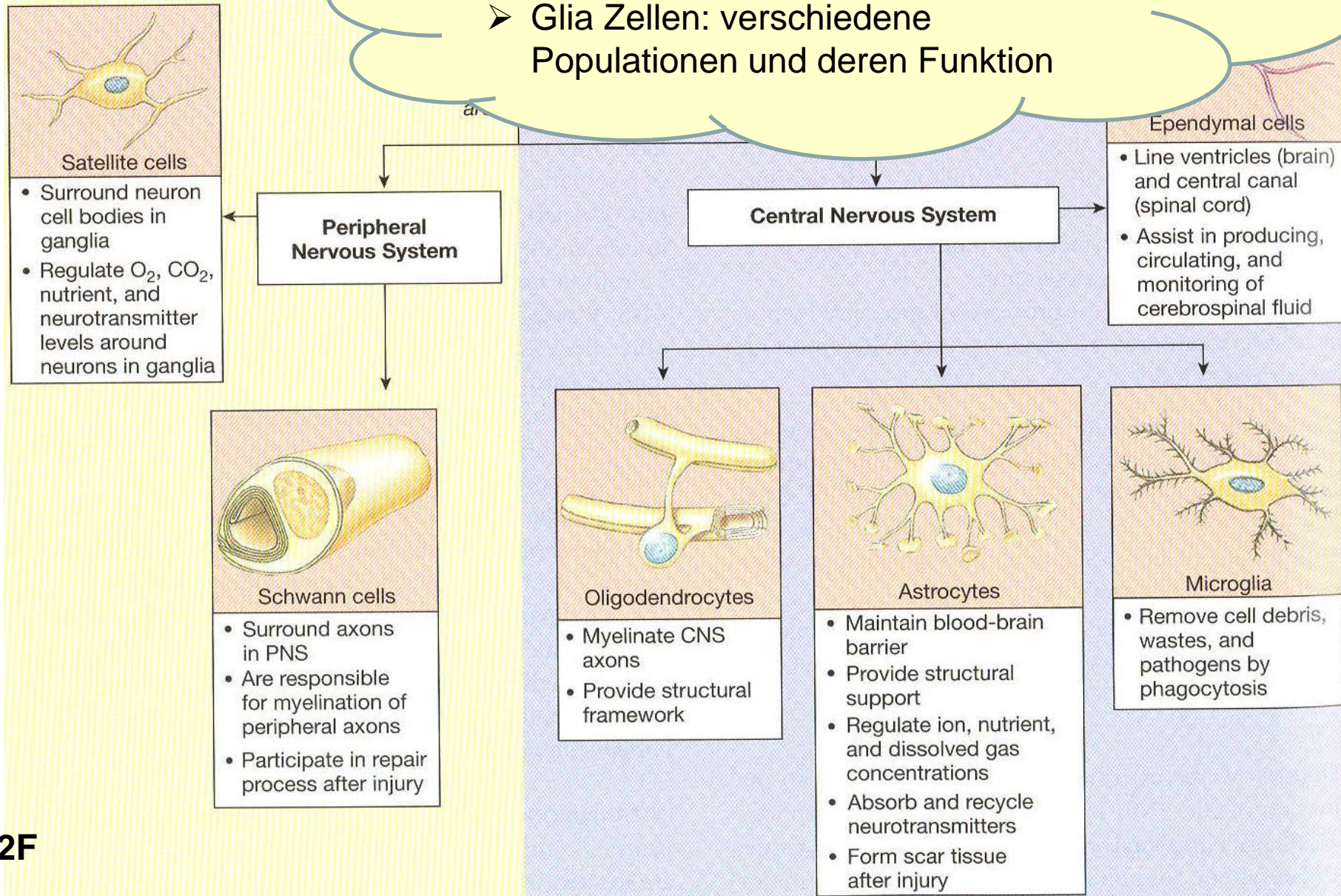


# Gliazellen

- ***Glia = Leim***: Gliazellen bedingen strukturelle Integrität
- ***Astrozyten***: Umschließen Blutkapillaren im Gehirn => Blut/Hirn-Schranke
  - Zusammen mit Pericyten, Microglia
- ***Oligodendrozyten***: Bilden isolierende Myelinscheiden um Axone der meisten Neurone des ZNS
- ***Schwann-Zellen***: Bilden Myelinscheiden im peripheren Nervensystem
- ***Multiple Sklerose***

# Glia-Zellen

- Zellpopulationen im Nervensystem
- Prinzipieller Aufbau einer Nervenzelle
- Glia Zellen: verschiedene Populationen und deren Funktion



# Neuroglia des ZNS

- Astrozyten
  - Aufrechterhaltung der Blut/Hirnschranke und Kontrolle der interstitiellen Umgebung
  - Aufbau eines dreidimensionalen Gerüsts im Gehirn
  - Strukturelle Reparaturen im geschädigten Nervengewebe
  - Wegweiserfunktion während der neuronalen Entwicklung
- Oligodendrozyten
  - Aufbau einer elektrischen Isolationsschicht (Myelinschicht) entlang der Axone
- Microglia
  - Entstehen aus denselben mesenchymalen Stammzellen wie Monozyten und Macrophagen (Fresszellen)

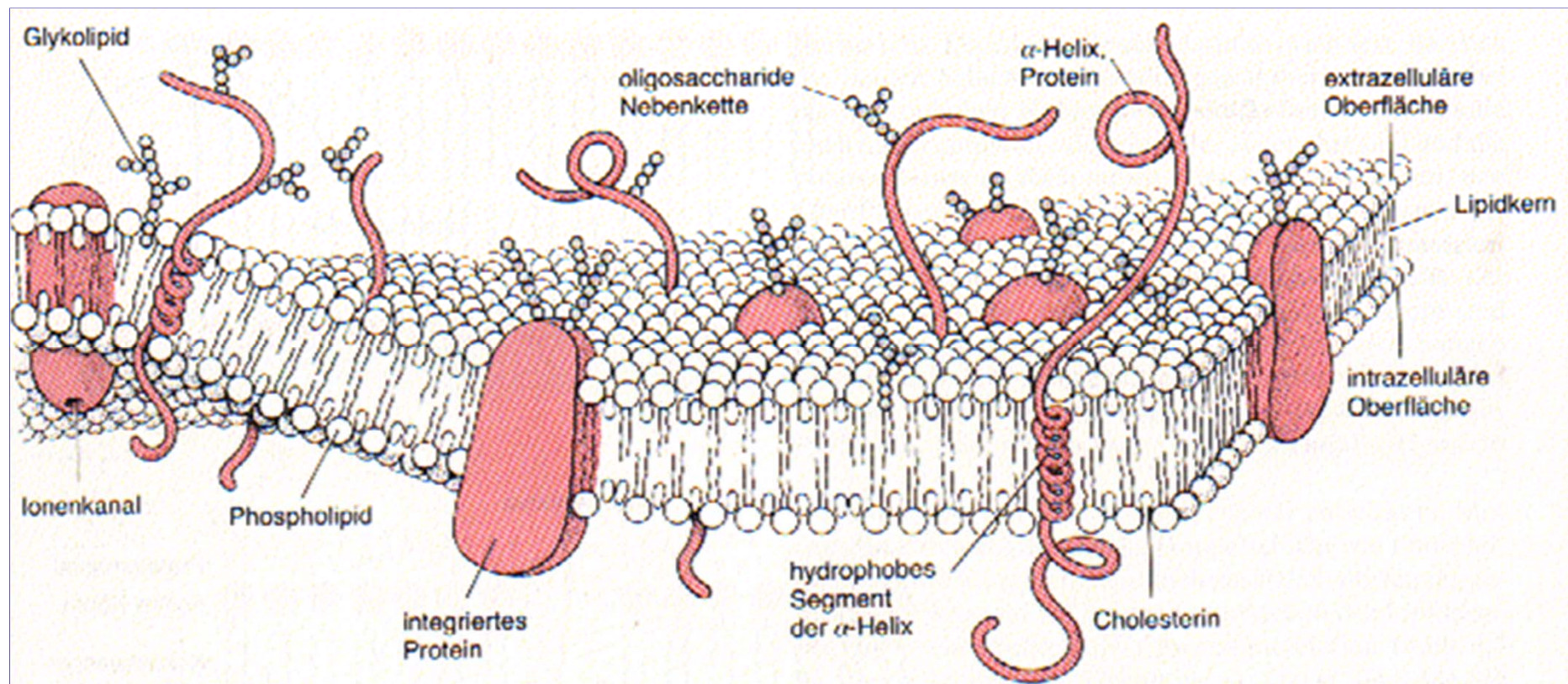
# Neuroglia des PNS

- Satellitenzellen
  - Regulation der Umgebung von Neuronen, ähnlich wie Astrozyten im ZNS
- Schwannzellen
  - Myelinschicht, ähnlich wie Oligodendrozyten im ZNS
  - Demyelinierung: Anorganische und bakterielle Toxine, Erkrankungen (Multiple Sklerose)

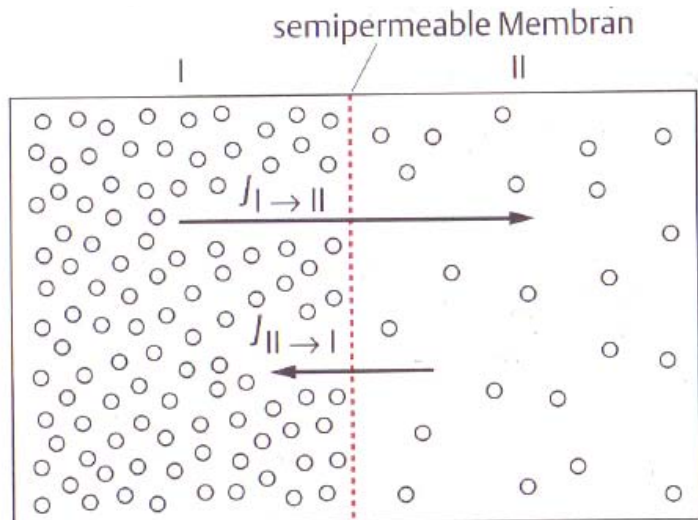
# **Das Ruhepotential einer Nervenzelle**

Voraussetzungen

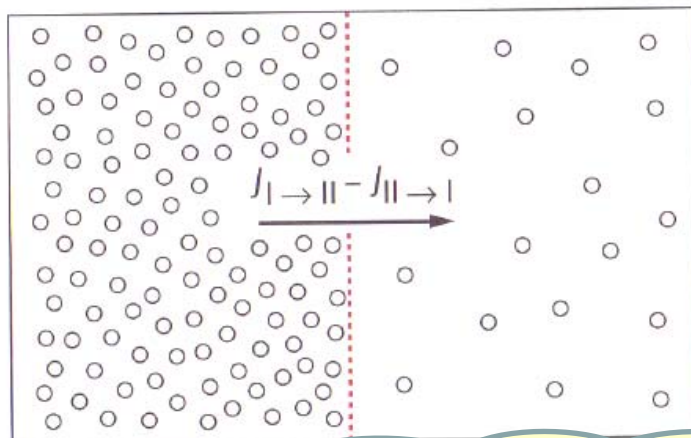
# Aufbau einer typischen Zelloberflächenmembran



# Permeabilität an einer Membran

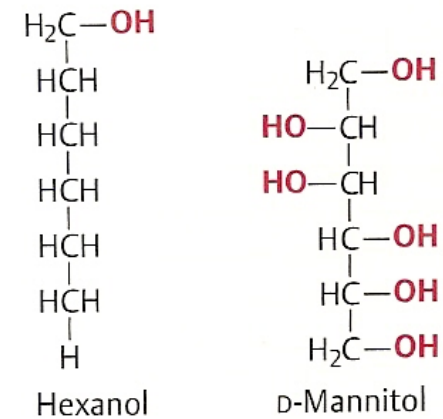


A gerichteter Fluß



B Nettfluß

Für schwache Säuren und Basen den pH nicht vergessen!

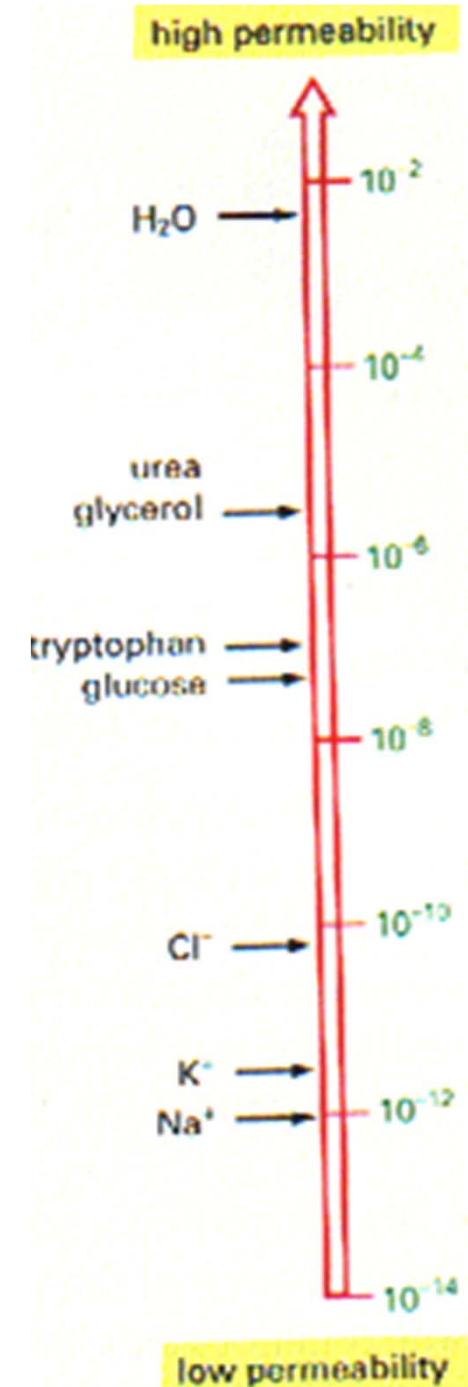
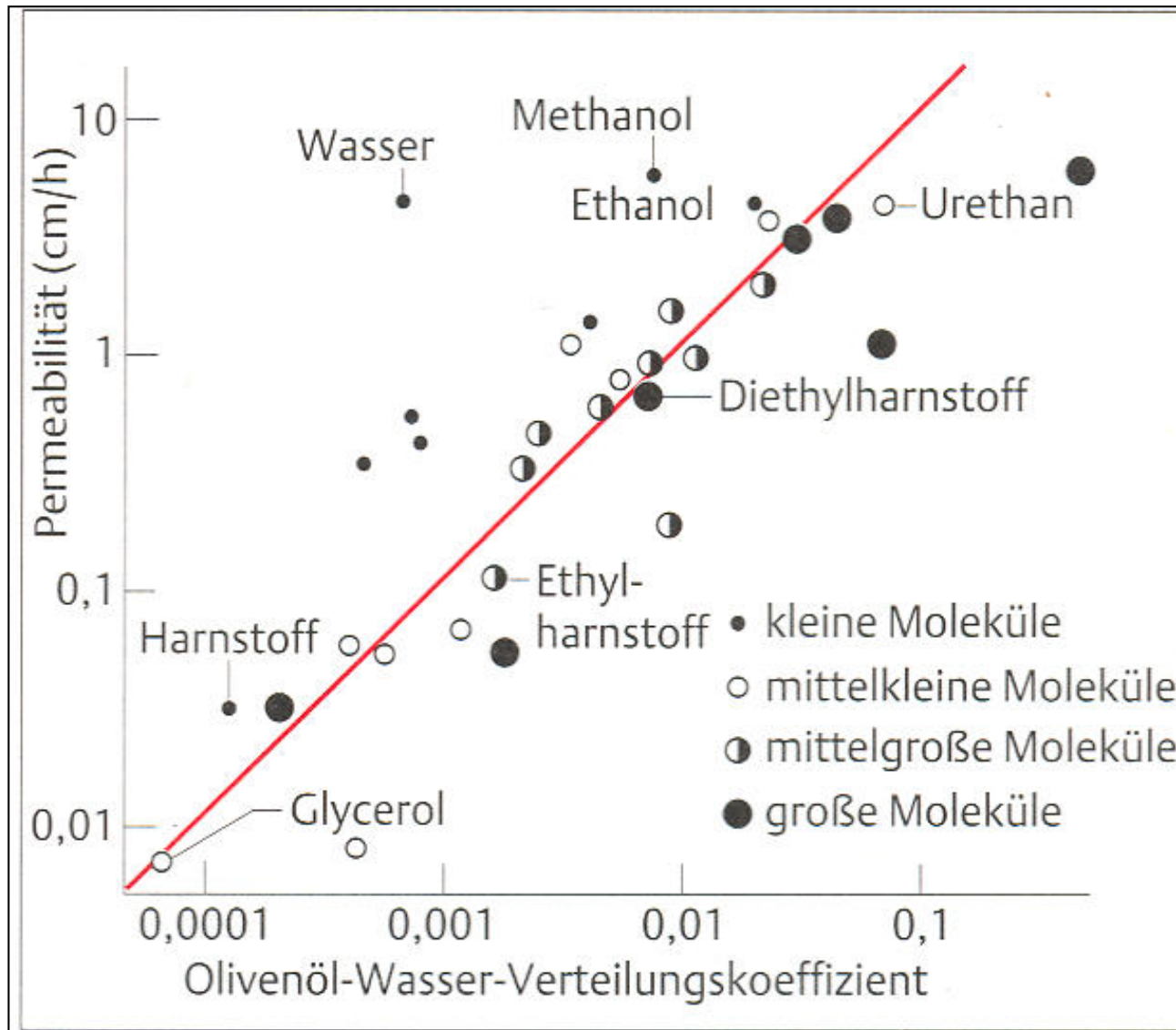


