

# BIOPHYSIK

## 13. Vorlesung

Elektrizitätslehre, EKG  
Magnetismus, Magnetresonanztomographie (MRI)



elektrische Aufladung des Haares



EKG



MRI

1

## Elektrische Ladung



griechisch Elektron (ηλεκτρον) heisst „Bernstein“

Wenn Bernstein mit einem Tuch gerieben wird, *verändert der Zustand* des Bernsteines so, dass er kleine Partikel (z.B. Staub) anzieht – wird er (negativ) geladen.

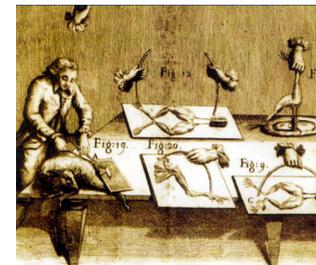
**Ladung:** ist an Materie gebunden, eine wesentliche Eigenschaft der Materie (wie die Schwere/Masse)  
Makroskopische Objekte sind im allgemeinen elektrisch neutral.

3

## Elektrizitätslehre



elektrische Aufladung des Haares



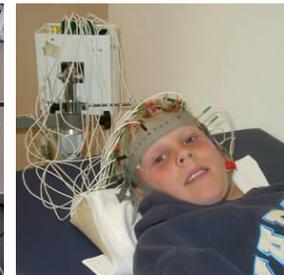
Elektrophysiologische Experimente



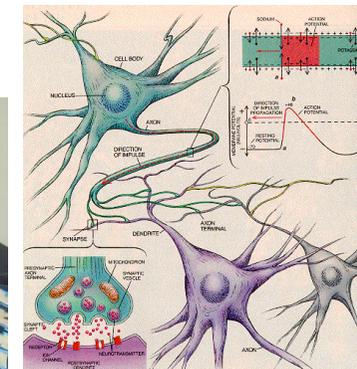
Naturereignis: Blitz



EKG



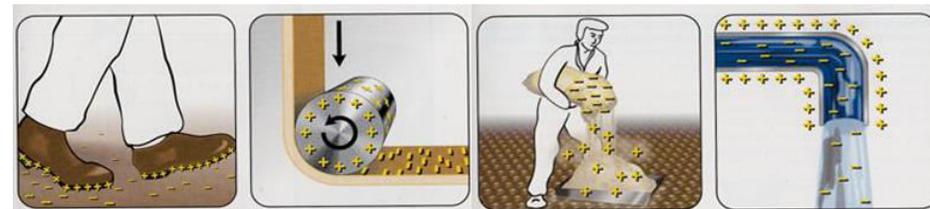
EEG



Neurone leiten Strom

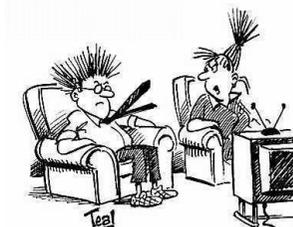
## Ladungstrennung

Die elektrische Ladungen können durch Reibung getrennt werden (statische Elektrizität = Reibungselektrizität).



Durch das Reiben der Schuhsohlen auf dem Bodenbelag lädt man sich elektrostatisch auf.

Nach der Ladungstrennung kommt die Entladung.



"I told you nylon carpets were a mistake."

**Elektronen** sind negativ geladene Elementarteilchen.  
Die elektrische Ladung ist quantisiert und der Betrag der Ladung des Elektrons ( $e^-$ ) ist die Elementarladung ( $e$ ).  
Einheit der Ladung: 1 C (Coulomb) = 1 A·s

$$e^- = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \qquad e = |e^-| = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Faraday-Konstante:

$$F = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 6 \times 10^{23} \text{ 1/mol} = 96500 \text{ C/mol}$$

Ein Wasserstoffatom besteht aus einem Proton und einem Elektron. Das Proton hat die entgegengesetzte Ladung (positiv). (Das Vorzeichen der Ladung ist willkürlich.)

Dufay (1698-1739): zwei Arten von Elektrizität: Glas-Elektrizität und Harz-Elektrizität

Franklin (1706-1790): Positive-Elektrizität und Negative-Elektrizität

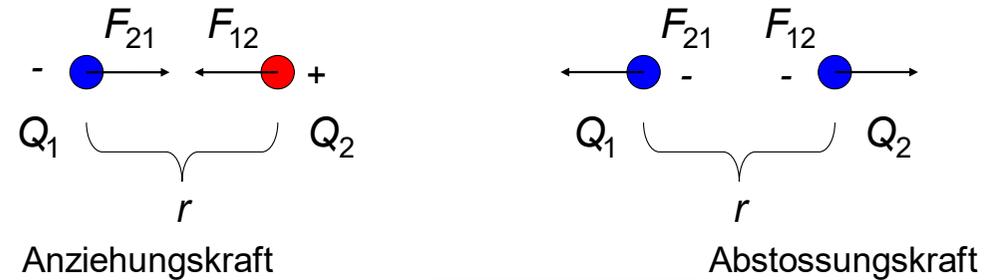
5

Es gibt eine **Wechselwirkung** zwischen der Ladungen.

Ungleichnamige Ladungen ziehen sich an,  
gleichnamige Ladungen stoßen sich ab.

Für die Charakterisierung der Wechselwirkung:

**Kraft**, eine Vektorgröße (Länge und Richtung)



$$F_{12} = F_{21} = F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

6

## Coulomb-Gesetz

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$

= elektrische Feldkonstante (des Vakuums)

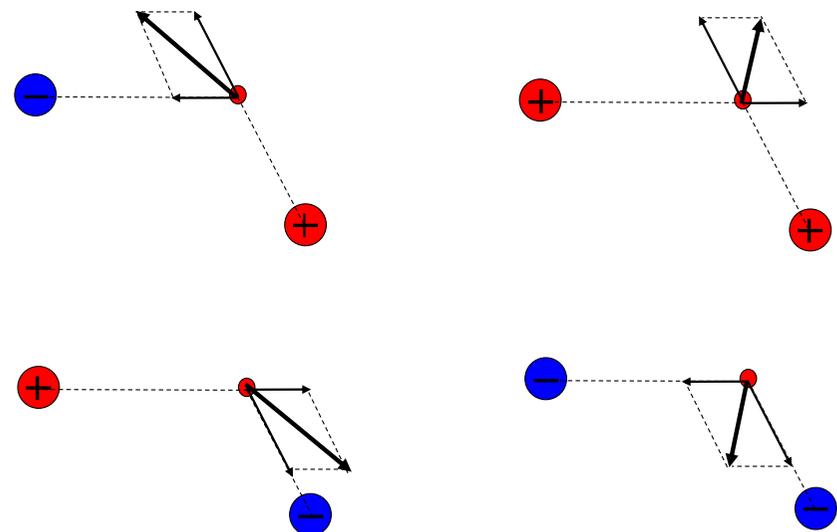
= Dielektrizitätskonstante/Influenzkonstante/Permittivität des Vakuums

Die Kraft zwischen den geladenen Teilchen ist proportional zum Produkt der Ladungsmengen und umgekehrt proportional zum Abstandsquadrat der Ladungen.

7

## Prinzip der Superposition

Resultierende Kraft ist vektorielle Summe der Einzelkräfte.

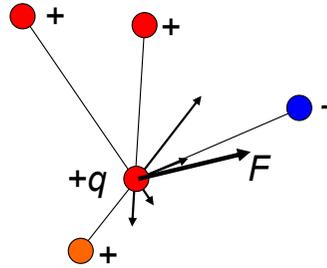


8

## Elektrische Feldstärke

Probeladung:  $+q$   
Resultierende Kraft:  $F$

Alle Kräfte sind proportional zur  $q$ .  
 $\Rightarrow F/q$  hängt nur von der Grösse und Anordnung der Ladungen an, die auf  $q$  mit Kraft wirken.



### elektrische Feldstärke, $E$ :

Quotient aus der Kraft auf eine elektrische Ladung und dem Betrag der Ladung.  
(ortsabhängige Vektorgrösse):

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad \left[ \frac{N}{C} \right]$$

9

## Charakteristiken der elektrischen Feldstärke

Die Richtung der elektrischen Feldstärke ist definiert als Krafrichtung auf eine positive Ladung.

Feldstärke ist nicht notwendig an Materie gebunden. Feldstärken erscheinen in Materie und in Vakuum.

Die Ladungsverteilung -- Ursache für die Feldstärke -- kann unbekannt sein.

Feldstärke an einem beliebigen Raumpunkt erhält man, wenn eine Probeladung (Sonde) auf diesen Punkt bringt und die Kraft misst.

10

## Elektrisches Feld und Feldlinien

Wenn sich der physikalische Zustand eines Objekts im Raum ändert, ohne dass ein direkter Kontakt mit einem anderen Objekt besteht, spricht man von einem Feld.

Die Ladung eines Objekts verändert den umgebenden Raum durch sein elektrisches Feld. Ein anderes geladenes Objekt erfährt eine Kraft.

Das Feld wird durch die Feldstärke definiert.  
Veranschaulichung des Feldes: mit Hilfe der Feldlinien

**Richtung der Feldlinien:** Richtung des Feldstärkevektors

**Dichte der Feldlinien** (Anzahl der Feldlinien pro Fläche):  
Betrag des Feldstärkevektors

11

## Feldlinien einer Punktladung

Radialfeld



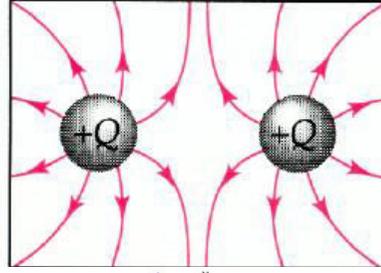
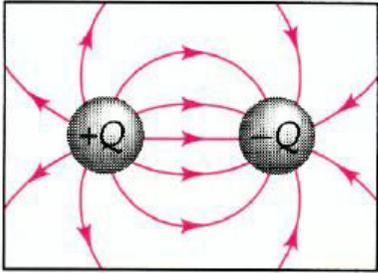
Im allgemeinen:

Feldlinien beginnen bei der positiven Ladung und enden bei der negativen Ladung.

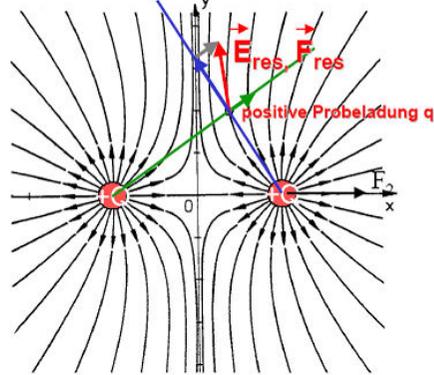
Feldlinien überkreuzen sich nicht und haben keine Wirbel (falls Ladungen sich nicht bewegen).

12

## Feldlinien eines Dipols und zwei gleicher Ladungen

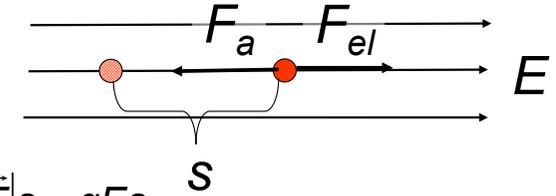


Dipol (Zweipol):  
zwei räumlich getrennt  
auftretende Ladungen  
gleicher Grösse aber  
unterschiedlichen  
Vorzeichens  
(EKG!)



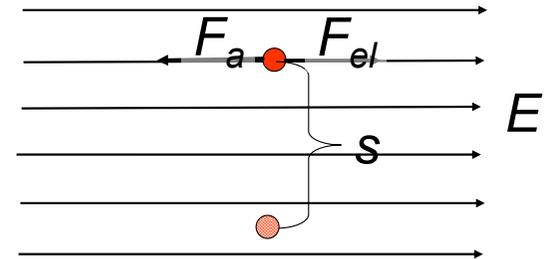
## Arbeit im elektrischen Feld

Bewegung einer  
Ladung gegen  
Feldstärke.



$$W = |\vec{F}_a| \cdot s = |\vec{F}_{el}| \cdot s = q|\vec{E}|s = qEs$$

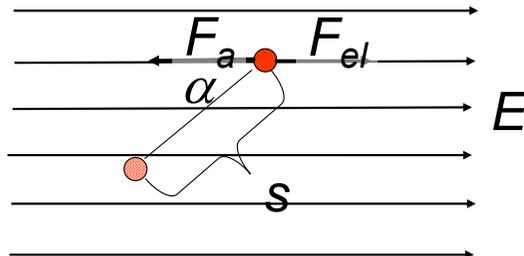
Bewegung einer  
Ladung senkrecht zu  
den Feldlinien.



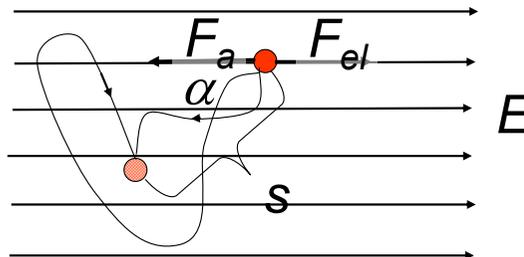
$$W = |\vec{F}_a| \cdot s \cdot \cos \alpha = 0$$

14

Bewegung einer  
Ladung schräg zu  
den Feldlinien.



$$W = |\vec{F}_a| \cdot s \cdot \cos \alpha = qEs \cdot \cos \alpha$$



**W ist unabhängig  
von dem Weg!**

15

## Elektrisches Potential

Man braucht  $W_{0 \rightarrow i}$  Energie um eine Probeladung  $q$   
aus einem Bezugspunkt  $P_0$  nach Punkt  $P_i$  zu bringen.

$\frac{W_{0 \rightarrow i}}{q}$  ist unabhängig von der Probeladung und vom Weg!

Elektrisches Potential:  $\varphi_i = \frac{W_{0 \rightarrow i}}{q}$  Einheit:  $1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}}$

Das elektrische Potential ( $\varphi_i$ ) gibt an, welche potentielle  
Energie eine Probeladung ( $q$ ) in einem Punkt ( $i$ ) hat,  
nachdem sie in einem vorgegebenen elektrischen Feld vom  
Unendlichen (0) zu einem Punkt gebracht wurde.

16

## Potential Differenz = Spannung

Elektrische Spannung zwischen zwei Punkten  $P_1$  und  $P_2$ :  
(Spannung des Punktes  $P_2$  gegenüber  $P_1$ )

$$U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} \quad \text{Einheit: Volt [V]}$$

Bemerkungen:

$$U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1$$

Wenn  $U_{21} > 0 \Rightarrow P_2$  ist „positiver“ als  $P_1$

$$U_{21} = -U_{12}$$

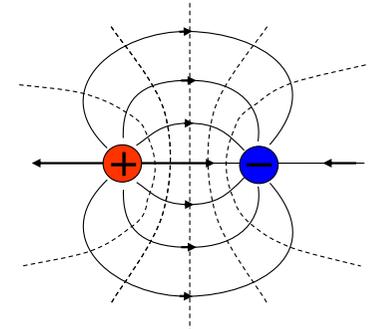
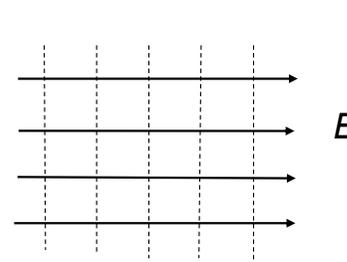
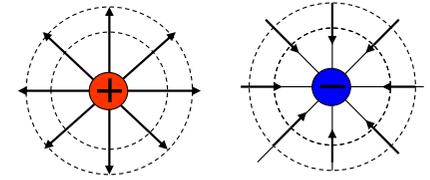
In homogenem Feld: 
$$U_{21} = \frac{W_{1 \rightarrow 2}}{q} = \frac{q|\vec{E}|s}{q} = Es$$

17

## Potentialfeld, Äquipotentialflächen

Äquipotential = dasgleiche Potential

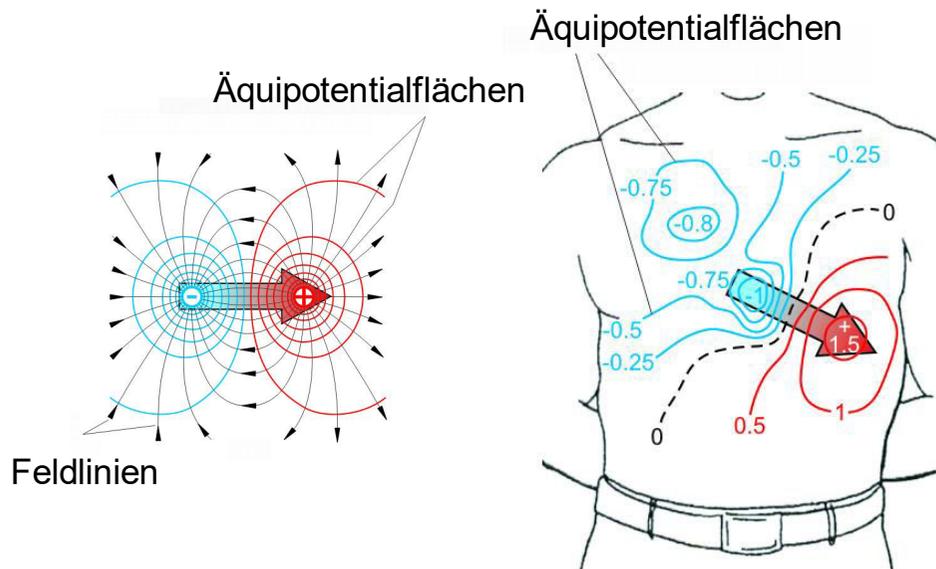
Äquipotentiallinien(-flächen)  
(gestrichelte Linien) und Feldlinien  
(durchgezogene Linien) stehen  
normal aufeinander



Bewegung an einer  
Äquipotentialfläche: keine Arbeit!

18

## Medizinische Anwendung: EKG

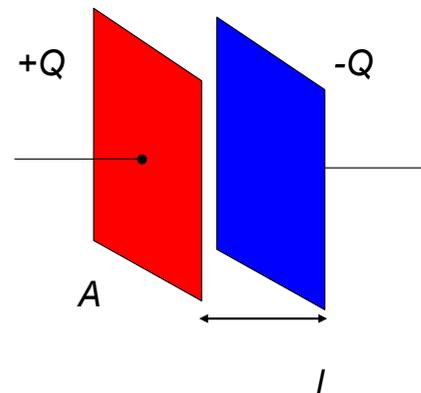


19

## Kondensator und Kapazität

Kondensator (dichtgedrängt, bezogen auf die Ladungen):  
Bauelement, das die elektrische Ladungen und  
Energie speichern kann, Ladungsspeicher

Plattenkondensator



Kapazität des Kondensators

$$Q = C U$$

$$C = \frac{Q}{U}$$

Ladungsspeicherungsfähigkeit

Einheit: farad  $1F = \frac{1C}{1V}$

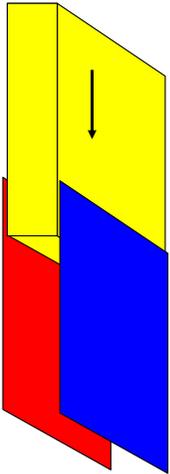
Für Plattenkondensator:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

20

## Dielektrikum zwischen der Kondensatorplatten

Dielektrikum:  $\epsilon_0$  = elektrische Feldkonstante des Vakuums  
 ~ Isolator  $\epsilon_r$  = relative Dielektrizitätszahl



$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$$

mit Dielektrikum

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

ohne Dielektrikum

Die relative Dielektrizitätszahl gibt an, um welchen Faktor sich die Kapazität vergrößert, wenn statt Luft ein anderes Dielektrikum verwendet. Z.B.

Fettgewebe:	12
Haut:	70
Muskel :	74
Blut:	75,

21

## Energiespeicherung im Kondensator

Die in einem Kondensator gespeicherte Energie:

Die Energie die für Aufladung eines Kondensators mit  $Q$  Ladung an  $U$  Spannung notwendig ist.

$$W = \frac{1}{2} UQ = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (Q=UC)$$

22

## Elektrischer Strom

Der gerichtete Transport von elektrischen Ladungen.

kollektive Wanderung

elektrische Ladungsträgern = elektrisch geladene Teilchen:

in Metallen: **Elektronen**

in Elektrolytlösungen und Gasen: **Ionen**

### Elektrische Stromstärke

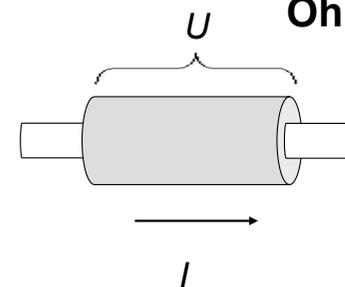
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \Delta Q: \text{ durch einen Leiterquerschnitt während der Zeitdauer } \Delta t \text{ durchgeflossene Ladung}$$

Einheit: Ampere,  $1A = 1C/1s$

technische (konventionelle) Stromrichtung:  
 Bewegungsrichtung der positiven Ladungen.