Tab. 2: Orale Resorption in Abhängigkeit von der Lipophilie der Substanzen. Nach Smith, Humprey und Charuel, 1990.

| $\log P_{7,4}$ Säuren | Basen                                                             |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------|
| < 0,5                 | schlechte Resorption wegen niedriger Lipophilie                   |
| 0,5–2                 | gute Resorption (limitiert durch evtl. First-pass-Metabolismus)   |
| > 2                   | zunehmend geringere Resorption wegen schlechter Wasserlöslichkeit |

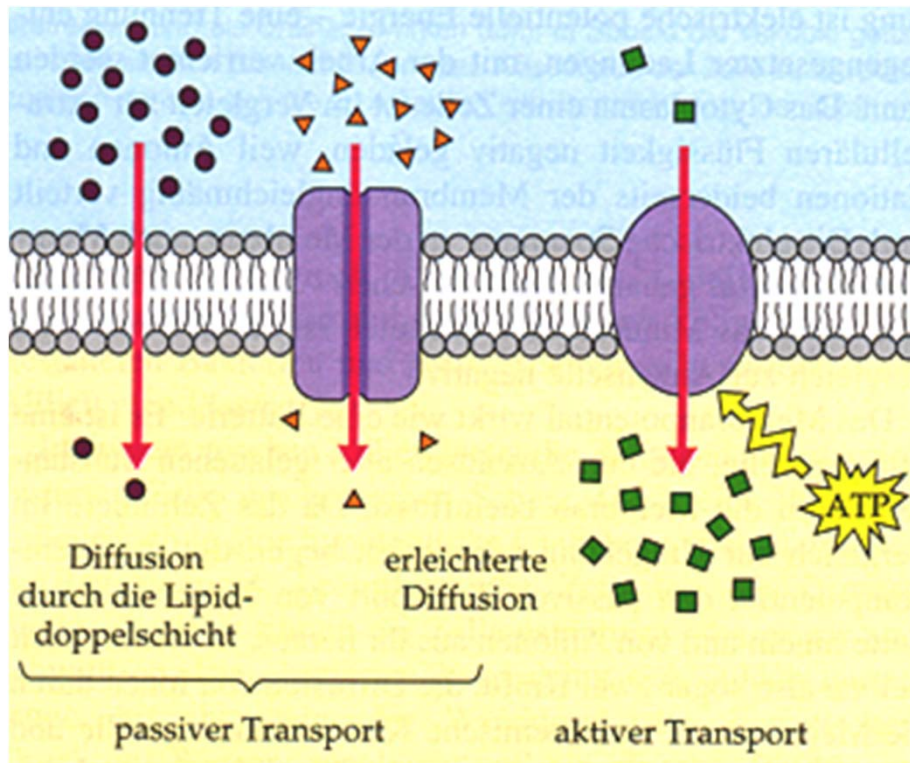
\* Octanol/Puffer-Verteilungskoeffizienten bei pH 7,4 (nicht korrigiert nach Ausmaß der Ionisation)

# Durchlässigkeit von Membranen in Abhängigkeit von Stoffeigenschaften





# Transportmechanismen



- Passiver Transport
  - Energieunabhängig
  - Diffusion
- Aktiver Transport
  - Energieabhängig
  - **Pumpen:** Arbeiten gegen einen Konzentrationsgradienten
  - **Ionenpumpen:** Erzeugen ein elektrisches Potential

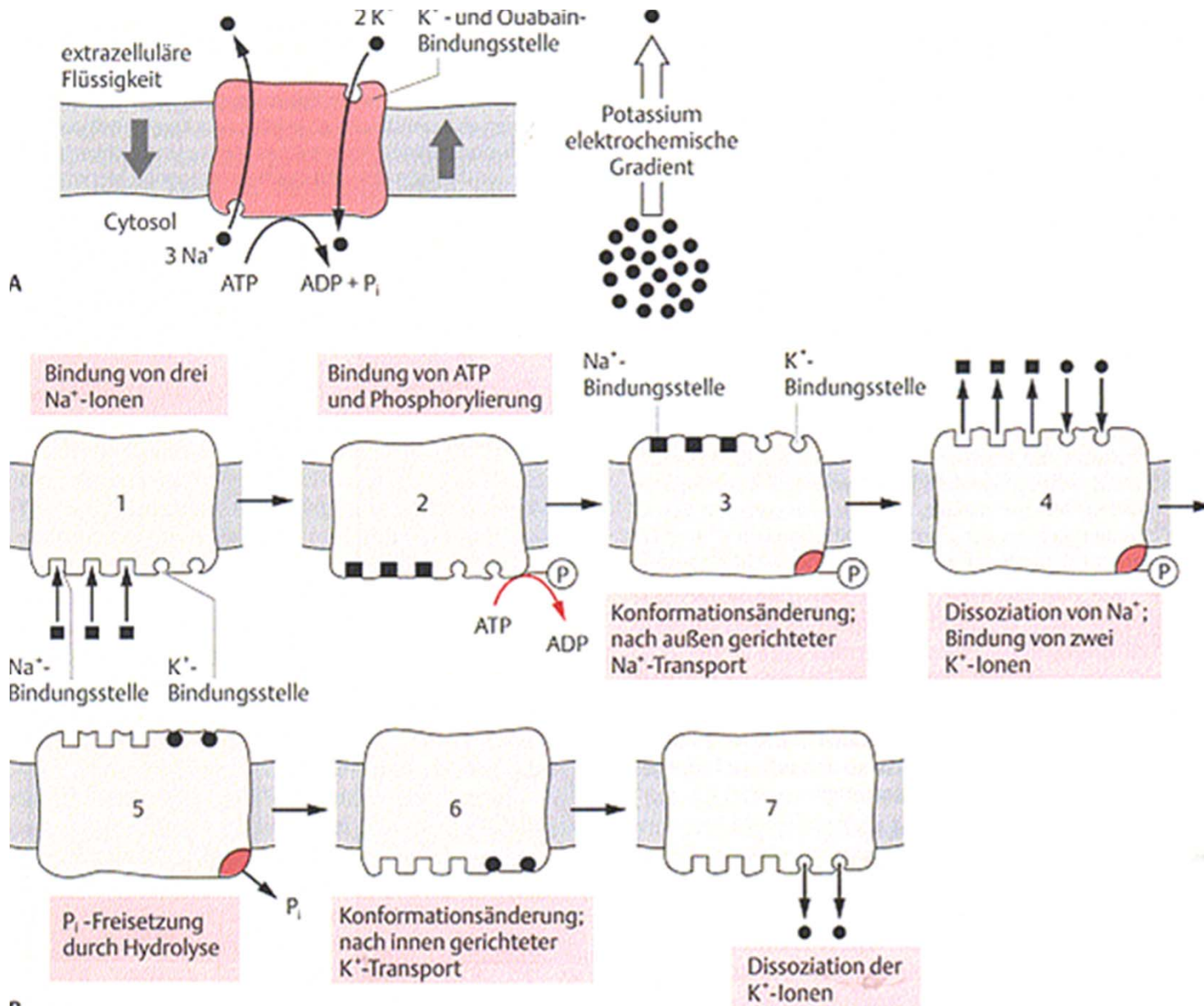
# Pumpen

- Komplexe Protein-Moleküle aus mehreren Untereinheiten
- Bewirken einen unidirektionalen Transport
  - meist entgegen dem elektrochemischen Gradienten
- Kopplung an eine chemische Reaktion
  - treibende Kraft in der Regel Spaltung von ATP

# Austauscher

- Vermitteln *gekoppelten Transmembran-austausch* bestimmter Ionen
- Treibende Kraft: Konzentrationsgradient oder Spannungsgradient über die Membran
- Beispiel: Hoher  $\text{Na}^+$ -Gradient von außen nach innen führt dazu, dass  $\text{Ca}^{2+}$  gegen einen  $\text{Ca}^{2+}$ -Gradienten aus der Zelle heraus transportiert werden kann.

# Na<sup>+</sup>/K<sup>+</sup> - ATPase



# Kanalproteine

- Bilden polare Tunnel durch die Membran
- Besitzen Selektionsfilter für Ionen
- Öffnen nur nach Reizung
- Beispiel: Spannungsaktivierter Natrium-Kanal
  - treibende Kraft: Konzentrationsgefälle = elektrochemischer Gradient

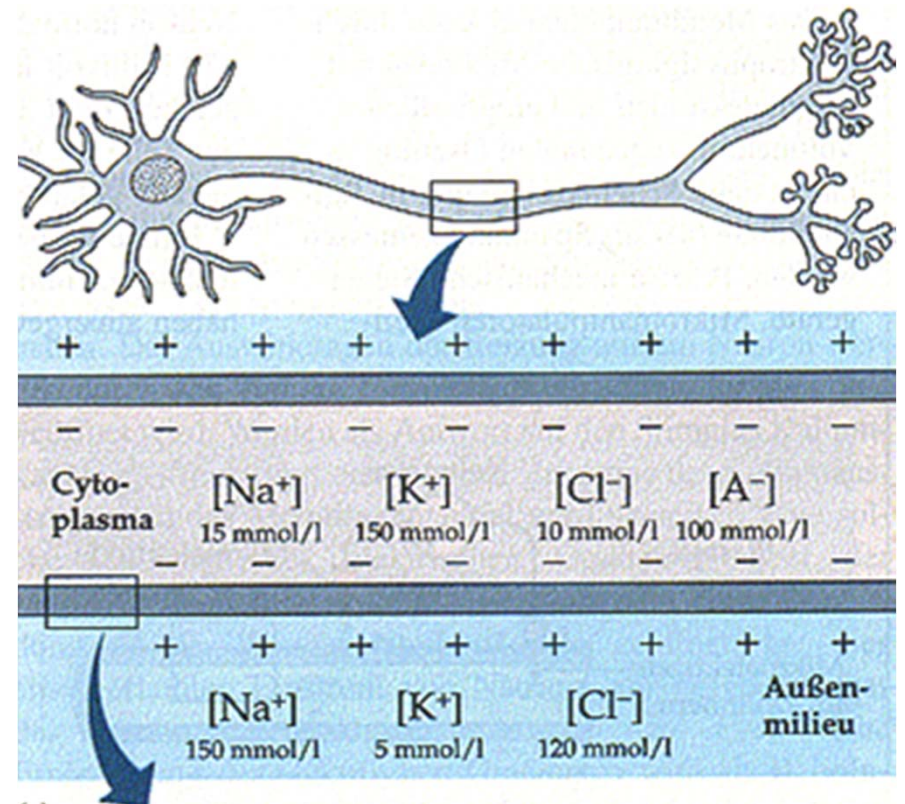
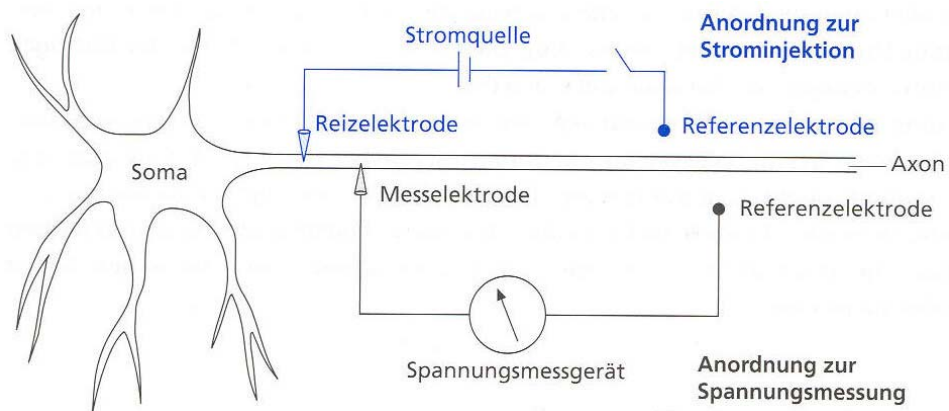
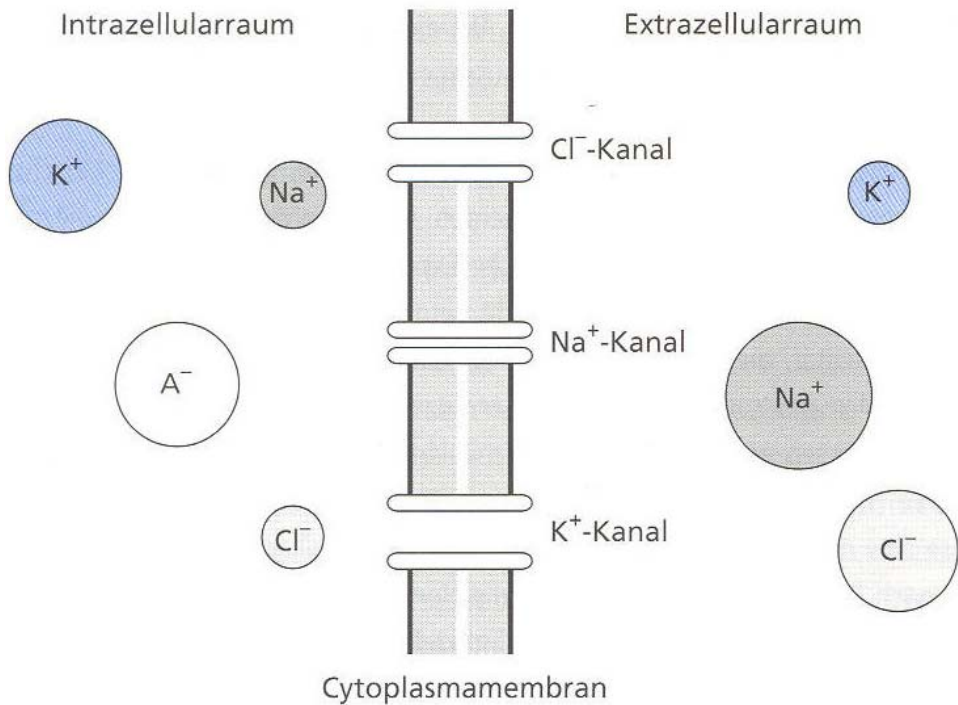
# Vier Grundtypen von Kanälen

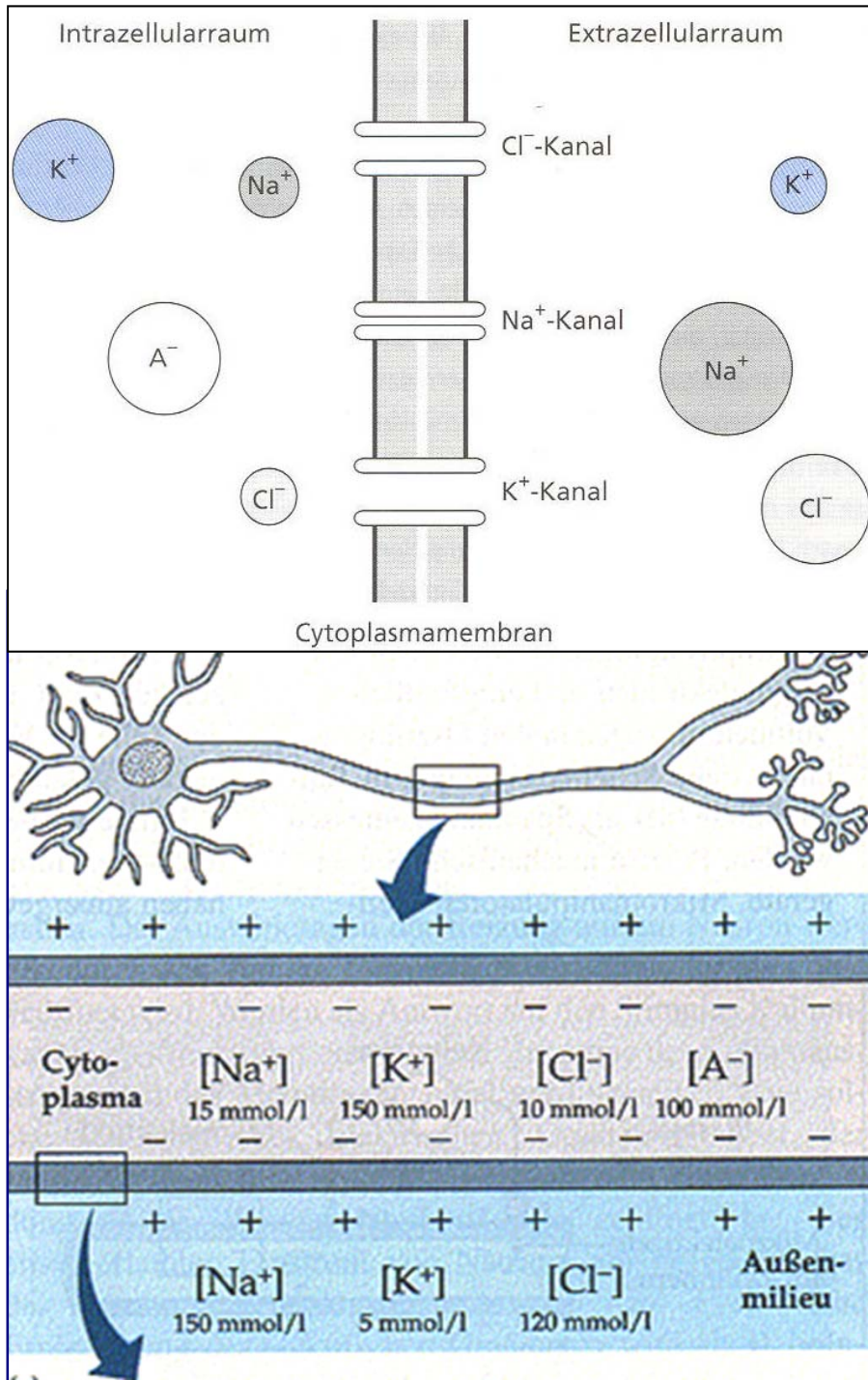
Ionenverteilung und Ionenbeweglichkeit

- Austauscher
- Kanäle (Arten, Beispiele)

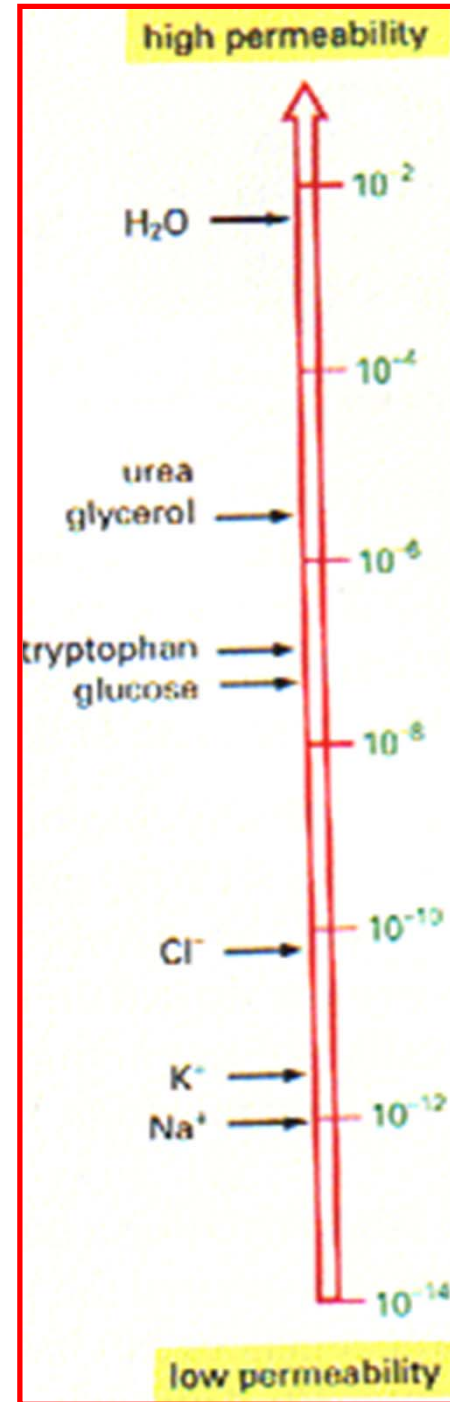
- **Leak channels (Leckkanäle)**
  - Wichtigster Vertreter:  $K^+$ -leak channel
  - wichtig für die Erzeugung des Membran Ruhepotentials
- **Voltage-gated channels (Spannungs-gesteuerte Kanäle)**
  - Wichtige Vertreter:  $Na^+$ -Kanäle entlang von Muskel und Nerven-fasern,  $Ca^{2+}$ -Kanäle in der Endigungen der Axone von Nervenzellen
- **Ligand-gated channels (Liganden-gesteuerte Kanäle)**
  - Wichtiger Vertreter: Nikotinischer Acetylcholinrezeptor
- **Second messenger-gesteuerte Kanäle**
  - Beispiel: Natriumkanäle der muscarinischen Acetylcholin-gesteuerten Synapse, CFTR=Cystic Fibrosis Transmembrane Conductance Regulator

# Intra- und extrazelluläre Verteilung von Ladungsträgern





2F





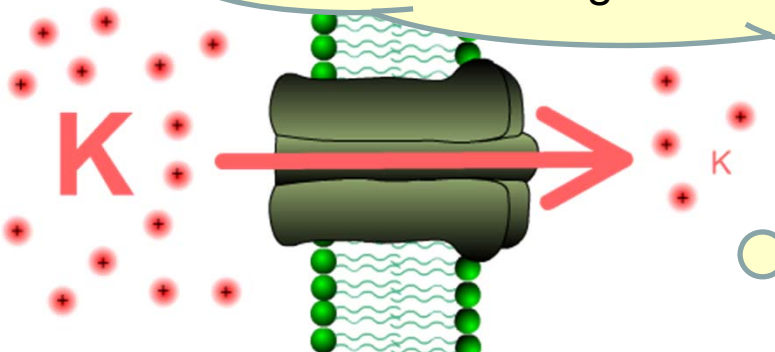
# Ruhepotential - Membranpotential

- Voraussetzung: Impermeabel für organische Ionen
- $K^+$ -Ionen wandern entlang des Konzentrationsgradienten nach außen
- $K^+$ -Ionen werden auf Grund eines Ladungsgradienten zurückgezogen
- => Ionenverteilung wird durch treibende Kraft der Konzentrationsdifferenz und der entgegengesetzt wirkenden Kraft der elektrischen Potentialdifferenz bestimmt.

# Ruhepotential Quantifizierung

Wie kommt das Ruhepotential zu Stande?

- Ionenverteilung intra-/extrazellulär
- Beteiligte Ionen



innen

**K**

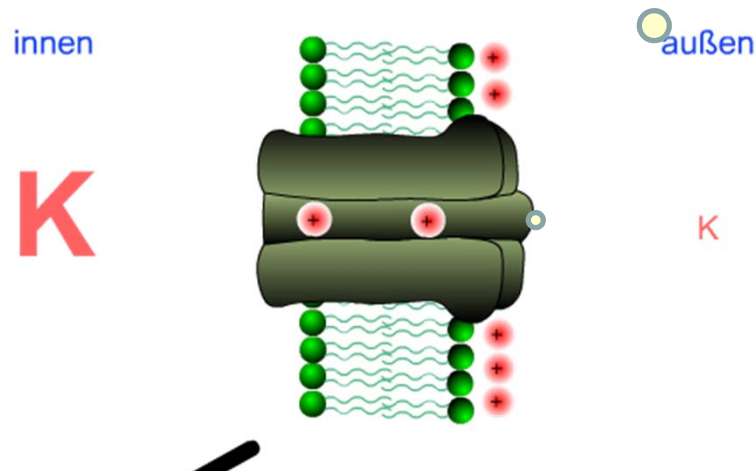
**K**

**K**

Konzentrationsgradient

$$\Delta\phi = \frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_a}{[K^+]_i}$$

Nernstsche-Gleichung



innen

**K**

**K**

außen

**K**

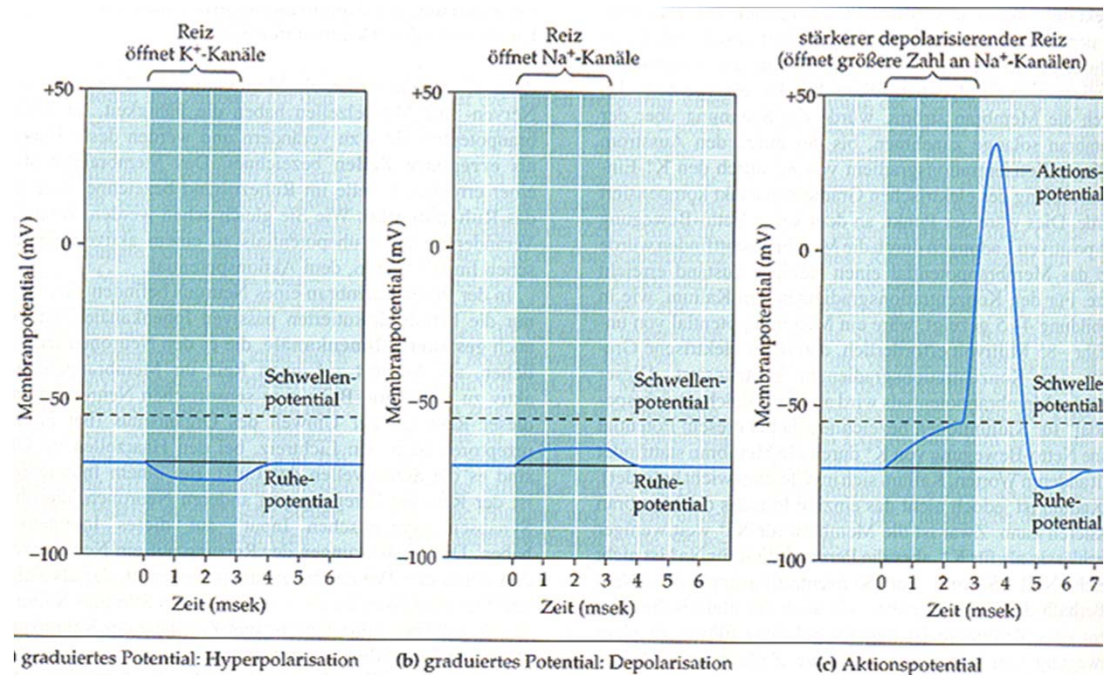
Potentialdifferenz

$$\Delta\phi = 58 \log \frac{[K^+]_a}{[K^+]_i}$$

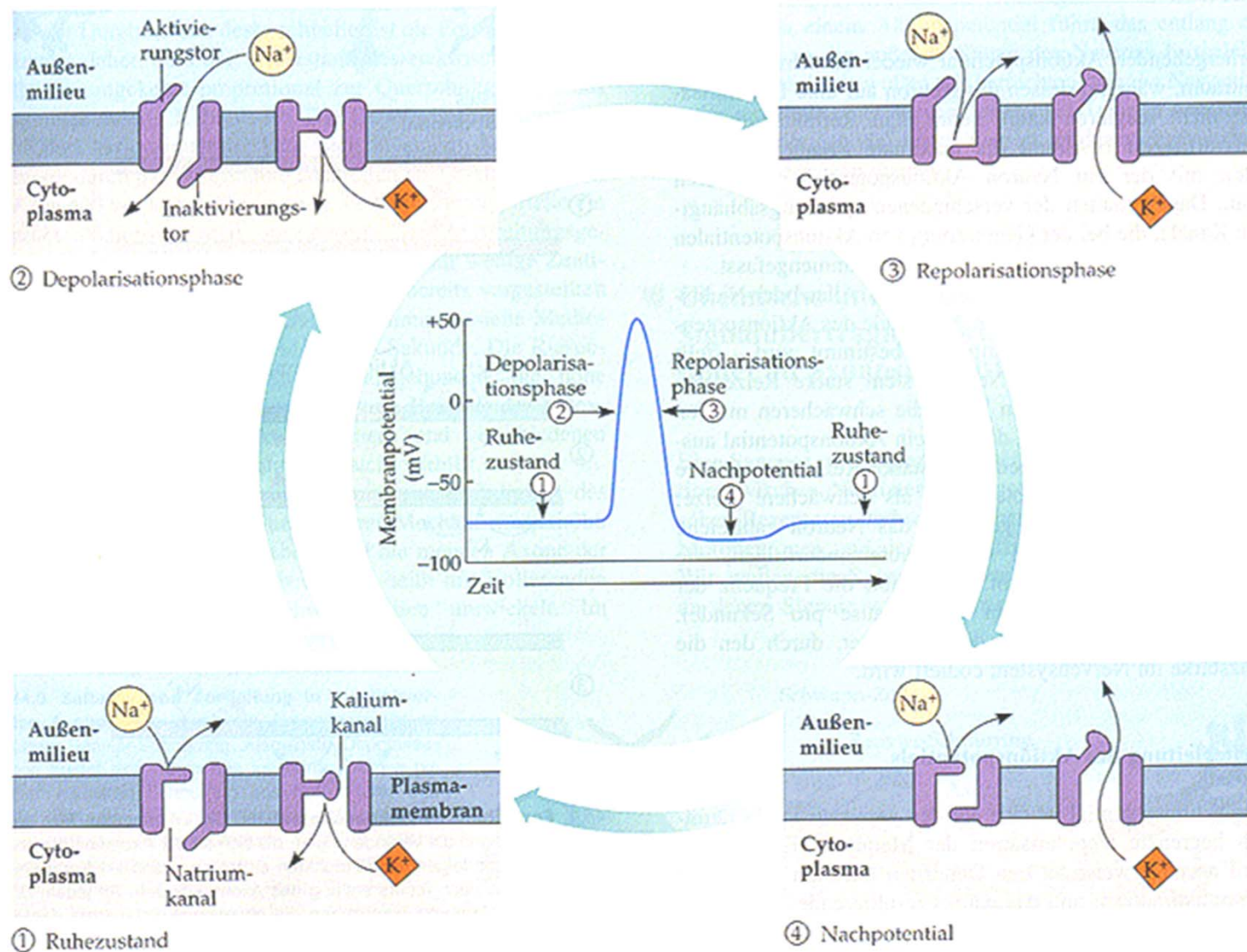
- $\Delta\Phi$  = Potentialdifferenz
- R = Allg. Gaskonstante
- T = Absolute Temperatur
- F = Faradaykonstante
- P = Permeabilitätskoeffizient

# Veränderungen des Membranpotentials

- **Ruhepotential**
  - Membranpotential einer Zelle im Ruhezustand
- **Gesteuerte Ionenkanäle**
  - Voraussetzung für die Veränderung des Membranpotentials einer Zelle
- **Hyperpolarisation**
  - Ausstrom von  $K^+$
- **Depolarisation**
  - Einstrom von  $Na^+$
- **Schwellenpotential**
  - Depolarisation korreliert mit Reizstärke
- **Aktionspotential**
  - Depolarisation überschreitet Schwellenwert (**Spike**)



# Spannungsgesteuerte Ionenkanäle und Entstehung von Aktionspotentialen



# Funktionsstrukturen des Natrium-Kanals - vereinfachte Darstellung

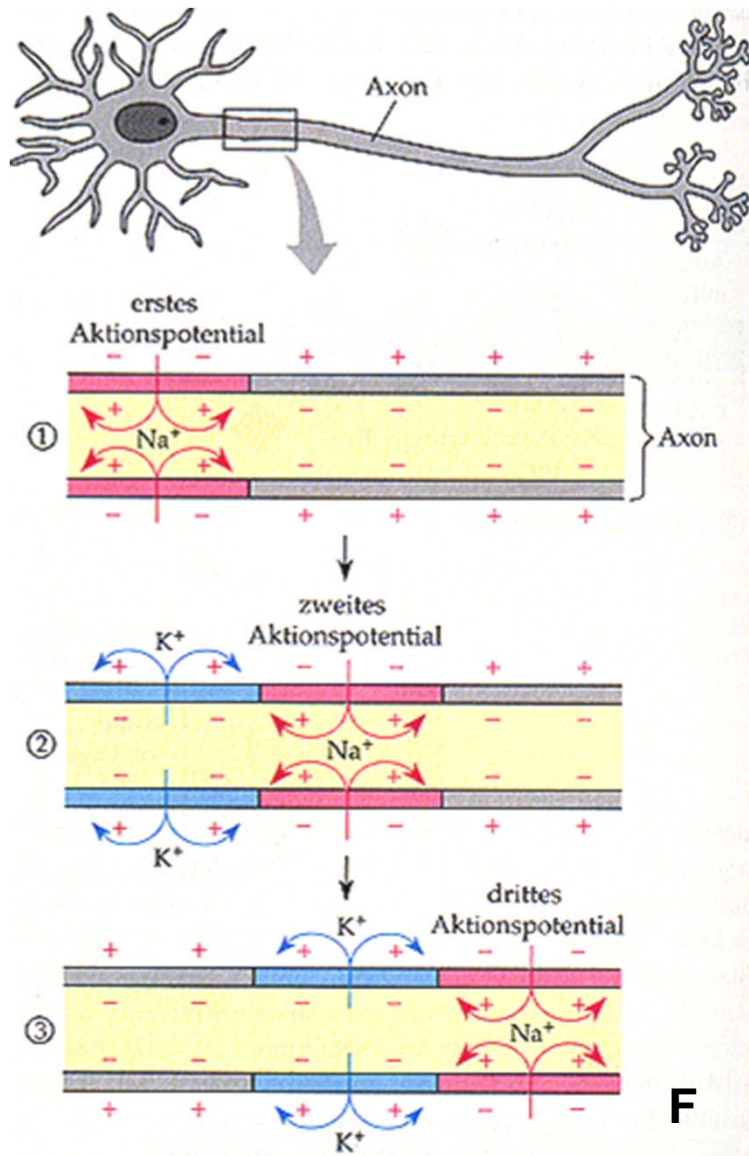
- Veränderungen des Membranpotentials
- Zustandkommen des Aktionspotentials