23

## Ohmsches Gesetz



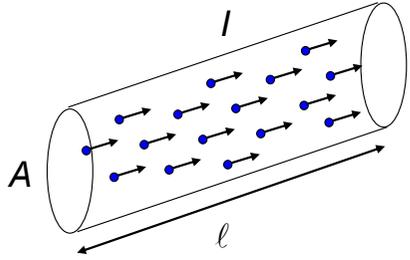
Der Spannungsabfall  $U$  über bestimmte metallische Leiter proportional zu der hindurchfließenden elektrischen Stromstärke  $I$ .

$$U \sim I \begin{cases} U = RI & R: \text{ elektrischer Widerstand} \\ GU = I & G: \text{ elektrische Leitfähigkeit} \end{cases}$$

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{Einheit : Ohm } \Omega = \frac{V}{A}$$

24

## Widerstand eines Leiters



$$I \sim v \sim E = U/l$$

$$I \sim Q \sim A$$

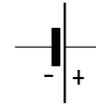
Spez. Widerstand	$\Omega \cdot \text{cm}$	$I \sim \frac{A}{l} U$ $I = \frac{U}{R}$	$R \sim \frac{l}{A} \Rightarrow R = \rho \frac{l}{A}$
Blut	150		
graue Hirnmasse	300		
weiße Hirnmasse	700		
Haut	1000		
Fett	2500		
Knochen	10000		

spezifischer Widerstand  
SI einheit:  $\Omega \text{m}$

25

## Elektrischer Stromkreis

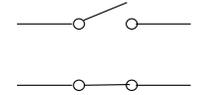
elektrische Schaltelemente:



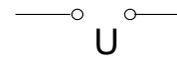
Batterie



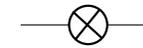
Widerstand



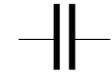
Schalter



Spannungsquelle



Lampe

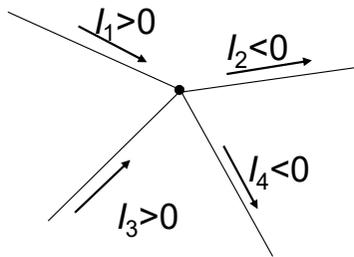


Kondensator

26

## Kirchoffsche Gesetze

1. Kirchoffsches Gesetz:  
**Knotenregel**

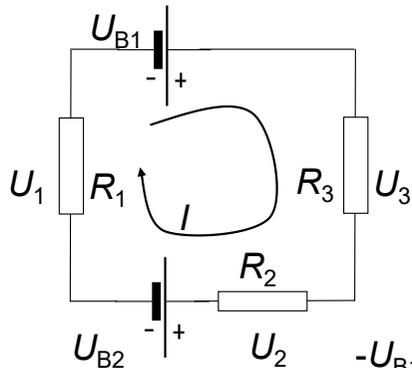


$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

$$\sum_k I_k = 0$$

2. Kirchoffsches Gesetz:  
**Maschenregel**

(Summe der Spannungen in einer Masche ist 0.)



$$\sum_k U_k = 0$$

$$-U_{B1} + U_3 + U_2 + U_{B2} + U_1 = 0$$

## Wirkungen des elektrischen Stromes

Wärmewirkung

chemische Wirkung

biologische Wirkung

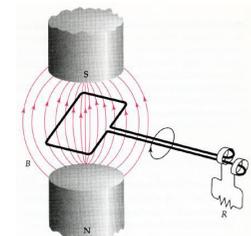
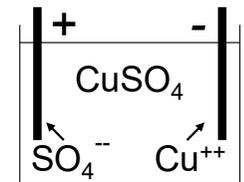
magnetische Wirkung

...

Stromarbeit:  $W_{\text{strom}} = U I t$

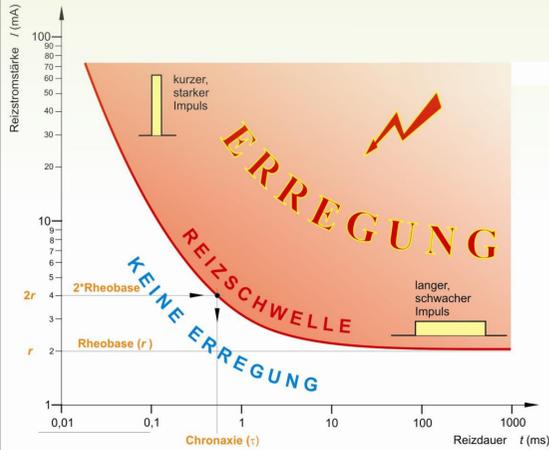
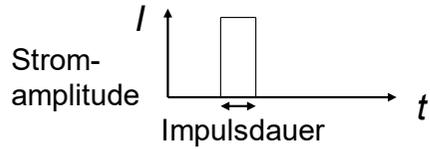
Leistung:  $P = W/t = U I$

Elektrolyse



28

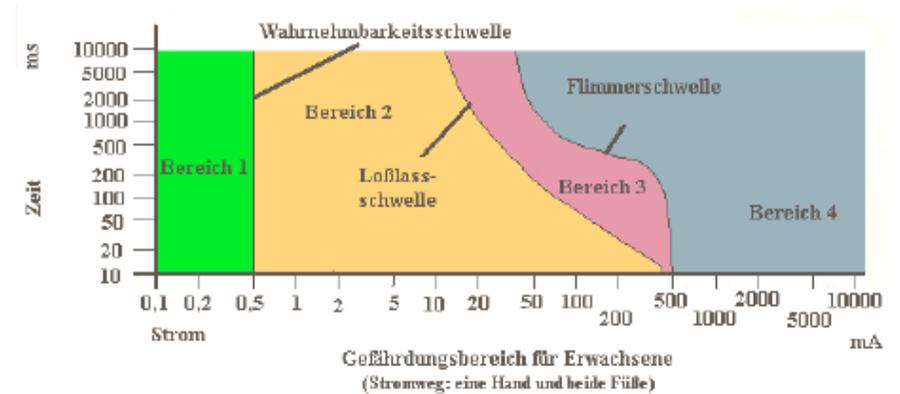
# Charakteristiken der elektrischen Stromimpulse



**Rheobase:**  
die Schwellenstromintensität, bei der ein Nerv/Muskel ein Aktionspotential/Kontraktion auslöst.

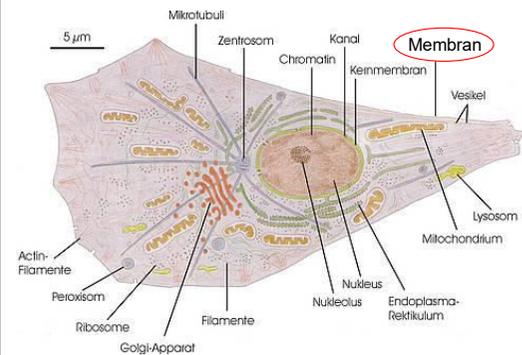
**Chronaxie:**  
die minimale Zeit, über die ein Reiz mit doppelter Rheobasestärke fließen muss, um gerade noch erregend zu wirken

# Stromwirkung auf den Menschen

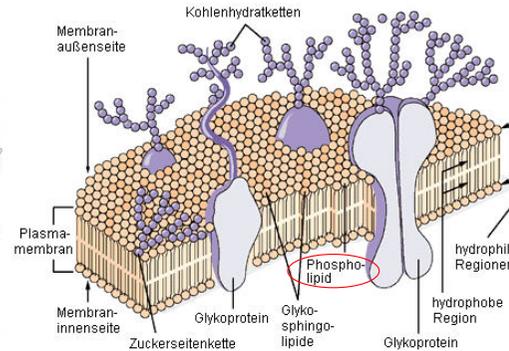


- Bereich 1: Wechselströme in diesem Bereich werden von den meisten Menschen gar nicht wahrgenommen.
- Bereich 2: Es ist ein Kribbeln zu spüren, auch schmerzhaft Verkrampfungen sind möglich. Direkte Schäden sind kaum zu befürchten.
- Bereich 3: Die Stromquelle kann auf Grund von Muskelverkrampfung nicht mehr losgelassen werden.
- Bereich 4: Schwere Schädigung und häufig tödliche Stromwirkung, z.B. durch Herzkammerflimmern

## Zelle



## Zellmembran

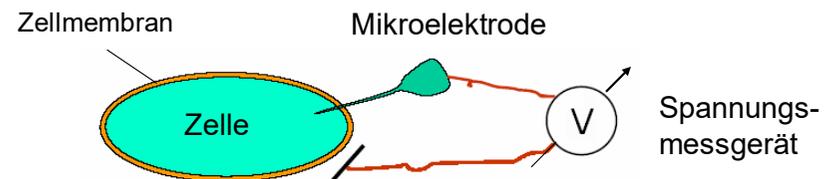


Tierische und menschliche Zellen sind von einer Membran umschlossen, die den Zellinhalt vom umgebenden Extrazellulärraum trennen. Das Innere der Zellen enthält neben spezifischen intrazellulären Organellen und dem strukturgebenden Zytoskelett etwa zur Hälfte das sog. Zytosol, das zu etwas 20 Gewichtsprozent aus Eiweiß besteht, aber eine wässrige Phase besitzt, in der kleine Moleküle und **organische und anorganische Ionen** gelöst sind.

## Polarisation der Zelle

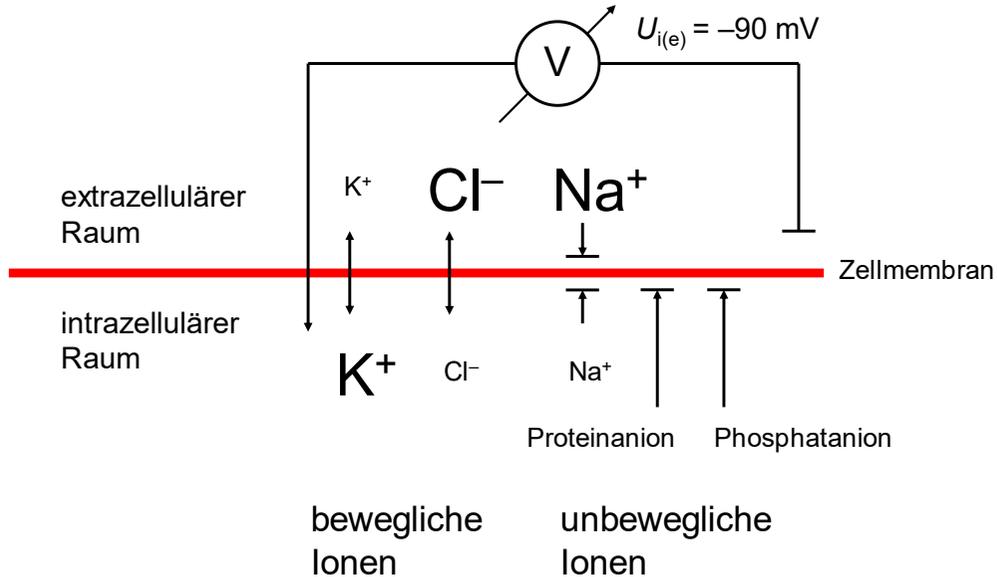
Wird eine Elektrode in einer Muskelzelle (im Intrazellulärraum) und eine andere Elektrode auf der Zelloberfläche (im Extrazellulärraum) angebracht, so kann eine Potentialdifferenz (= Spannung) zwischen den Elektroden gemessen werden. Der Name dieser Potentialdifferenz ist „**Ruhepotential**“.