- Aktivierungstor (A-gate)
- Inaktivierungstor (I-gate)
- Selektivitätsfilter

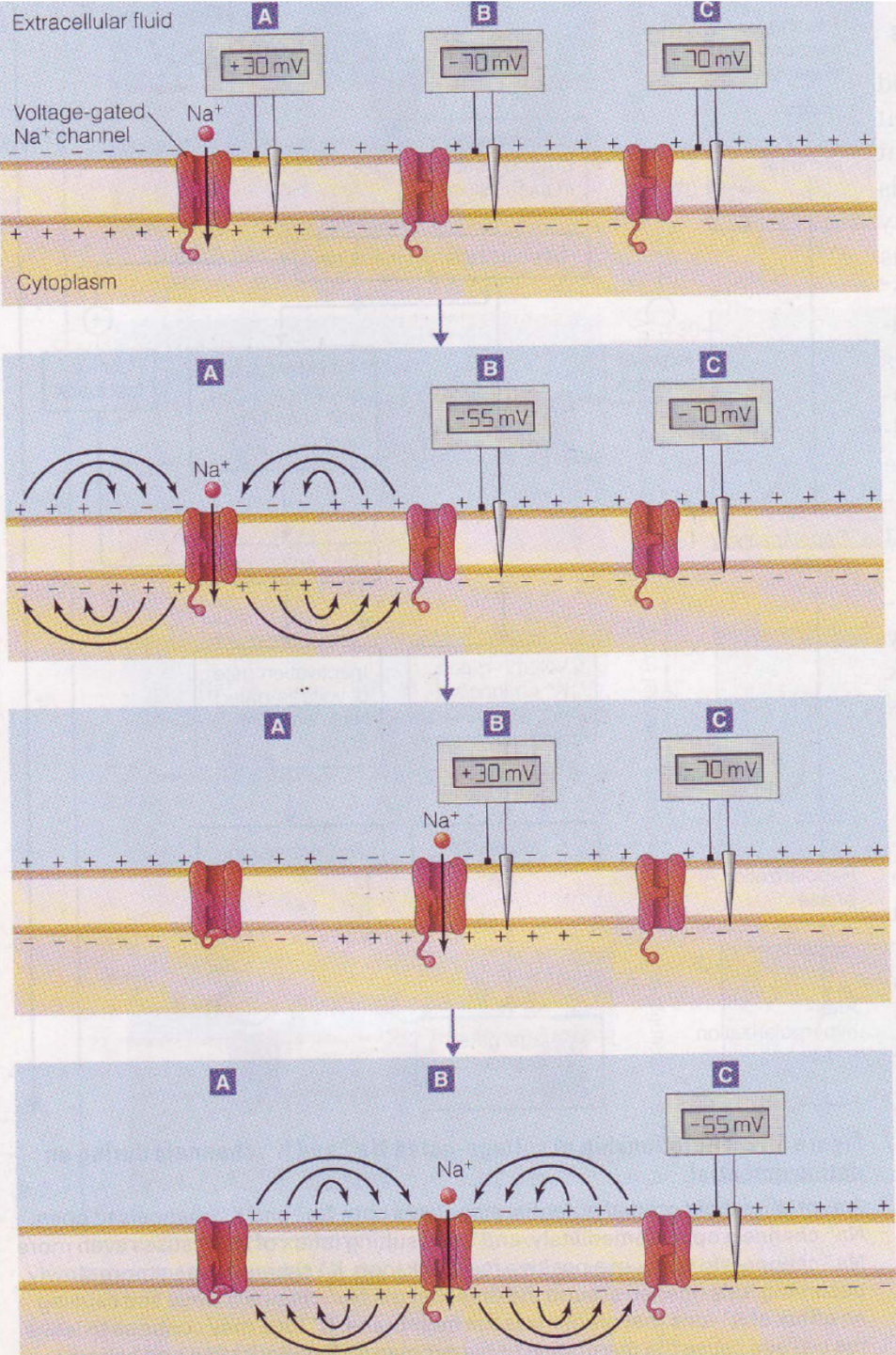
| Li <sup>+</sup> | Na <sup>+</sup> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | K <sup>+</sup> | Rb <sup>+</sup> | Cs <sup>+</sup> |
|-----------------|-----------------|------------------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1,1             | 1,0             | 0,27                         | 0,1              | 0,083          | 0,025           | 0,016           |

- Spannungs-Sensor

# Weiterleitung des Aktionspotentials



- Aktionspotential durch Ionen-einstrom
- Aktionspotential depolarisiert benachbarte Membranregionen
  - Auslösung des zweiten Aktionspotentials
  - An der Stelle des ersten Aktionspotentials Repolarisations des Aktionspotentials durch K<sup>+</sup>-Ausstrom
- Auslösung eines dritten Aktionspotentials
- Nervenimpulse über das gesamte Axon





"The great expectations for DDT have been realized. During 1946 exhaustive tests have shown that when properly used... **DDT is a benefactor of all humanity.**"

TIME Magazine  
June 1947

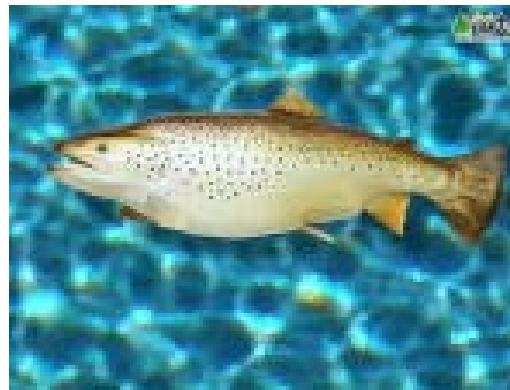
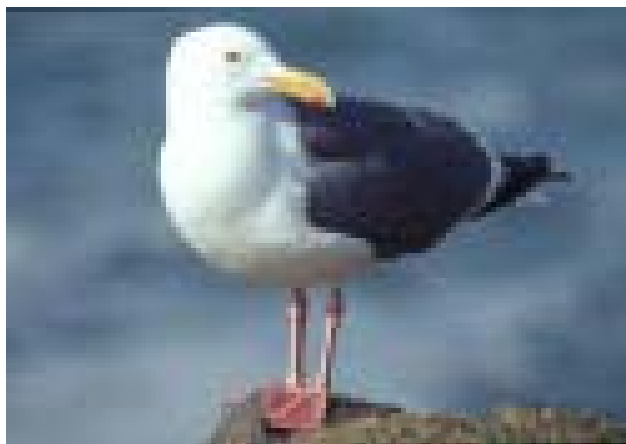
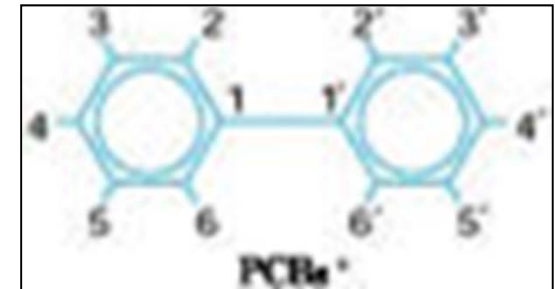
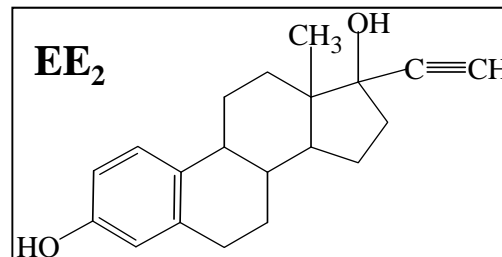
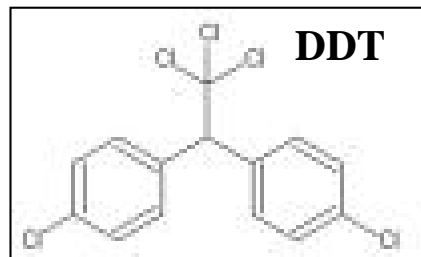
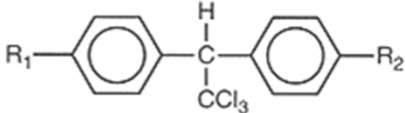
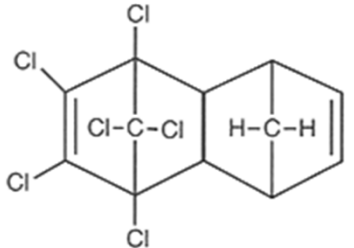
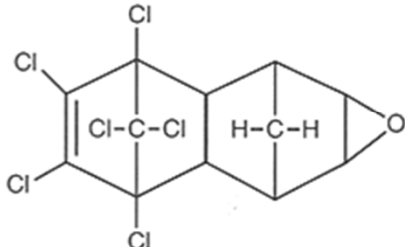
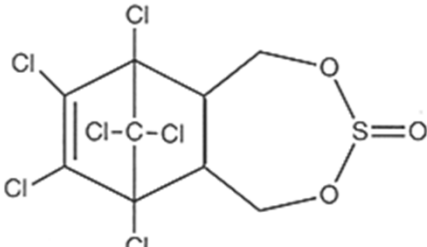
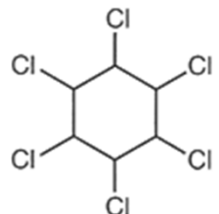


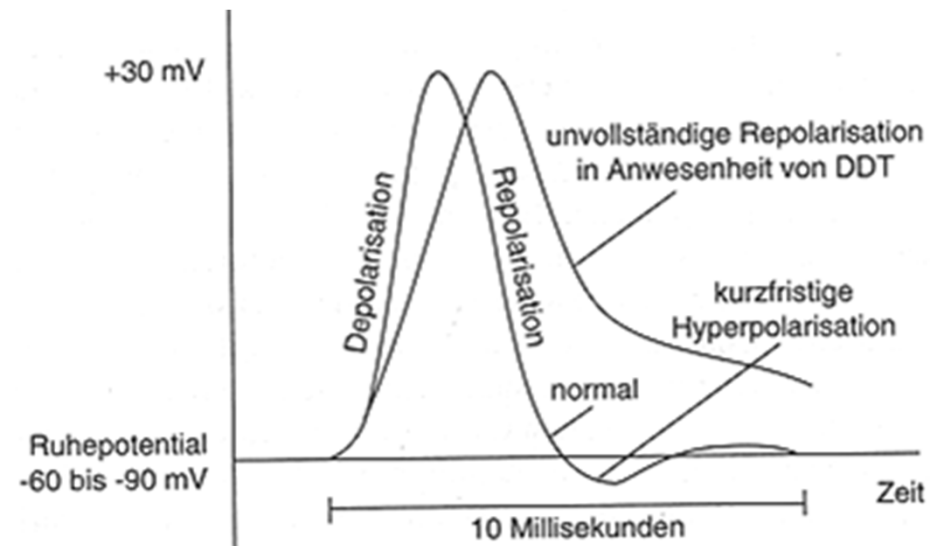


Tabelle 8.12: Strukturelle Klassifikation der Organochlorinsektizide

| Gruppe                 | Strukturformel                                                                      | Beispiele: chemische Bezeichnung (Freiname)                                                                                                                                                                 |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Diphenyltrichlorethane |    | R <sub>1</sub> = R <sub>2</sub> = Cl: <i>p,p'</i> -Dichlorodiphenyltrichlorethan (DDT)*;<br>R <sub>1</sub> = R <sub>2</sub> = OCH <sub>3</sub> : <i>p,p'</i> -Dimethoxydiphenyltrichlorethan (Methoxychlor) |
| Cyclodiene             |    | Hexachlor-hexahydro-endo-exo-dimethanonaphthalin (Aldrin)*                                                                                                                                                  |
|                        |    | Hexachlor-epoxy-octahydro-endo-exo-dimethanonaphthalin (Dieldrin)*                                                                                                                                          |
|                        |   | Hexachlor-endomethylenbicyclohepten-bis(oxy-methylen-)sulfoxid (Endosulfan)*                                                                                                                                |
| Cyclohexane            |  | Hexachlorcyclohexan (Lindan)                                                                                                                                                                                |

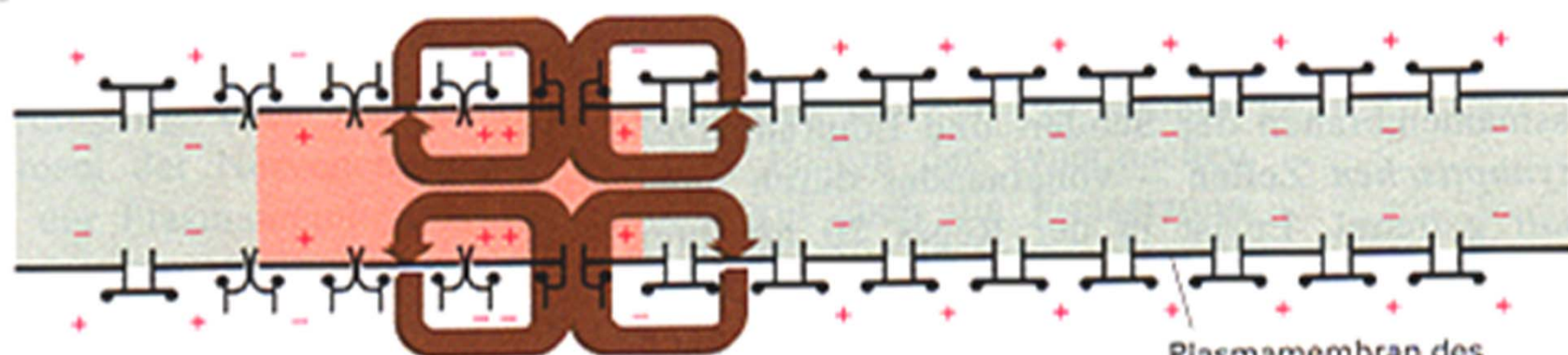
\* In der Bundesrepublik Deutschland nicht mehr zugelassen.