Die intrazelluläre Elektrode besitzt im Vergleich zur extrazellulären Elektrode ein negatives Potential. (Man definiert das Potential der Aussenseite willkürlich mit 0.)



nicht polarisierbare Mikroelektrode: ausgezogene Glasröhre (0.1 µm Durchmesser) mit Elektrolyt (Wasser mit Ionen) gefüllt

## Elektrische Eigenschaften von Zellen im Ruhezustand



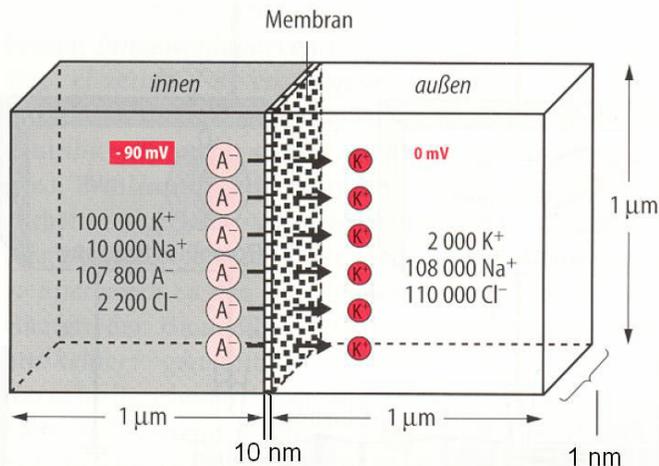
33

## Experimentell bestimmte Werte von Ionenkonzentration und Ruhepotential für einige Gewebearten

Gewebe	intrazelluläre Konzentration (mmol/L)			extrazelluläre Konzentration (mmol/L)			Ruhepotential (mV)
	[Na <sup>+</sup> ] <sub>i</sub>	[K <sup>+</sup> ] <sub>i</sub>	[Cl <sup>-</sup> ] <sub>i</sub>	[Na <sup>+</sup> ] <sub>e</sub>	[K <sup>+</sup> ] <sub>e</sub>	[Cl <sup>-</sup> ] <sub>e</sub>	
Tintenfisch-Riesenaxon	72	345	61	455	10	540	-62
Froschmuskel	20	139	3,8	120	2,5	120	-92
Rattenmuskel	12	180	3,8	150	4,5	110	-92

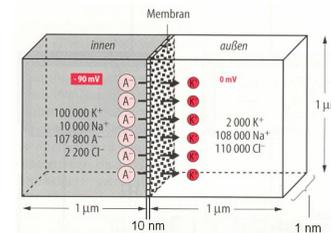
34

## Ladungsverteilung an der Membran beim Ruhepotential



Der Überschuss an positiven Ladungen auf der Aussenseite und an negativen Ladungen auf der Innenseite der Zellmembran in Ruhe stellt nur einen kleinen Bruchteil der Gesamtzahl aller Ionen innerhalb und ausserhalb der Zelle dar.

35



Anzahl der Ionen		
innen	ausen	
K+	99 994	2 006
Na+	10 000	108 000
A-	107 800	
Cl-	2 200	110 000
<b>Summe</b>	<b>219 994</b>	<b>220 006</b>

Anzahl der Ladungen		
innen	ausen	
K+	99 994	2 006
Na+	10 000	108 000
A-	-107 800	
Cl-	-2 200	-110 000
<b>Summe</b>	<b>-6</b>	<b>6</b>

## Die Membran wirkt wie ein Kondensator

6 K<sup>+</sup> Ionen sind durch die Membran aus der Zelle diffundiert

$$\text{Ladung (Q): } 6 \cdot e = 6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = 9.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \approx 10^{-18} \text{ C}$$

$$\text{Spannung (U) = } 100 \text{ mV} = 0.1 \text{ V}$$

$$\text{Fläche} = 1 \text{ nm} \cdot 1 \mu\text{m} = 10^{-15} \text{ m}^2$$

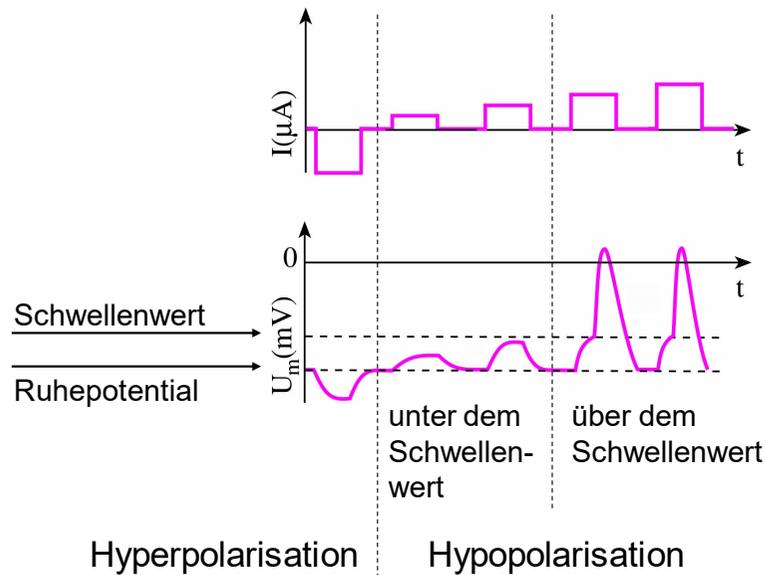
$$\text{Kapazität (C) = } Q/U = 10^{-17} \text{ F}$$

$$\text{spezifische Kapazität} = C/\text{Fläche} = 10^{-2} \text{ F/m}^2 = 10^{-6} \text{ F/cm}^2 = 1 \mu\text{F/cm}^2$$

**Membrankapazität**

36

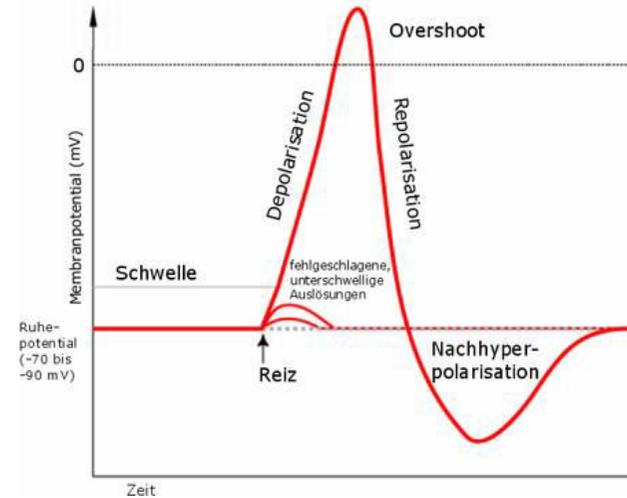
## Wirkung von Rechteck-Stromimpulsen auf das Membranpotential



37

## Aktionspotential

Unter einem Aktionspotential versteht man eine kurzzeitige, in ganz charakteristischer Form ablaufende Abweichung des Membranpotentials einer Zelle von ihrem Ruhepotential.



38

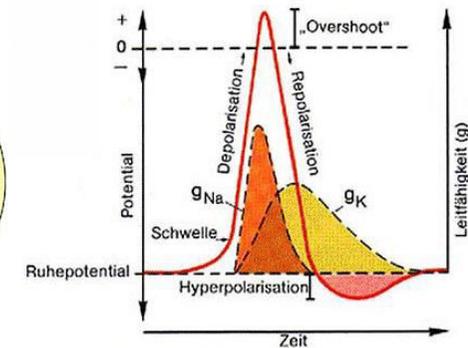
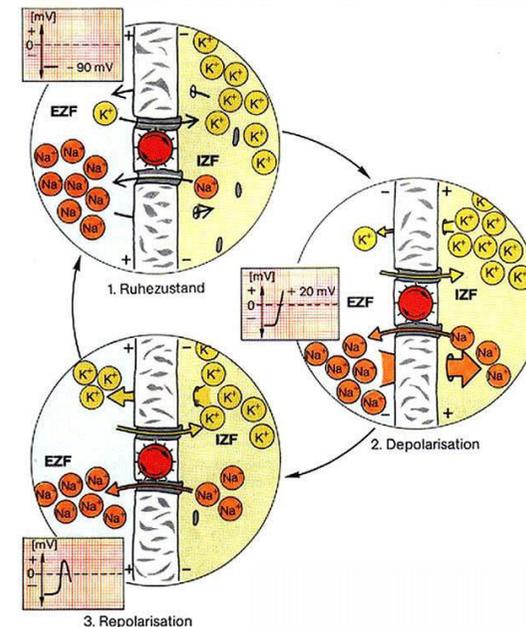
Die Änderung des Membranpotentials ist mit einer Änderung der Membranpermeabilität verbunden.

Nach Überschreiten der Schwellenspannung steigt die Ionenpermeabilität der Membran sprunghaft an.

**Depolarisation:** hierbei steigt die Natriumpermeabilität an: Einstrom von  $\text{Na}^+$ -ionen in die Zelle. Die zunehmende Depolarisierung erhöht die Membranpermeabilität, wodurch die Depolarisation weiter beschleunigt wird (positive Rückkopplung).

**Repolarisation:** Kaliumpermeabilität zunimmt, sinkt die Natriumpermeabilität,  $\text{K}^+$ -ionen strömen aus der Zelle heraus.