# Neuronale Wirkungen von Organochlor-Insektiziden



Na<sup>+</sup>-Kanäle

geschlossen inaktiviert offen geschlossen



Membran

repolarisiert

depolarisiert

ruhend

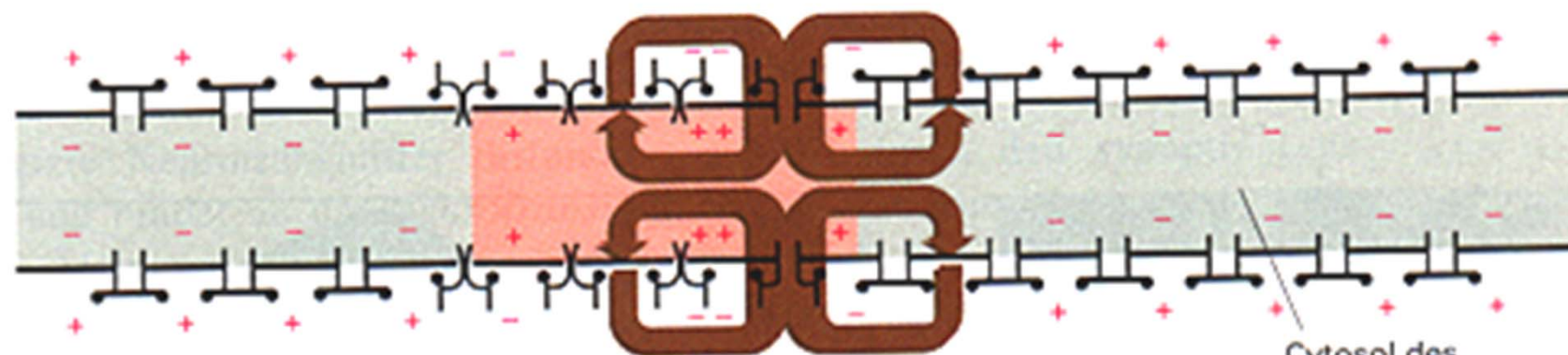
Plasmamembran des Axons

Momentaufnahme bei  $t = 1$  ms

Ausbreitung

Na<sup>+</sup>-Kanäle

geschlossen inaktiviert offen geschlossen



Membran

repolarisiert

depolarisiert

ruhend

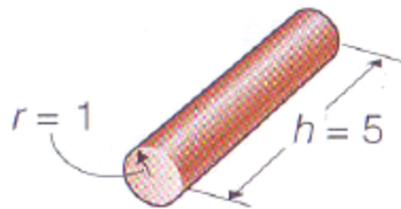
Cytosol des Axons

# Axondurchmesser und Leitungsgeschwindigkeit

$$\lambda = \sqrt{R_m/R_i}$$

$$R_m \propto \frac{1}{2\pi r h}$$

$$R_i \propto \frac{1}{\pi r^2 h}$$



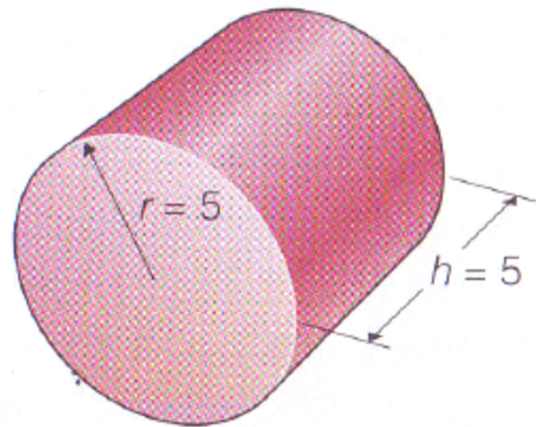
$$R_m \propto \frac{1}{2\pi \times 1 \times 5} = \frac{1}{10\pi}$$

$$R_i \propto \frac{1}{\pi \times 1 \times 1 \times 5} = \frac{1}{5\pi}$$

$$\lambda \propto \sqrt{\frac{5\pi}{10\pi}}$$

$$\lambda \propto \sqrt{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda \propto 0.7$$



$$R_m \propto \frac{1}{2\pi \times 5 \times 5} = \frac{1}{50\pi}$$

$$R_i \propto \frac{1}{\pi \times 5 \times 5 \times 5} = \frac{1}{125\pi}$$

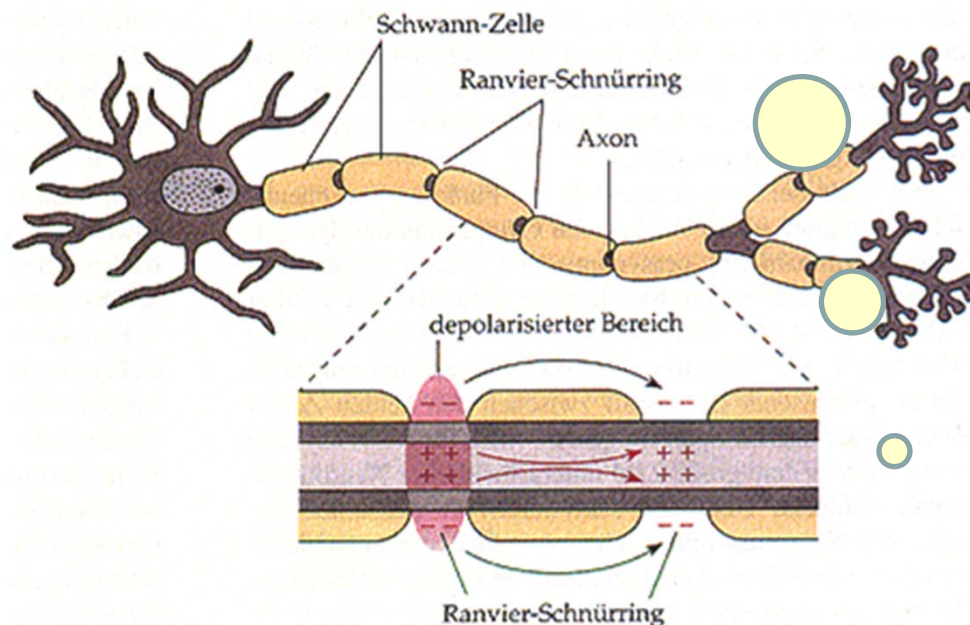
$$\lambda \propto \sqrt{\frac{125\pi}{50\pi}}$$

$$\lambda \propto \sqrt{2.5}$$

$$\lambda \propto 1.6$$

# Saltatorische Fortleitung in myelinisierten Axonen

- Hyperpolarisation und Weiterleitung des Aktionspotentials
- Leitungsgeschwindigkeit
  - Axon Querschnitt
  - Myelinisierung

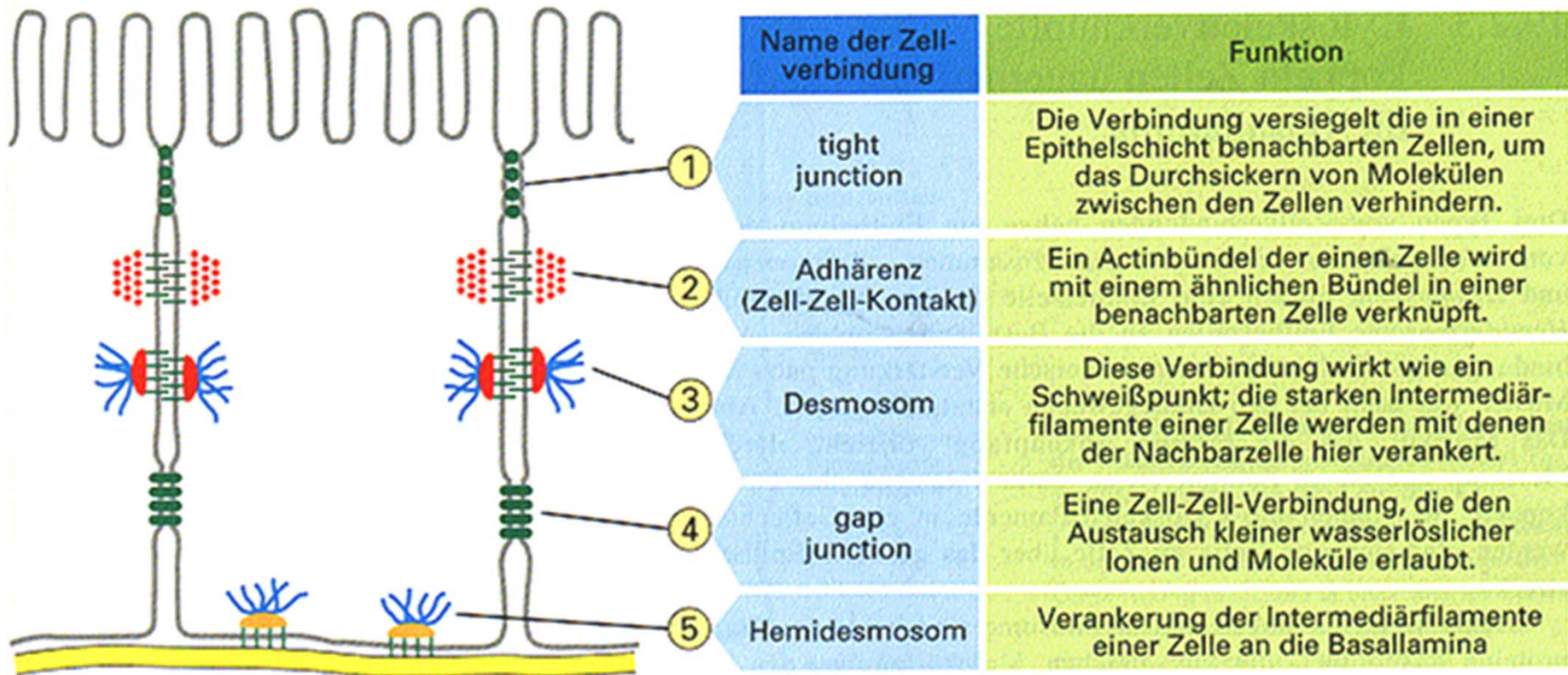


- Ranvier-Schnürring
- Springen des Aktionspotentials
- Erheblich höhere Fortpflanzungsgeschwindigkeit
  - Abstand 2 mm

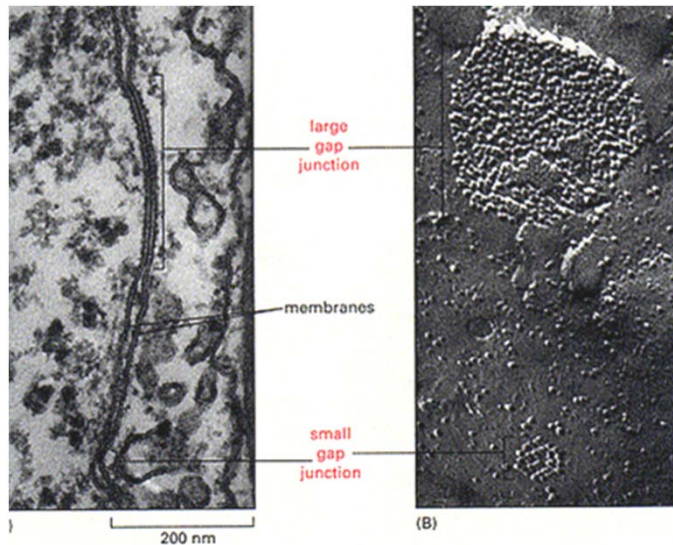
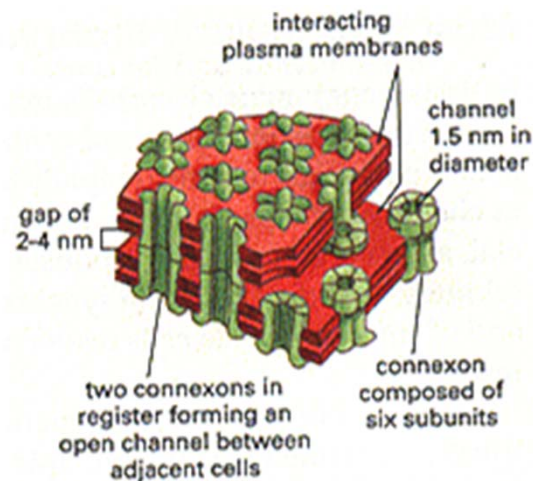
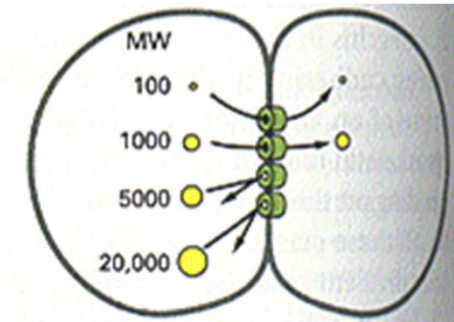
# Chemische und elektrische Signalübertragung - Synapse

- Elektrische Synapse
  - direkter Übergang des Aktionspotentials
  - Gap Junctions
- Chemische Synapse
  - Keine direkte Kopplung der Zellen
  - Trennung durch dünnen synaptischen Spalt
  - Neurotransmitter

# Zelluläre Verbindungen



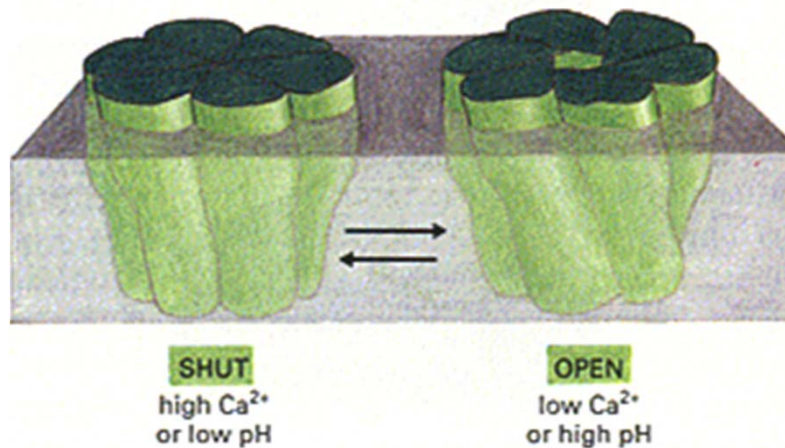
# Gap Junctions



- Zelluläre Verbindungen zum Austausch niedermolekularer Stoffe
- Gap Junctions sind aus Connexonen aufgebaut
- Connexone sind aus 6 identischen Proteinen, Connexinen, aufgebaut
- In der Ratte sind 11 verschiedene Connexin-Gene bekannt
- In der frühen Embryogenese sind die meisten Zellen per Gap Junctions gekoppelt, gilt besonders für elektrisch gekoppelte Zellen

# Durchlässigkeit von Gap Junctions ist reguliert

Achtung: Gap Junction und seine Funktionen!



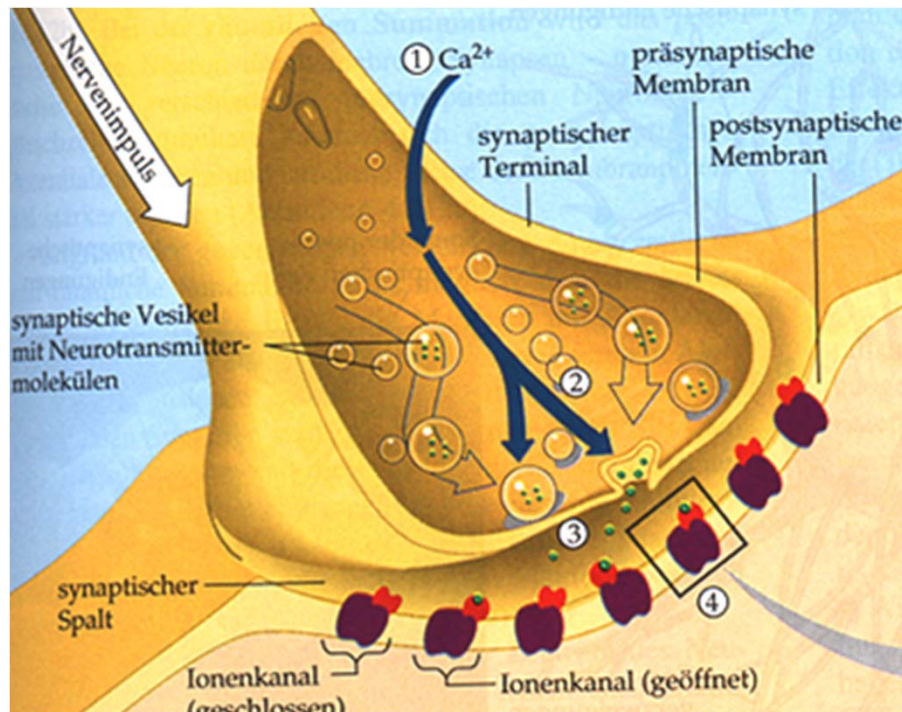
- **Erniedrigung der Durchlässigkeit**
  - pH im Zytosol  $\downarrow\downarrow$
  - $\text{Ca}^{2+}$  im Zytosol  $\uparrow\uparrow$
- **Reversible Konformationsänderungen**