39



Ionenleitfähigkeit und Aktionspotential (idealisiert)

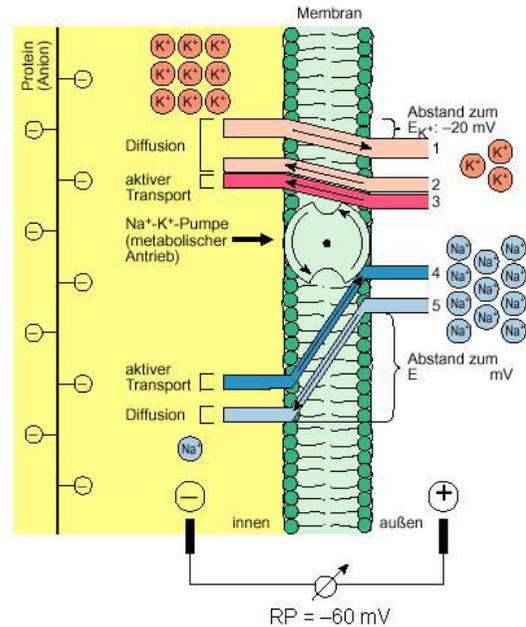
40

### Aktiver Transport:

gegen Richtung der Konzentrationsgradienten wird Arbeit geleistet:

Na<sup>+</sup>-Auströmung, K<sup>+</sup>-Einstromung

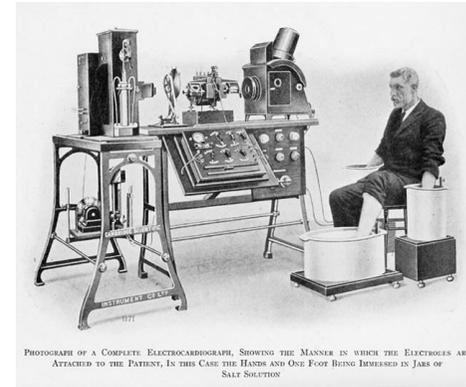
Energie vom aktiven Transport stammt aus Stoffwechselprozessen (ATP → ADP).



41

## Biophysikalische Grundlagen der EKG

ELEKTROKARDIOGRAMM (EKG): Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Spannung  $U(t)$ , die zwischen bestimmten Punkten der Körperoberfläche (Ableitungsstellen) infolge der elektrischen Tätigkeit der Herzmuskulatur auftritt.



Elektrokardiograph, Cambridge, 1908. Die Messelektroden sind Gefäße mit Kochsalzlösung, die von der Erde isoliert sind.

42

### Ergänzungsmaterial

**Multipol-Reihenentwicklung.** Man kann das elektrische Feld einer beliebig komplizierten Ladungsverteilung erhalten, indem man die Feldsumme aus einer zweckmäßig gewählten Ladung (Monopol), einem zweckmäßig gewählten Dipol, einem zweckmäßig gewählten Quadropol, einem zweckmäßig gewählten Oktopol usw. bildet.

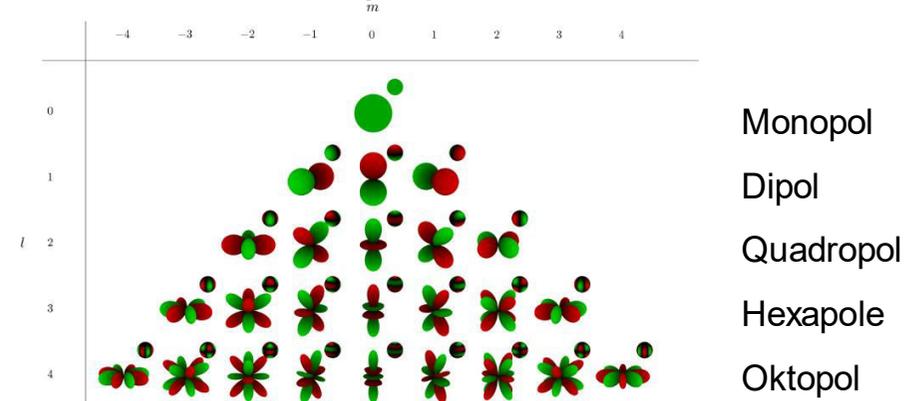
Da die Abhängigkeit der einzelnen Glieder vom Abstand ihrer Felder sehr unterschiedlich ist – das Feld des Dipols nimmt mit steigendem Abstand bedeutend stärker ab als das Feld des Monopols, das Feld des Quadropols nimmt stärker ab als das Feld des Dipols usw. –, muss man nicht viele Glieder berücksichtigen, wenn man das Feld der Ladungsverteilung im Herzen an der Körperoberfläche in einem gegebenen Moment charakterisieren will.

Die Zahl der positiven und negativen Ladungen im Herzen ist zwar sehr groß, aber es gibt gleich viele positive und negative Ladungen. So ist bei der Addition der Wert des zweckmäßig gewählten Monopols Null. So ist der erste Summand, dessen Wert nicht Null ist, das Dipolglied. Die weiteren Glieder können aus dem erwähnten Grund außer Acht gelassen werden.

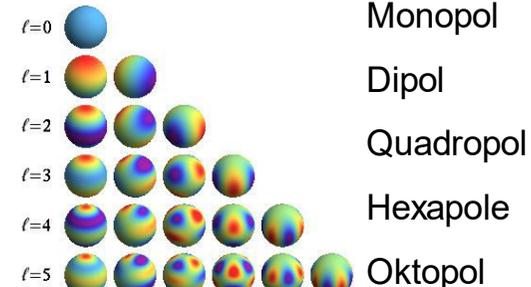
43

### Ergänzungsmaterial

#### Multipol-Reihenentwicklung .

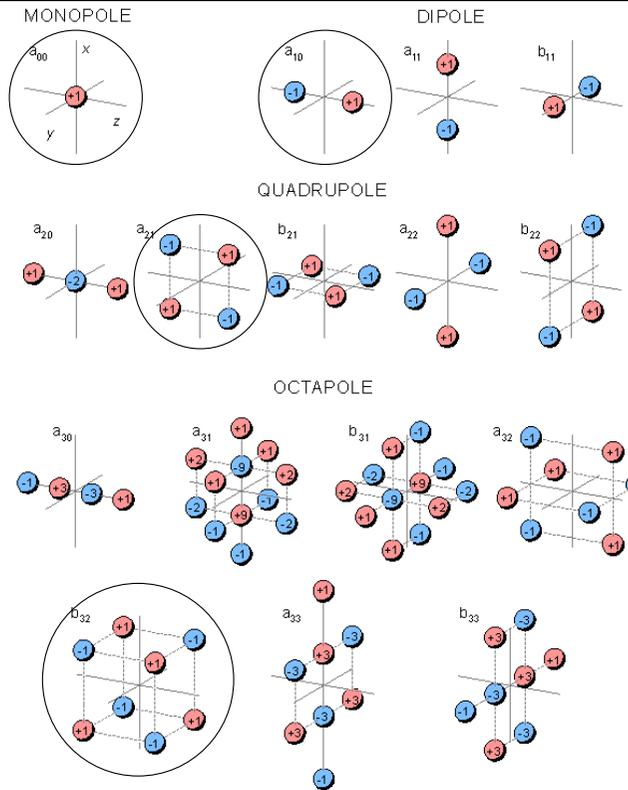


Farbendarstellung:

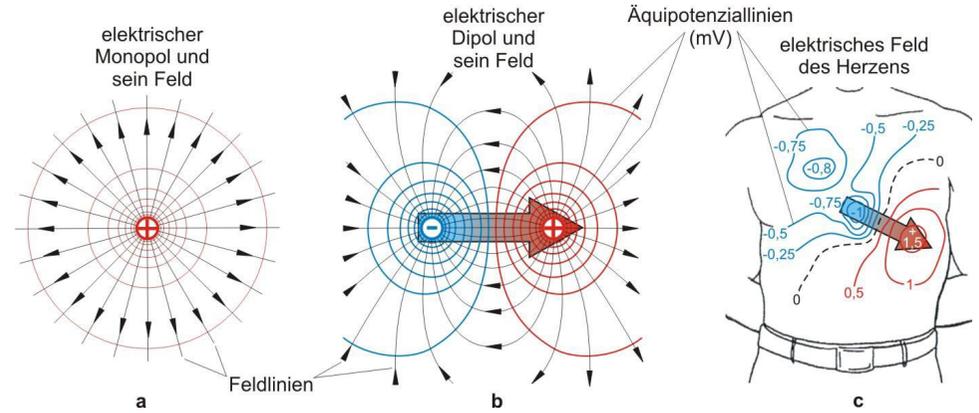


44

Ergänzungs-  
material

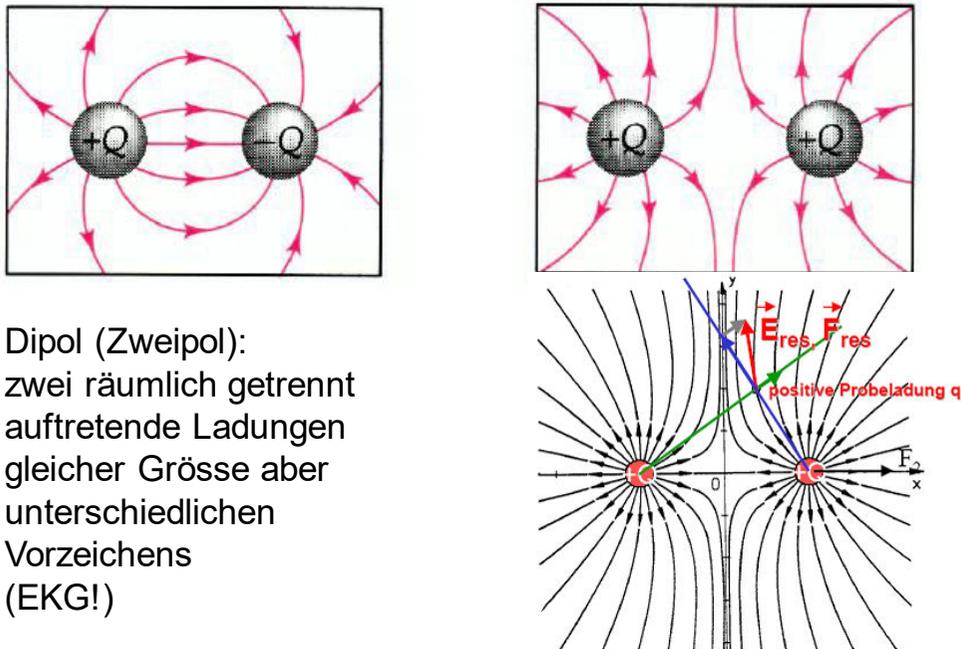


Multipol-  
Reihen-  
entwicklung

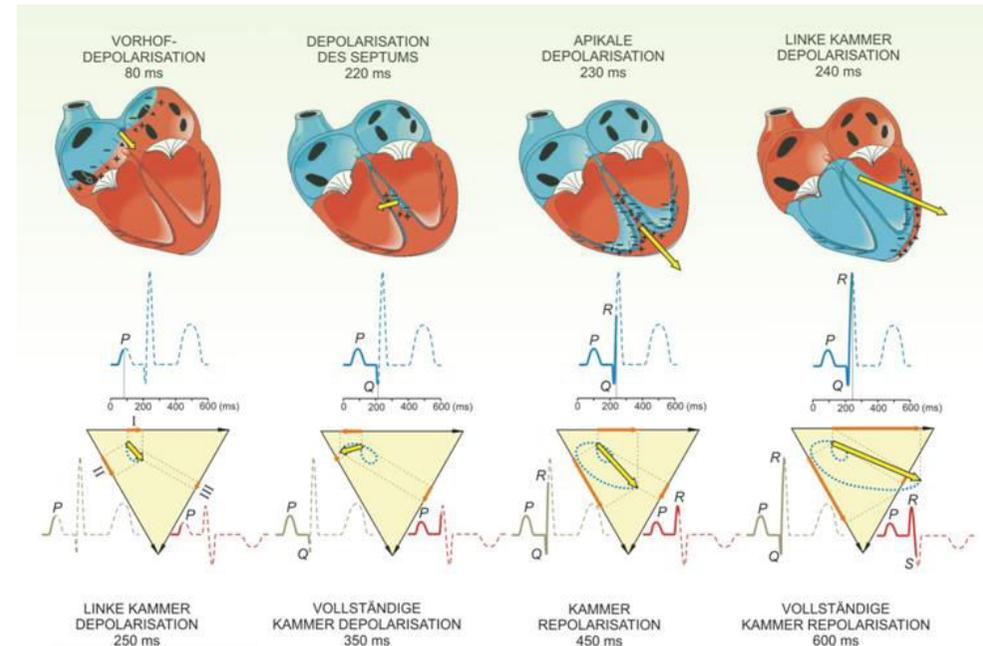


Die elektrische Tätigkeit des Herzens kann mit einem Dipol modelliert werden

Feldlinien eines Dipols und zwei gleicher Ladungen



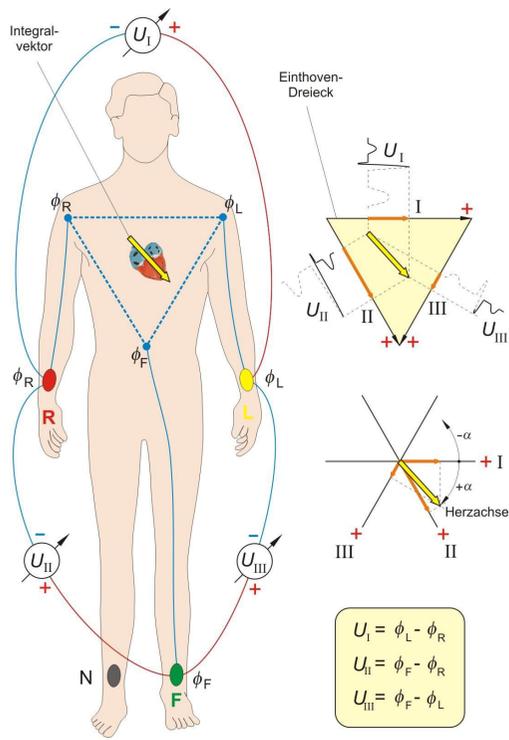
Dipol (Zweipol):  
zwei räumlich getrennt  
auftretende Ladungen  
gleicher Grösse aber  
unterschiedlichen  
Vorzeichens  
(EKG!)





## Die Standardableitungen nach Einthoven und die Konstruktion des Integralvektors

**INTEGRALVEKTOR:** Streng genommen wird der räumliche Vektor, der das elektrische Feld des Herzes charakterisiert, als Integralvektor bezeichnet. Salopper wird auch seine frontale Projektion, die im Einthoven-Dreieck konstruiert wird, als Integralvektor bezeichnet.



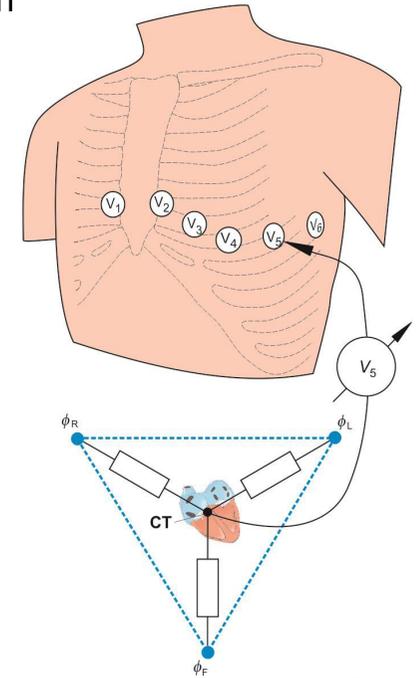
## Unipolare Ableitungen nach Wilson

**DIFFERENTE (AKTIVE) ELEKTRODE:** Eine Elektrode, deren Potenzial sich während des Herzzyklus kontinuierlich ändert.

**INDIFFERENTE (INAKTIVE) ELEKTRODE:** Eine mit dem Körper elektrisch gekoppelte Elektrode, deren Potenzial annähernd konstant ist

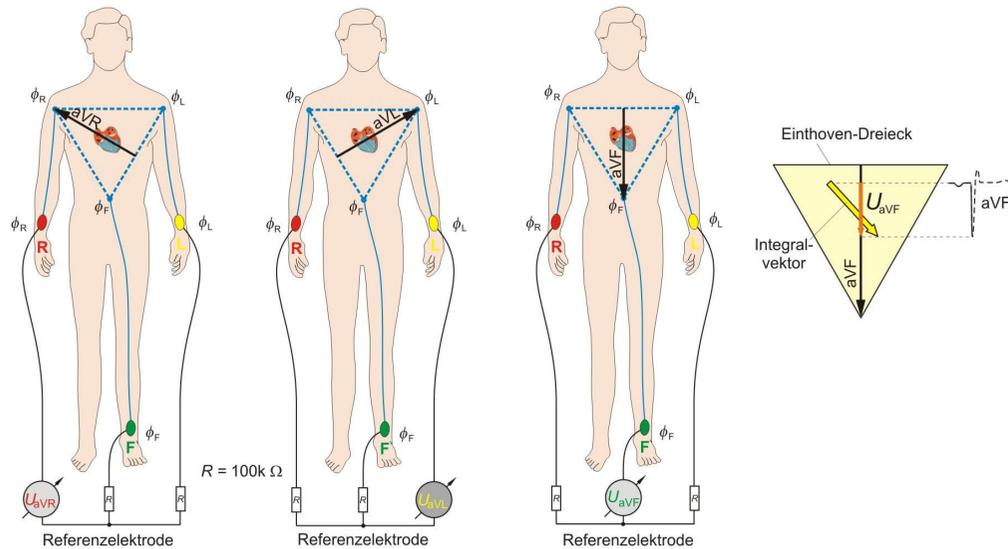
**UNIPOLARE ABLEITUNG:** Sie dient dem Registrieren der Potentialdifferenz zwischen einer differentiellen und einer indifferenten Elektrode.

**BIPOLARE ABLEITUNG:** Sie dient dem Registrieren der Potentialdifferenz zwischen zwei differentiellen Elektroden.  
z.B. Einthoven



54

## Unipolare Ableitungen nach Goldberger



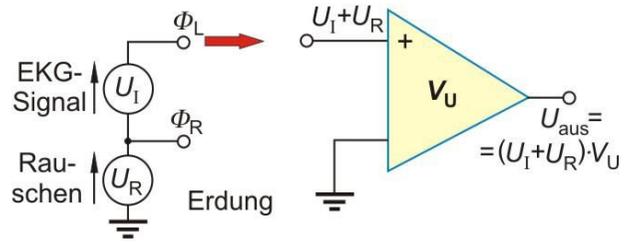
55

## Erstellung eines EKGs

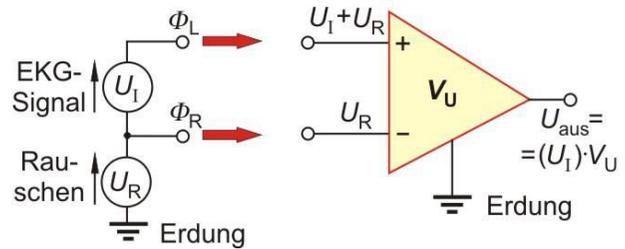


56

### HERKÖMMLICHER VERSTÄRKER



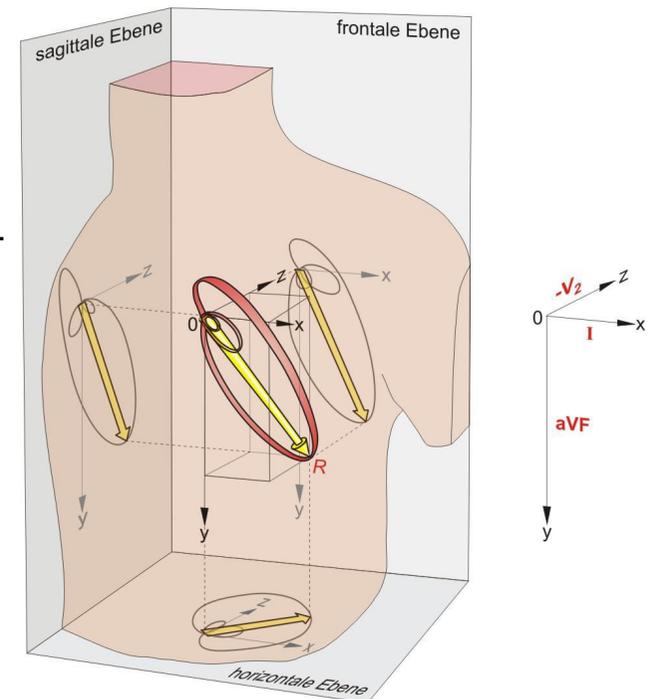
### DIFFERENZVERSTÄRKER



Der Differenzverstärker unterdrückt die Gleichtaktsignale

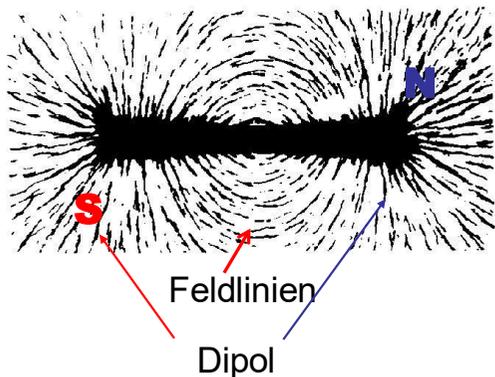
### Vektorkardiogramm.