# Chemische und elektrische Signalübertragung - Synapse

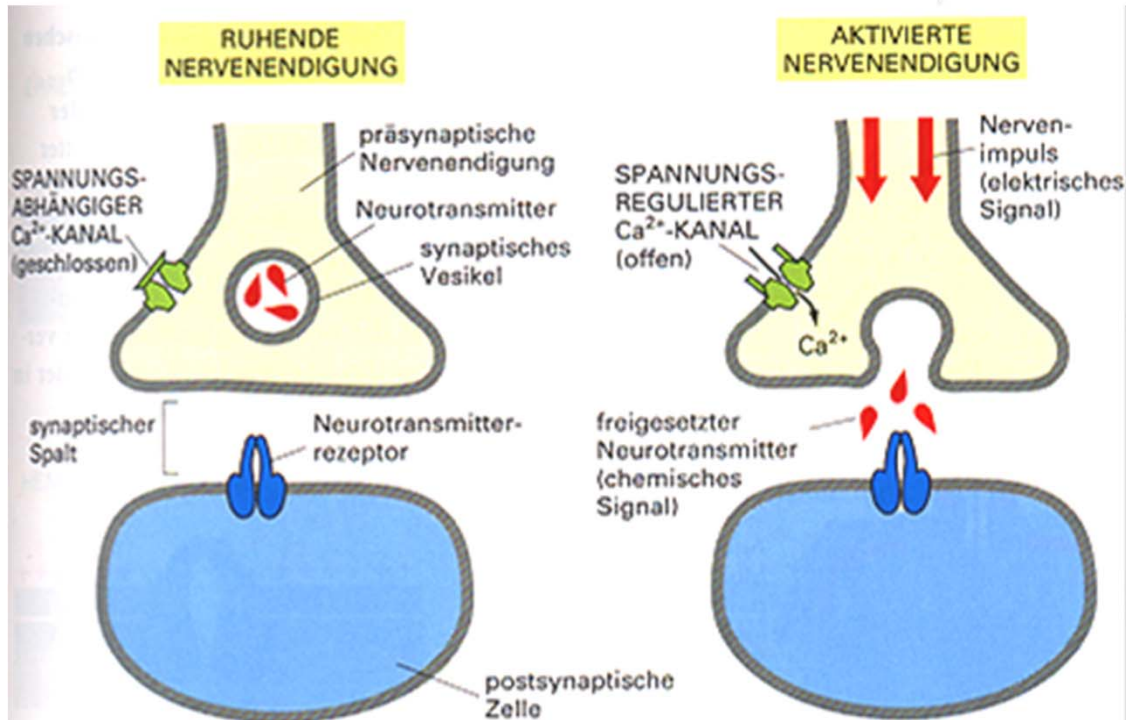
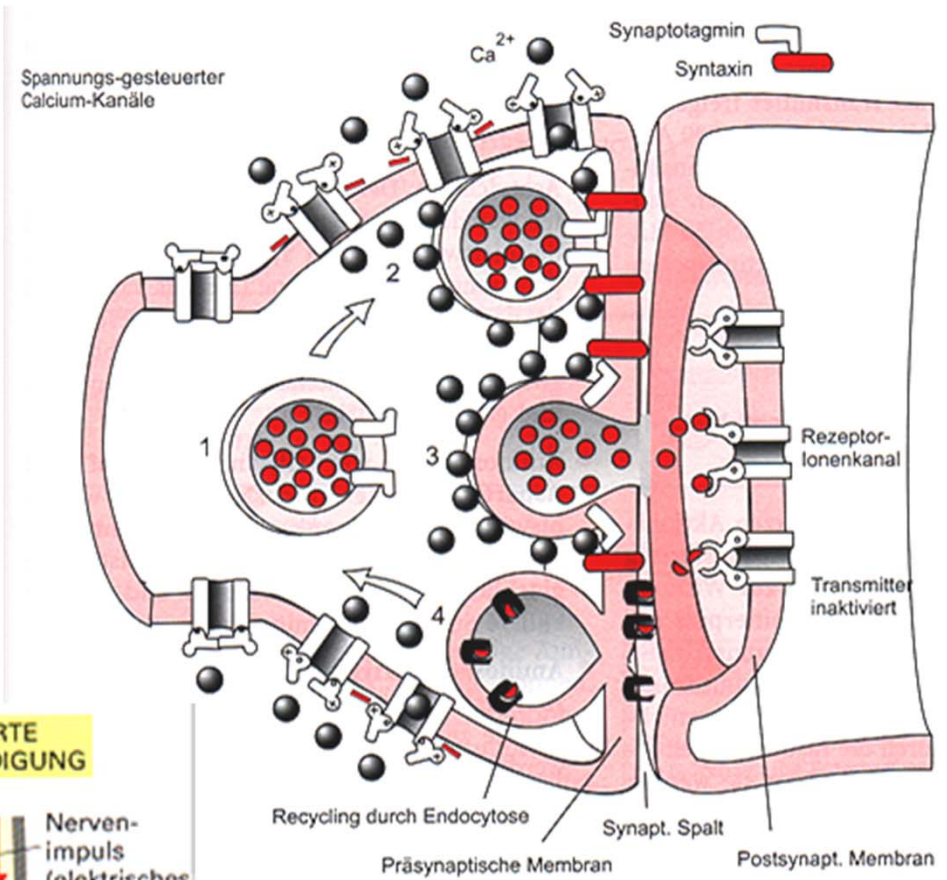
- Elektrische Synapse
  - direkter Übergang des Aktionspotentials
  - Gap Junctions
- Chemische Synapse
  - Keine direkte Kopplung der Zellen
  - Trennung durch dünnen synaptischen Spalt
  - Neurotransmitter

# Chemische Synapse

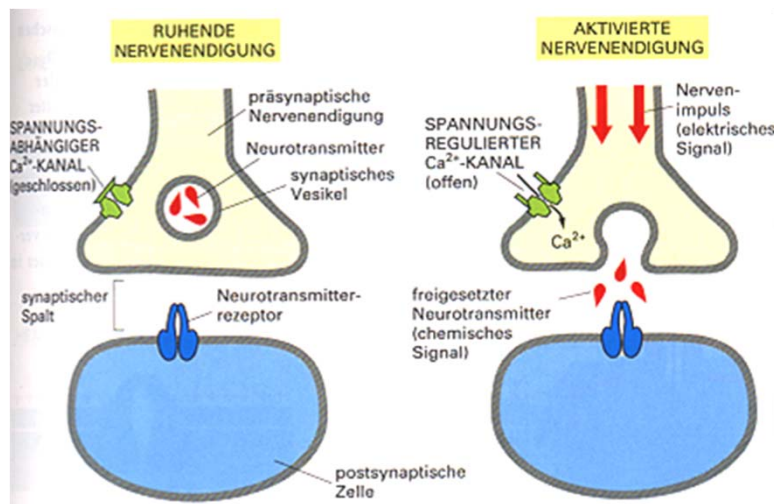


- Endköpfchen (Synaptisches Terminal) => präsynaptische Membran
- Präsynaptische Vesikel => Neurotransmitter
- Synaptischer Spalt
- Postsynaptische Membran

# Chemische Synapse – Präsynaptische Membran

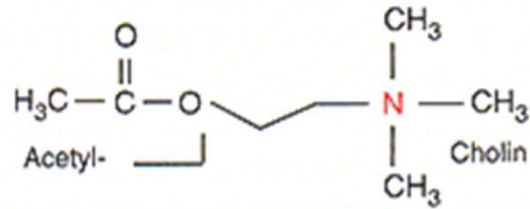


# Chemische Synapse – Präsynaptische Membran

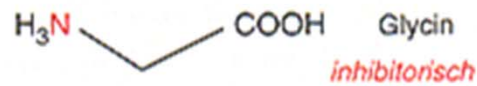
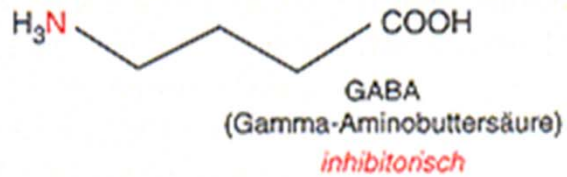
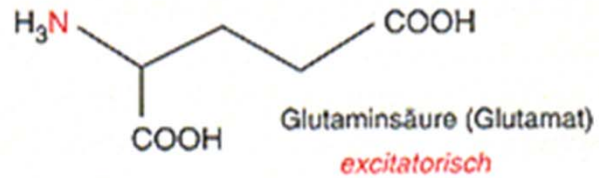


- Aktionspotential erreicht Ende des Axons
- Öffnung spannungsgesteuerter  $\text{Ca}^{2+}$ -Kanäle
- Anstieg von  $[\text{Ca}^{2+}]_i$
- $\text{Ca}^{2+}$ -bedingtes Verschmelzen von Neurotransmitter gefüllten Vesikeln mit der Membran
- Gequantelte Freisetzung von Neurotransmittern

### Acetylcholin



### Aminosäuren



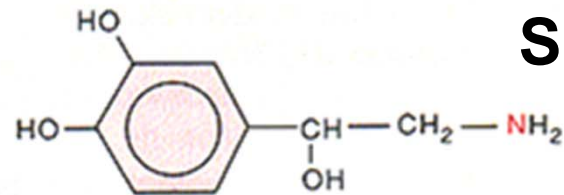
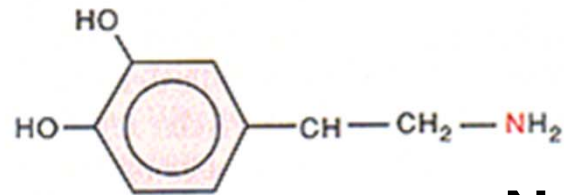
### Peptide

Zahlreich, u.a. Enkephaline, Substanz P

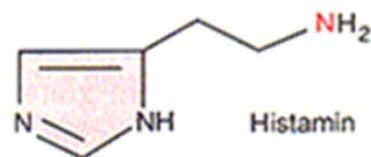
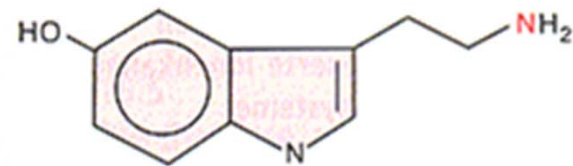
### ATP

### Monoamine

Catecholamine, aus Tyrosin:

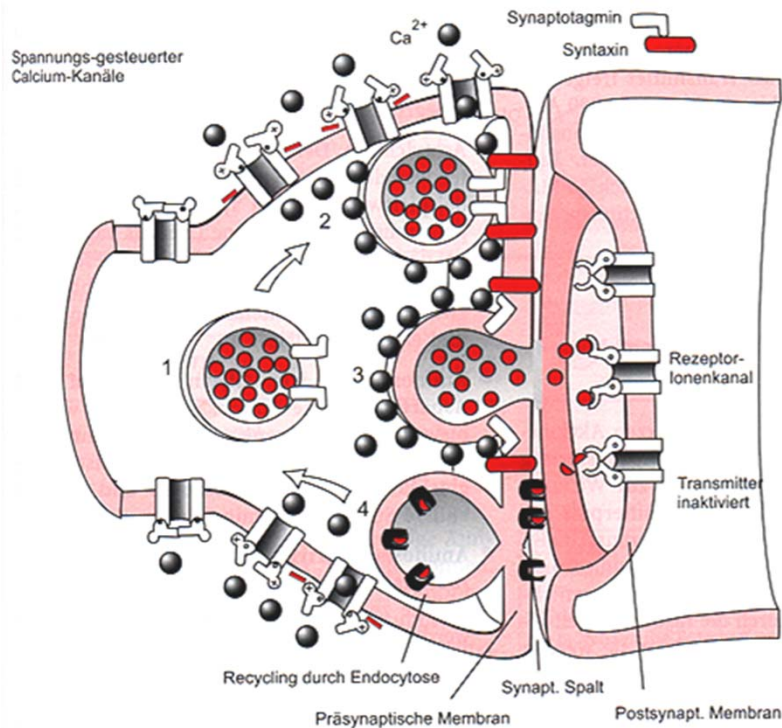


Aus Tryptophan:



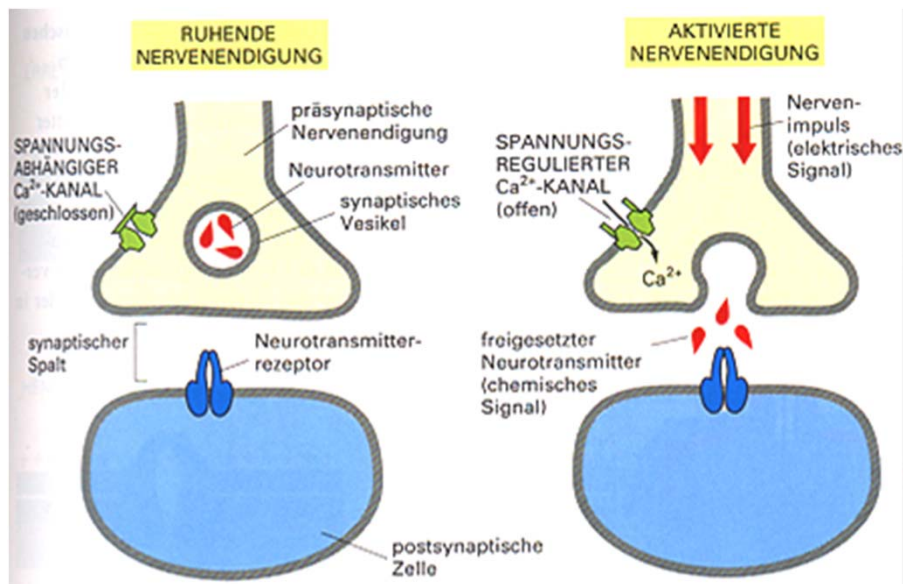
## Neurotransmitter - ausgewählte Substanzklassen

# Synaptischer Spalt



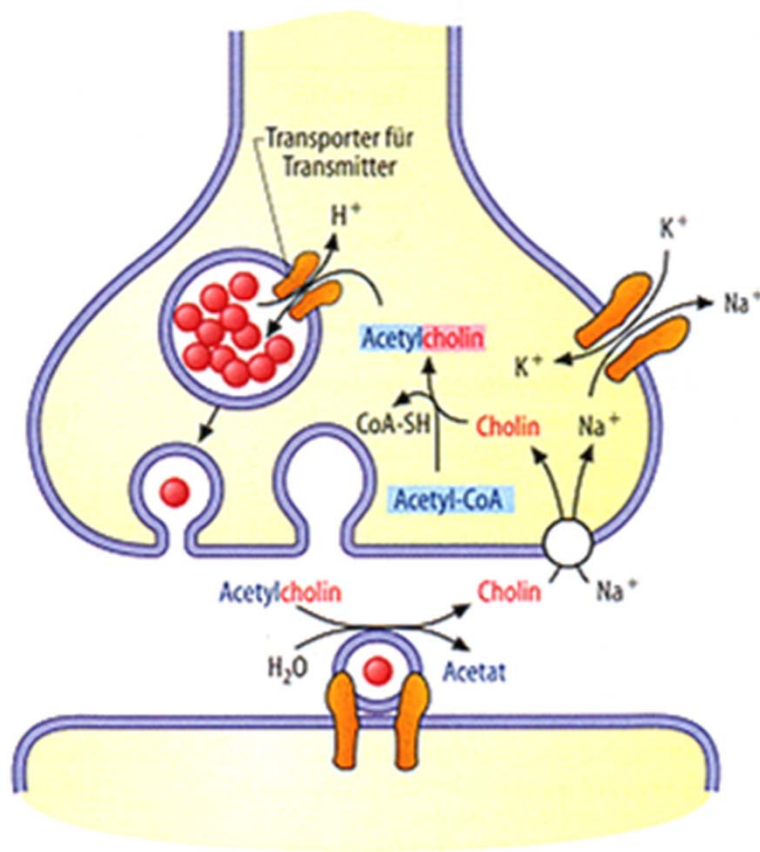
- Vorübergehende Konzentration des Neurotransmitters > 1mM

# Postsynaptische Membran



- Bindung an den Neurotransmitter Rezeptor
- Öffnung ligandenabhängiger Kanäle
- **Aktivierung:** Generierung eines Aktionspotentials
- **Inaktivierung:** Hyperpolarisation der Zelle

# Inaktivierung des Signals



- Enzymatische Inaktivierung (Spaltung) des Neurotransmitters
- Wiederaufnahme in die Zelle und Regenerierung des aktiven Transmitters

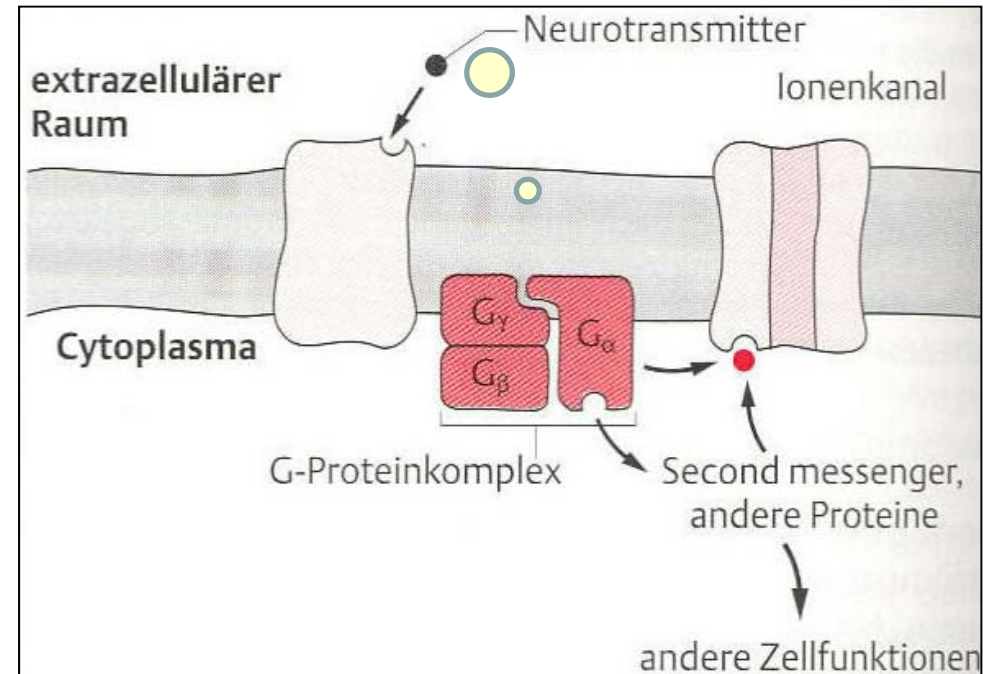
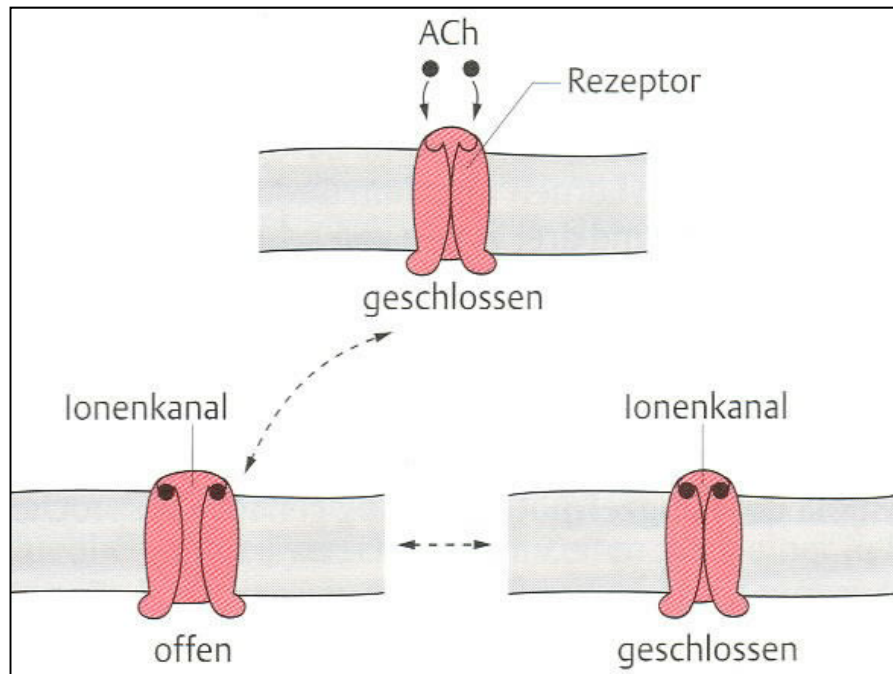


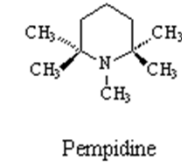
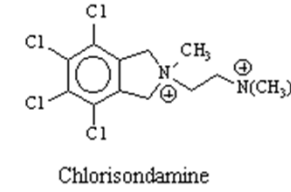
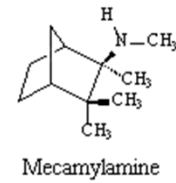
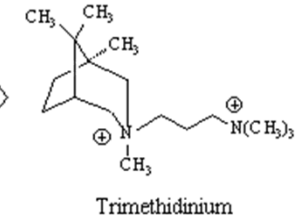
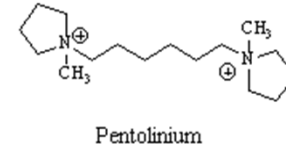
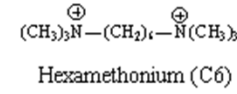
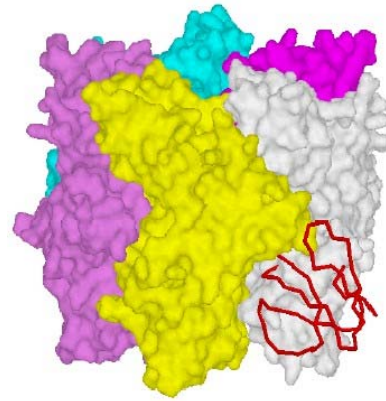
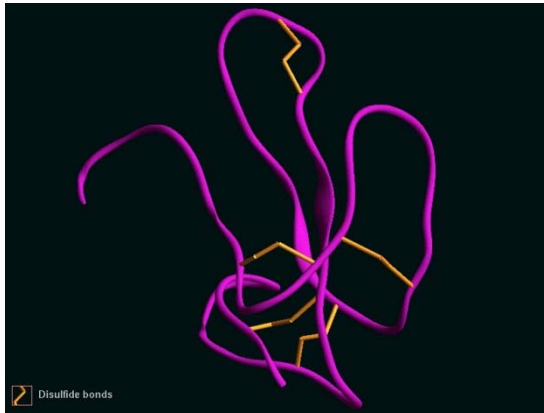
# Acetylcholinrezeptoren

Zweites Beispiel für ein inhibitorisches G-Protein. Addieren Sie dies zu Ihrer Beispielliste!

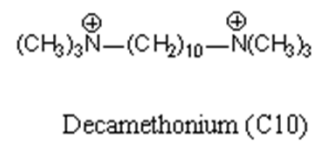
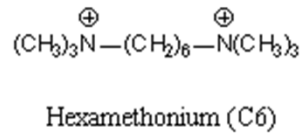
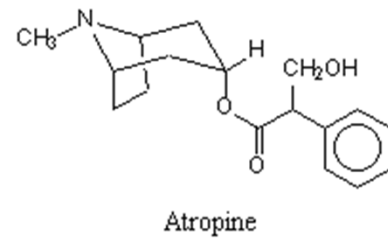
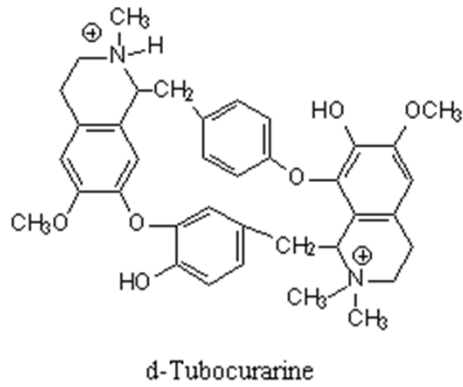
„Schnelle“ nicotinerge  
Transmission

„langsame“ muscarinerge  
Transmission





## Nicotinische Antagonisten

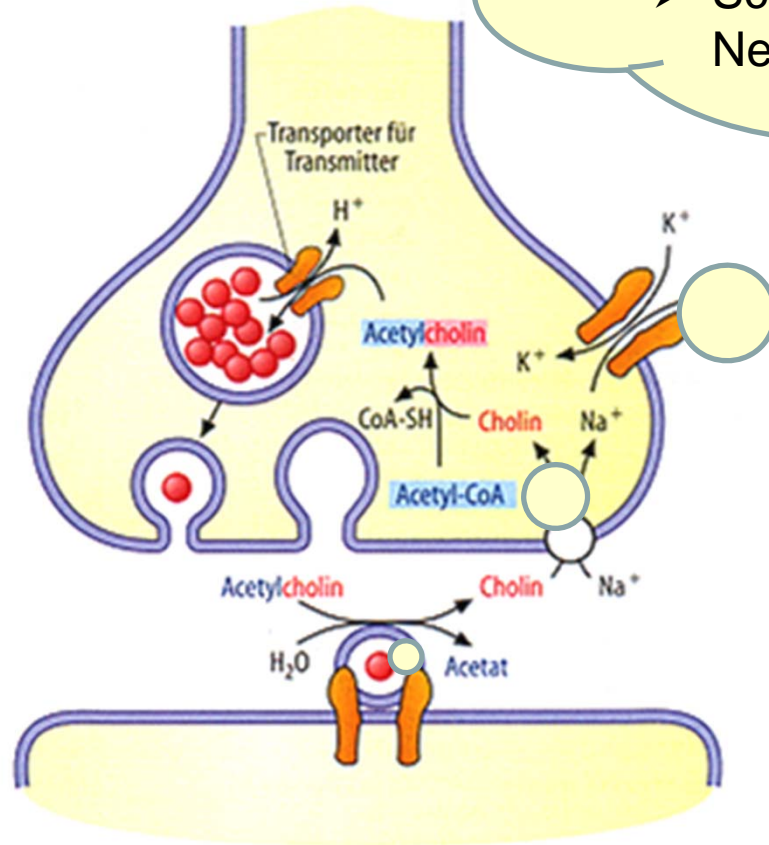


## Neuromuskular aktive Substanzen

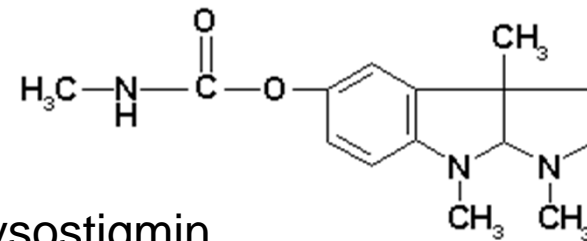
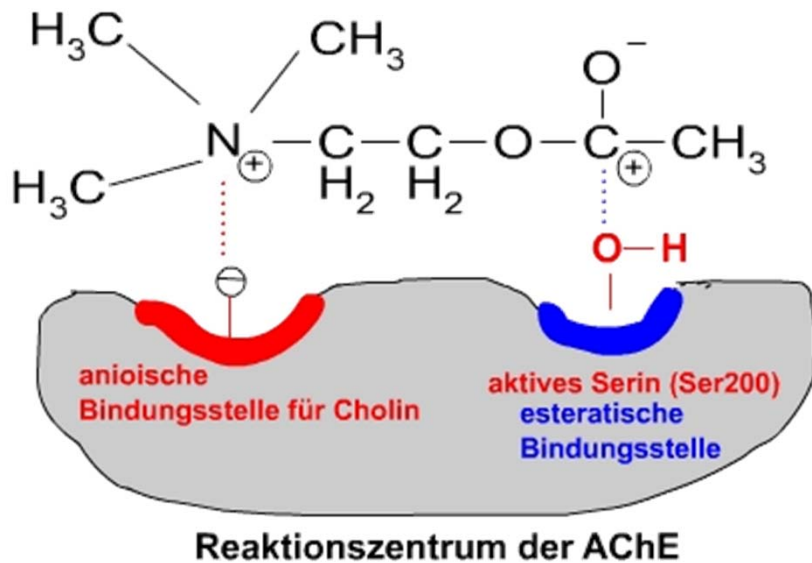
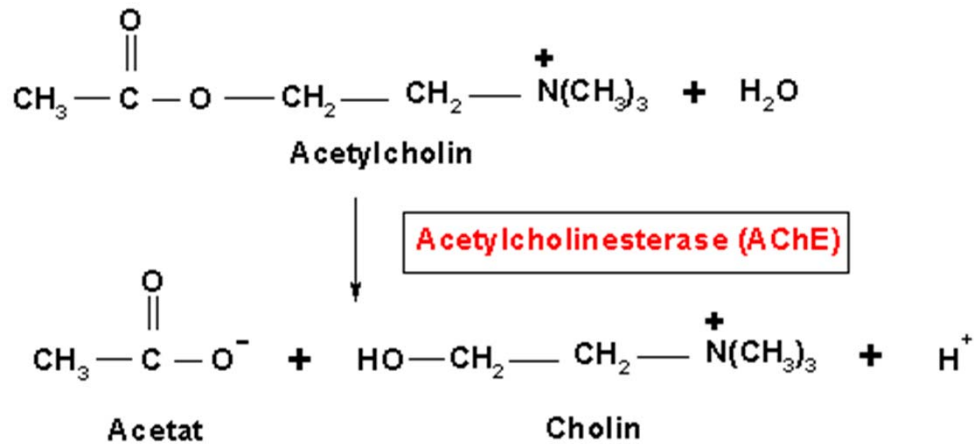
# Inaktivierung des Signals

## Synapse

- Physiologie präsynaptische Membran
- Synaptischer Spalt, Neurotransmitter
- Postsynaptische Membran
- Schnelle Inaktivierung des Neurotransmitters



- Enzymatische Inaktivierung (Spaltung) des Neurotransmitters
- Wiederaufnahme in die Zelle und Regenerierung des aktiven Transmitters

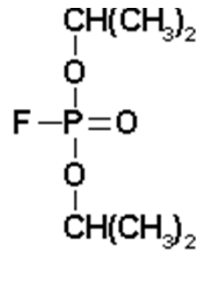


Physostigmin

Reversibler Inhibitor: indirekt wirkendes Parasympathomimetikum; Wirkung zunächst an Muscarinrezeptoren; Wirkung auch im ZNS; Bei Vergiftung: extreme Bradykardie, Blutdrucksenkung, Lähmung der quer gestreiften Muskulatur; Wirkungsmechanismus: Reversible Hemmstoffe der Cholinesterase. Therapeutische Verwendung: Lokale Anwendung am Auge bei Glaukom

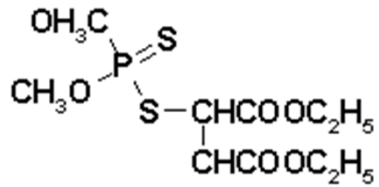
AChE = Actylcholinesterase

# Organophosphate – Pestizide und Kriegsspielzeuge



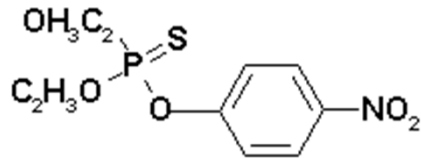
Diisopropylfluorophosphat (DIFP)

Irreversibler Inhibitor. Wird zum Nachweis aktiver Serinreste bei Enzymen verwendet.



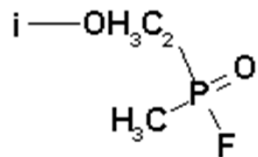
Malathion

Irreversibler Inhibitor. Weit verbreitetes Insektizid. Sicherer als Parathion, weil es schneller abgebaut werden kann.



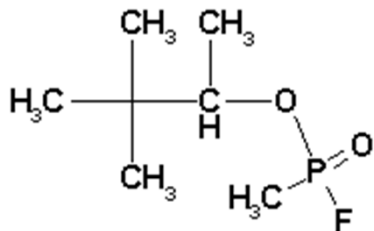
Parathion

Irreversibler Inhibitor. Insektizid. Wird wegen Vergiftungsfällen zunehmend weniger oft verwendet.



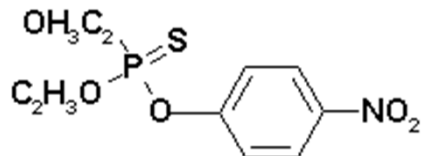
Sarin

Irreversibler Inhibitor. Hochtoxisches Nervengas!



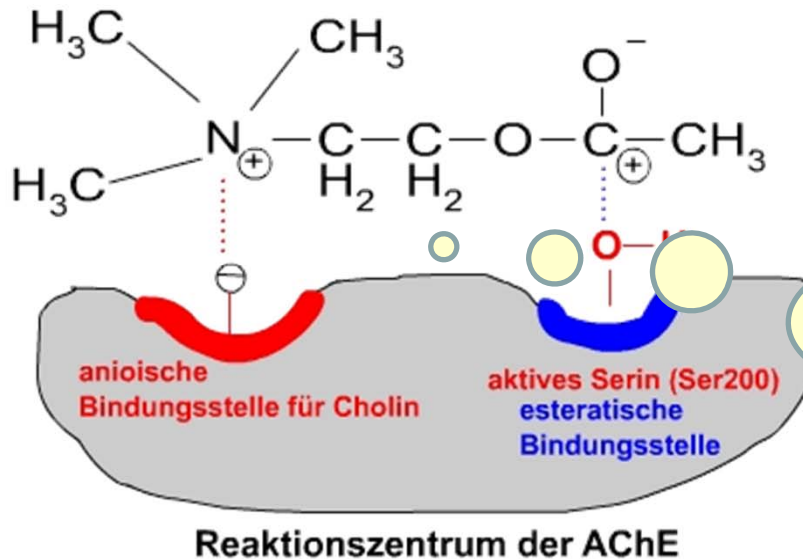
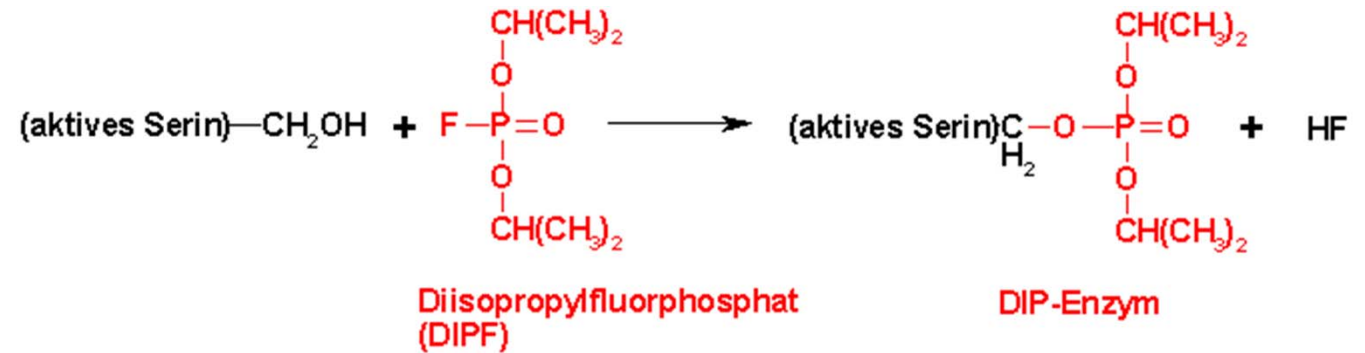
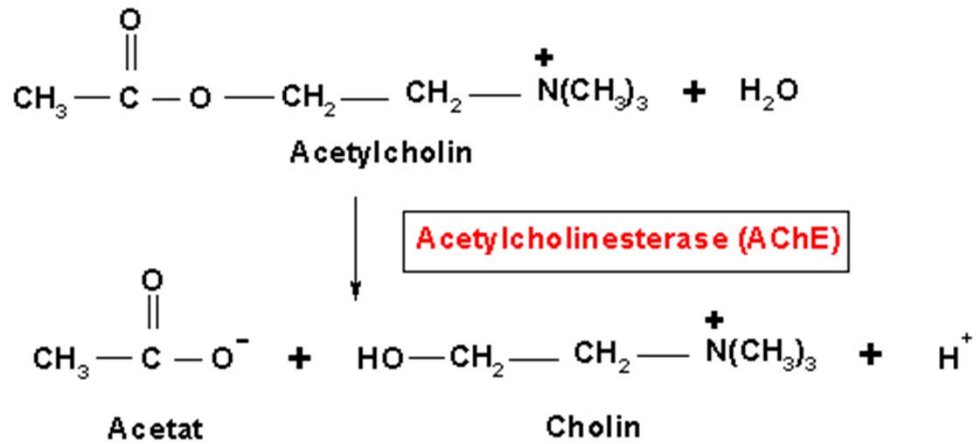
Soman

Irreversibler Inhibitor. Hochtoxisches Nervengas!