Die räumliche Bahn des Integralvektors und seine Projektionen bzw. die Ableitungen in der x-, y- und z-Richtung.



## Magnetismus

Magnetismus ist eine fundamentale Eigenschaft der Materie.



Magnetfeld

magnetische Feldstärke

( $H$ )

magnetische Flussdichte („Feldstärke“), ( $B$ )

Einheit: Tesla (T)

(1 Tesla = 10 000 Gauss)

## Magnetische Wechselwirkung

Anziehung

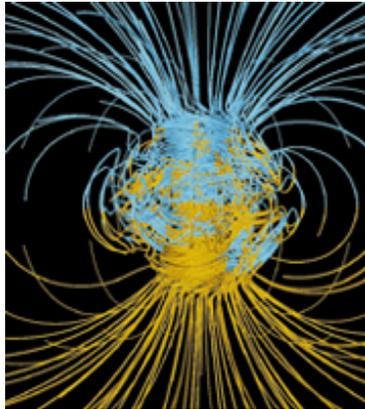
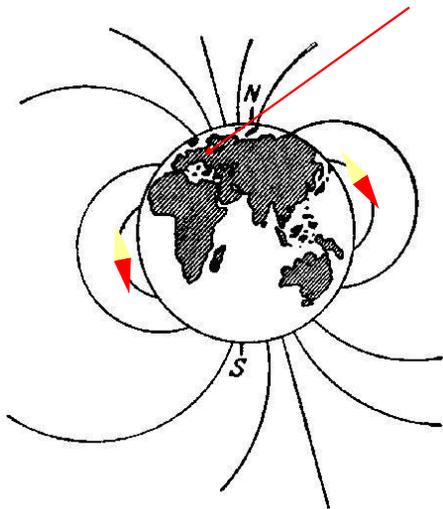


Abstossung



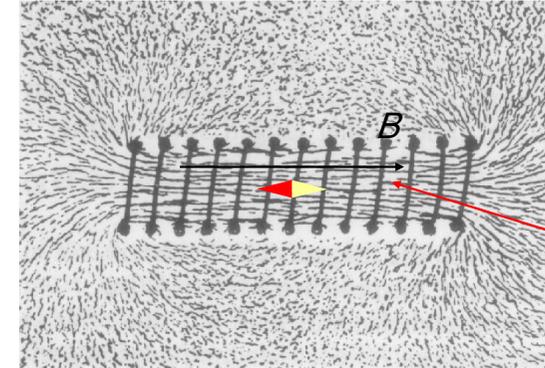
# Erdmagnetismus

$$B_{\text{Erde}} \approx 20 \mu\text{T}$$



# Elektromagneten

Stromdurchflossene Spule:



homogenes  
Feld

62

## Magnetische Eigenschaften der Materie

**Magnetische Suszeptibilität**  $\chi_m$  ist eine Materialeigenschaft (lat. susceptibilis „Übernahmefähigkeit“), welche die Fähigkeit der Magnetisierung in einem externen Magnetfeld angibt.

$$M = \chi_m H$$

Sie ist eine Proportionalitätskonstante, das Verhältnis von Magnetisierung  $M$  zu magnetischer Feldstärke  $H$ .

Der Wertebereich geht von  $-1$  bis unendlich, wobei negative Werte eine Magnetisierung entgegen dem äusseren Magnetfeld bedeuten.

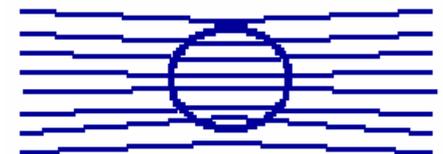
63

**Diamagnetische Materialien** haben das Bestreben, das Magnetfeld aus ihrem Innern zu verdrängen. Sie magnetisieren sich gegen die Richtung eines externen Magnetfeldes, folglich ist die Suszeptibilität negativ.



Dia-,  $\chi_m < 0$

**Paramagnetische Materialien** magnetisieren sich in einem externen Magnetfeld so, dass sie das Magnetfeld in ihrem Innern effektiv **verstärken**.



Para-,  $\chi_m > 0$

**Ferromagnetische Materialien** haben magnetische Ordnung.



Ferro-,  $\chi_m \gg 0$

64

## magnetische Merkmale

der Elektronenhülle und des Atomkerns

analytische Methoden (keine räumliche Auflösung)

paramagnetische Resonanz oder  
Elektronenspin-Resonanz

Electron Paramagnetic Resonance,  
EPR oder  
Electron Spin Resonance, ESR

Kernspinresonanz oder  
Magnetresonanz

Nuclear Magnetic  
Resonance, NMR

räumliche Auflösung

Magnetresonanz-  
tomographie (MRT),  
Kernspintomographie

Magnetic Resonance  
Imaging, MRI

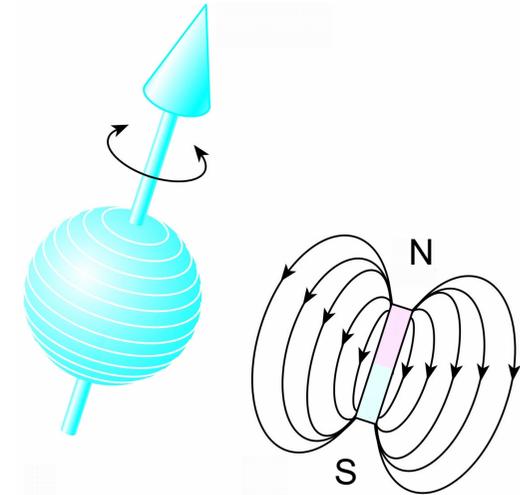
65

## Der Spin:

der Eigendrehimpuls des Elementarteilchens,

eine der prinzipiellen physikalischen Eigenschaften des  
Teilchens (z. B. Masse, elektrische Ladung, Dimensionen)

Kreiselmodell



66

jeder Kern mit ungerader Massenzahl hat einen Kernspin  
das **Spinmoment** (=Eigendrehimpuls, bezeichnet mit  $L$ ) ist  
gequantelt:

$$L = \sqrt{I(I+1)} \frac{h}{2\pi}, \quad I: \text{resultierende Kernspin-Quantenzahl}$$

A und Z gerade (z.B.  $^{16}_8\text{O}$  oder  $^{12}_6\text{C}$ ):  $I = 0$

A gerade, Z ungerade (z.B.  $^2_1\text{H}$ ):  $I = 1$   
(ganze Zahl)

A ungerade (Z gerade oder ungerade)  
(z.B.  $^1_1\text{H}$  oder  $^{13}_6\text{C}$ ):  $I = \frac{1}{2}$   
(ein ungerades Vielfaches von  $\frac{1}{2}$ )

67

## Magneten im Körper

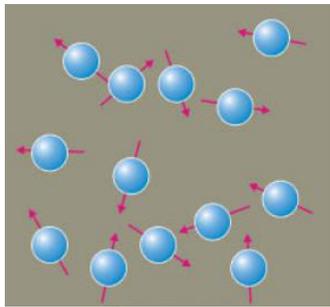
Nukleonen (Protonen und Neutronen) besitzen  
Eigendrehimpuls (Spin) und magnetisches Dipolmoment.



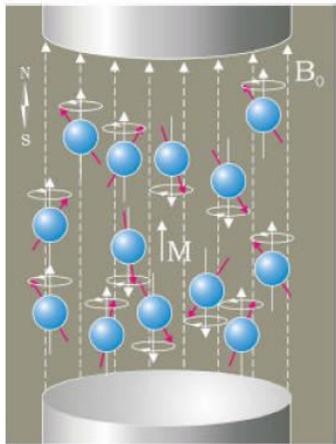
Wenn die Anzahl der Protonen und/oder Neutronen in  
einem Atomkern ungerade ist, dann besitzt der Atomkern  
auch magnetisches Dipolmoment.

z.B.  $^1_1\text{H}$ ,  $^{13}_6\text{C}$ ,  $^{15}_7\text{N}$ ,  $^{19}_9\text{F}$ ,  $^{23}_{11}\text{Na}$ ,  $^{31}_{15}\text{P}$ , ...

68

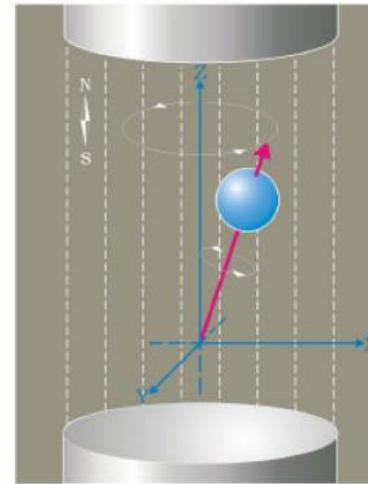


Atomkerne mit magnetischem Moment **ohne äusseres Magnetfeld**. Die unausgerichteten magnetischen Dipole der einzelnen Kernspins neutralisieren sich.



Atomkerne mit magnetischem Moment **mit äusserem Magnetfeld**. Unter Einwirkung des Feldes  $B_0$  richten sich die magnetische Dipole parallel oder antiparallel aus. Die parallele Ausrichtung wird, da energieärmer, etwas häufiger eingenommen und bewirkt so eine Nettomagnetisierung  $M$ .

## Präzession



Atomkern in Magnetfeld. Wie ein rotierender Kreisel zu taumeln beginnt, wenn er angestossen wird, führen Protonen in Magnetfeld dieselbe Art von Bewegung aus. Sie wird als **Präzession** bezeichnet.

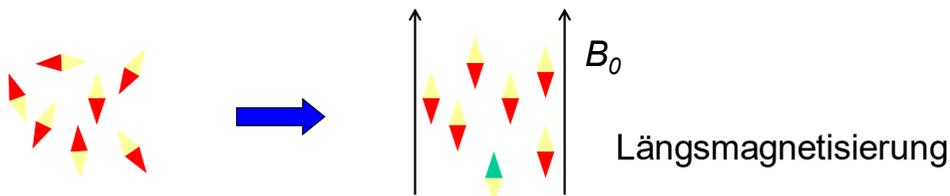
Präzession ist eine periodische Bewegung:

**Larmor-Frequenz**

$$f_0 = \gamma B_0,$$

$\gamma$  : gyromagnetische Konstante

## Grunderscheinungen: Ordnung



Ordnung durch ein äusseres Magnetfeld

antiparallel



Energiezustände



$$\Delta E = \frac{h}{2\pi} \gamma B_0$$

parallel

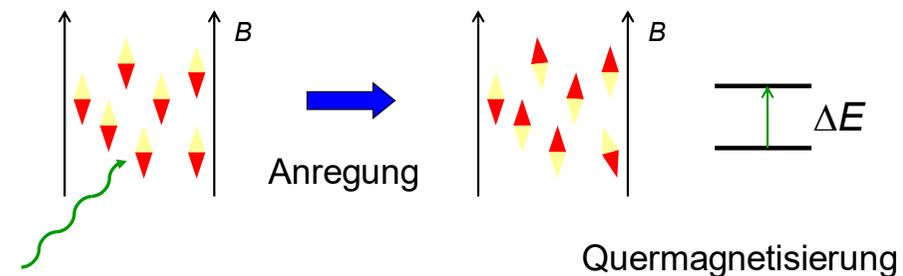


z.B.:  $B \approx 1 \text{ T}$

$$\Delta E \approx 3 \cdot 10^{-26} \text{ J}$$

Boltzmann-Verteilung!