Tabun

Irreversibler Inhibitor. Hochtoxisches Nervengas!



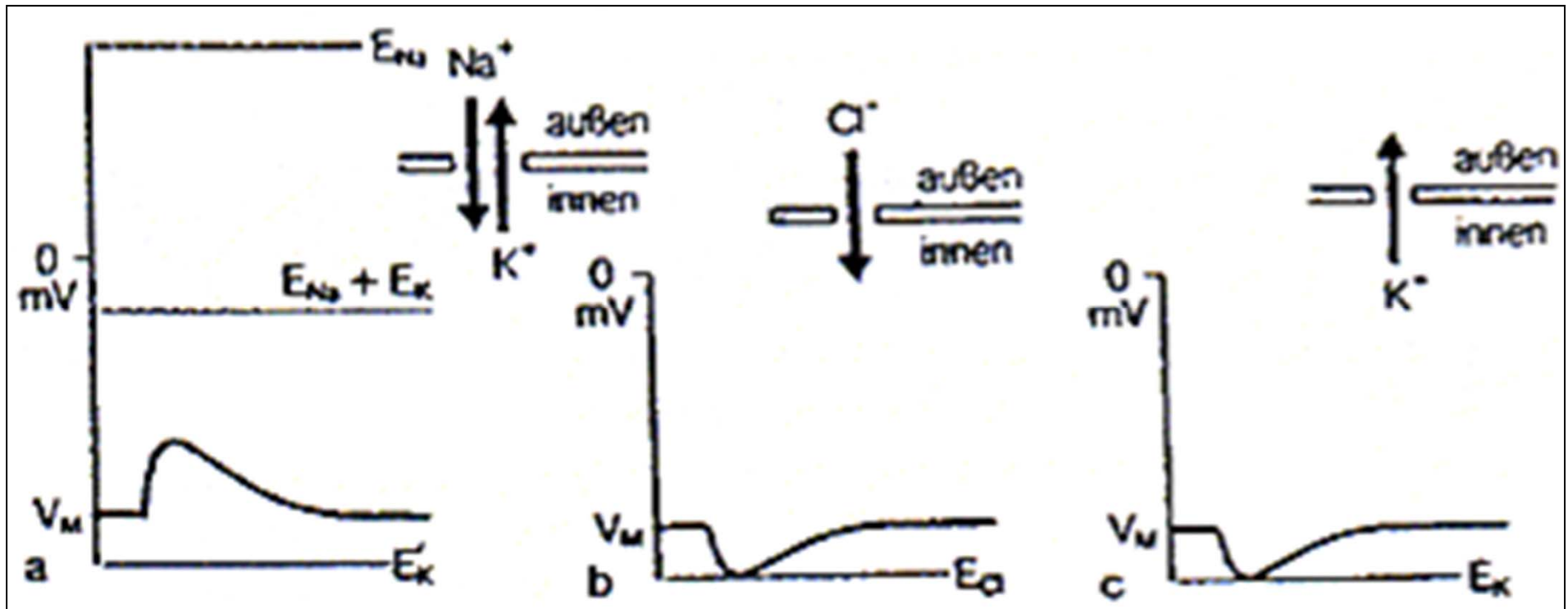
Acetylcholinesterase  
 Therapie: Reversible Inhibition  
 Toxizität: Irreversible Inhibition

# Verschiedene Typen von Synapsen

AChR

Glycin  
GABA

AChR  
Herz



# Chemische synaptische Übertragung

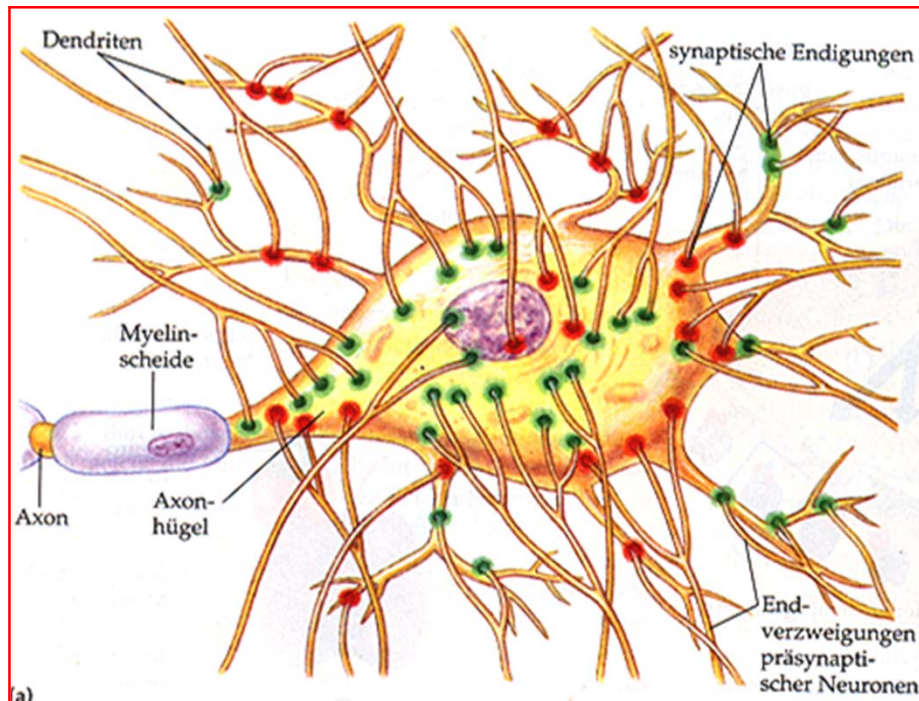
- Bei der chemischen synaptischen Übertragung vermittelt ein von der prä-synaptischen zur postsynaptischen Zelle diffundierender Überträgerstoff die Information
- An der motorischen Endplatte des Muskels löst Erregung des motorischen Axons durch Ausschüttung von Acetylcholin ein Endplattenpotential aus
- Synaptische Hemmung verhindert Erregung durch Erhöhung der  $K^+$ - oder  $Cl^-$ -Permeabilität
- Die synaptischen Überträgerstoffe reagieren mit Rezeptoren der post-synaptischen Membranen. Diese sind an Kanalmoleküle gekoppelt, die entweder für  $Na^+$  und  $Ca^{2+}$  (erregend) oder für  $K^+$  oder  $Cl^-$  (hemmend) öffnen.
- Die Mannigfaltigkeit der synaptischen Überträgerstoffe ermöglicht das Zusammenwirken verschiedener spezifischer Funktionskreise in einer Zelle oder in Zellverbänden. Die chemischen Überträgerstoffe sind Angriffspunkte pharmakologischer Einwirkungen auf die Synapsen und das Nervensystem.



# Mikrophysiologie der chemischen synaptischen Übertragung

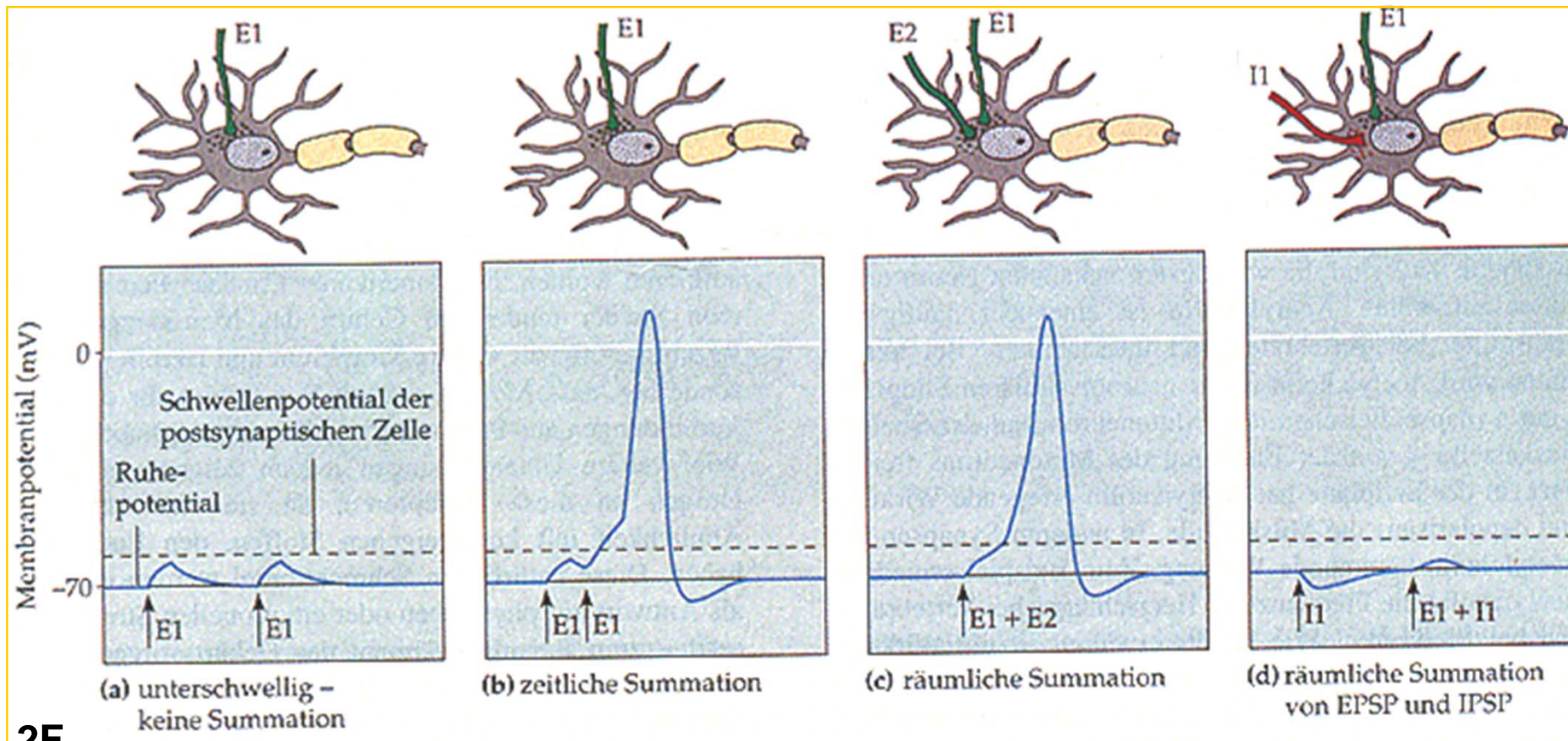
- Überträgerstoffe sind in den Nervenendigungen in Vesikeln gespeichert und werden nach Depolarisation durch Exozytose von Vesikeln freigesetzt. Den Vesikeln entsprechen „Quanten“ des postsynaptischen Stroms oder Potentials.
- Die Ausschüttung von Überträgerstoffvesikeln wird durch Depolarisation der präsynaptischen Membran,  $\text{Ca}^{2+}$ -Einstrom und Erhöhung der  $\text{Ca}^{2+}$ -Konzentration in der Nervenendigung verursacht.
- Die Überträgerstoffkonzentration erreicht bei klassischen Überträgerstoffen im synaptischen Spalt Werte über 1 mmol/l. Der Überträgerstoff reagiert mit postsynaptischen Rezeptoren und öffnet Membrankanäle.

# Signalverarbeitung



- Exzitatorische Synapse
  - Depolarisierung
  - Eregendes postsynaptisches Potential (EPSP)
- Inhibitorische Synapse
  - Hyperpolarisierung
  - Inhibitorisches postsynaptisches Potential (IPSP)
- Amplitudenmodulierung
  - Anzahl der Transmittermoleküle

# Summation postsynaptischer Potentiale



# Synapsen als Recheneinheiten (1)

- **Zwei Nervenzellen sind durch eine Synapse verbunden  
=> drei Grundtypen der Erregungsübertragung**
  - 1:1 Synapsen: Ein Impuls in der Prä-Faser löst einen Impuls in der Post-Faser aus.
  - 1:n Synapsen, sog. „multiplizierende“ Synapsen: Ein Impuls in der Prä-Faser löst mehrere Impulse in der Post-Faser aus (räumliche Bahnung)
  - n:1 Synapsen, sog. „integrierende“ Synapsen: Erst mehrere Impulse der Prä-Faser lösen einen Impuls in der Post-Faser aus (zeitliche Bahnung)

# Synapsen als Recheneinheiten (2)

- Eine postsynaptische Zelle mit nur zwei Prä-Fasern  $e_1$  und  $e_2$  kann schon einfache logische Entscheidungen fällen
  - 1.  $e_1$  und  $e_2$  sind exzitatorische Synapsen
    - „**oder**“ System: Die Erregung allein von  $e_1$  oder von  $e_2$  führt zur Erregung von  $a$
    - „**und**“ System: Nur die gleichzeitige Erregung von  $e_1$  und  $e_2$  führt zu einer Erregung von  $a$
  - 2.  $e_1$  ist eine exzitatorische und  $e_2$  eine inhibitorische Synapse
    - „**wenn nicht**“ System: Die Erregung von  $e_1$  führt nur zur Erregung von  $a$  wenn nicht  $e_2$  gleichzeitig erregt ist.

- Beschreiben Sie den Aufbau einer Zelloberflächenmembran makroskopisch und molekular!
- Was besagt das 1. Fick'sche Gesetz?
- Was kann aus der Löslichkeit einer chemischen Substanz in Wasser für ihre vermutliche Durchgängigkeit durch biologische Membranen abgeleitet werden? Wie gut ist die Durchlässigkeit biologischer Membranen für Ionen?
- Mit Hilfe welcher Makromoleküle kommen hydrophile Substanzen bzw. Ionen durch bzw. über biologische Membranen?
- Was sind Gap Junctions, beschreiben Sie ihre Funktion?
- Nennen Sie die Grundelemente des Nervensystems und deren Funktion innerhalb des Nervensystems!
- Wie ist eine Nervenzelle aufgebaut?

- Welche Ionen sind für die elektrische Signalübertragung von Bedeutung?
- Wie ist deren intra- und extrazelluläre Verteilung?
- Mit Hilfe welcher Molekülgruppen kommen Ionen über eine Zelloberflächenmembran.
- Was ist ein Aktionspotential?
- Welche Ionenkanäle sind für das Zustandekommen eines Aktionspotentials von Bedeutung? Beschreiben Sie deren Öffnungszustand in Abhängigkeit der Phase des Aktionspotentials?
- Welche Faktoren kennen Sie, die die Geschwindigkeit der elektrischen Reizleitung determinieren?
- Welche Möglichkeiten der Signalübertragung zwischen zwei Nervenzellen kennen Sie?
- Welche Zellmembranstruktur spielt für die elektrische Signalübertragung eine bedeutende Rolle? Beschreiben Sie den Aufbau dieser Zellmembranstruktur!
- Was ist eine Synapse? Beschreiben Sie die Vorgänge an der prä- und postsynaptischen Membran im Zusammenhang mit der chemischen Weiterleitung neuronaler Reize!
- Welche Typen von Synapsen gibt es und welche Rolle spielen die Gap-Junctions in diesem Zusammenhang?