## Grunderscheinungen: Anregung



kurzzeitige ( $\sim 3 \text{ ms}$ )  
Bestrahlung mit  
Radiowellen ( $f_R$ )

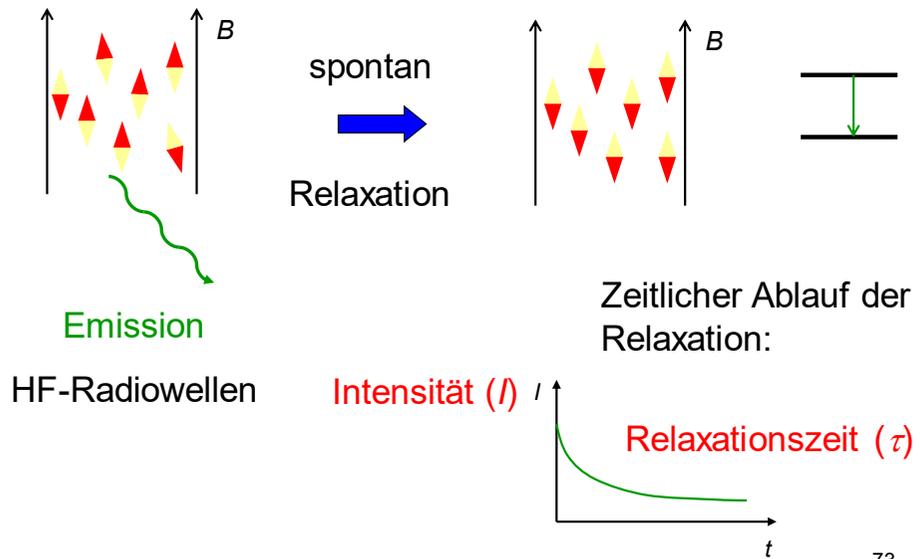
Resonanzabsorption

$$f_0 = f_R$$

$$\Delta E = h \cdot f$$

z.B.:  $f_R \approx 45 \text{ MHz}$  (Radiofrequenz)  
 $\lambda \approx 6,6 \text{ m}$  (Kurzwellen)

# Grunderscheinungen: Relaxation



73

# Messung der Nettomagnetisierung (Relaxationssignal)

**$T_1$  Relaxation:** exponentielle Zunahme der Längsmagnetisierung nach Abschalten des Radiofeldes (vgl. Aufladungsvorgang im RC-Kreis)

**$T_2$  Relaxation:** Abnahme der Quermagnetisierung, Dephasierung (vgl. Entladungsvorgang im RC-Kreis)

74

# Messprinzip der MRI

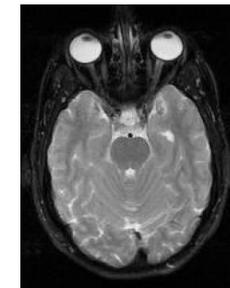
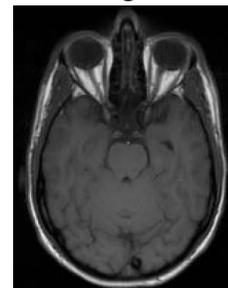
- HF-Radiowellen sind emittiert vom Körper nach kurzzeitiger Anregung.  $I$  und  $t$  der Strahlung werden gemessen.
- Die emittierte Intensität ( $I$ ) ist proportional zur **Protonenkonzentration**.
- Die Relaxationszeit ( $\tau$ ) ist charakteristisch für die Struktur der Umgebung.

Bei der Bildherstellung sind die räumliche Verteilung von  $I$  und  $t$  kombiniert benutzt.

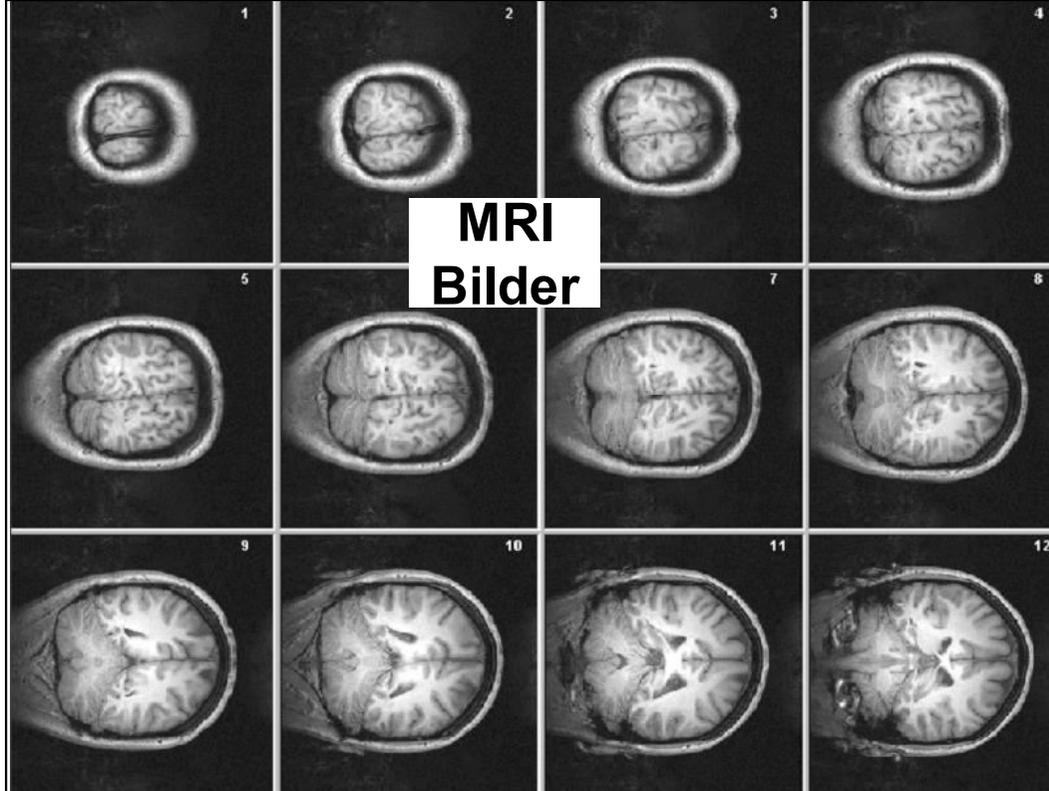
75

# Gewebedarstellung: Protonendichte Wichtung $T_1$ -Wichtung, $T_2$ -Wichtung

	$T_1$ -gewichtet	$T_2$ -gewichtet
Signalreich	Fett	Liquor, Ödeme, Flüssigkeit
Intermediär	Knochenmark, Muskulatur	Fett, Knochenmark
Signalarm	Liquor, Ödeme, Flüssigkeit	Muskulatur, Verkalkungen



76



MRI  
Bilder

## Geschichte der MRI

1946, Felix Bloch und Edward Purcell: Atomkerne absorbieren und emittieren HF-Radiowellen

1952: Nobel-Preis



Bloch

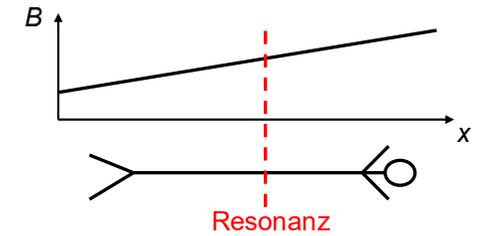


Purcell

- ⌘ 1971: erste Tumor-Lokalisation
- ⌘ 1973: NMR ist empfohlen für Abbildung
- ⌘ 1977: erster klinische MRI-Scanner ist patentiert
- ⌘ 1990: Entdeckung des BOLD-Effektes (blood oxygen level dependent signal)
- ⌘ 1992: erste fMRI-Bilder

## Technik der MRI

- Körper im starken Magnetfeld (Gradientenfeld mit Elektromagnet)
- Anregung von Protonen durch kurzzeitige Bestrahlung mit Radiowellen  
Resonanzabsorption nur bei einem Querschnitt in einer kleinen Volumeneinheit
- Emission von Protonen bei Relaxation wird gemessen mit einer Empfängerspule  
 $I$  und  $\tau$  werden bestimmt
- Wiederholung der Schritte 2 und 3 für weitere Volumeneinheiten in dem Querschnitt — Abtasten
- Bildherstellung des Querschnittes



## Vorteile und Nachteile der MRI

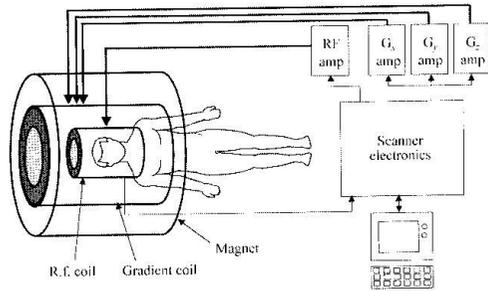
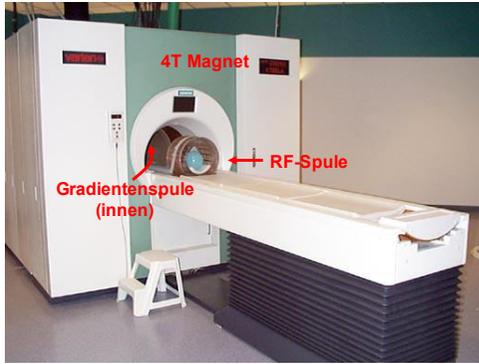
### Vorteile

- keine Schädigung
- gute Ortsauflösung
- gute Gewebskontraste

### Nachteile

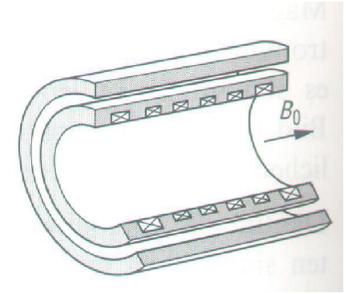
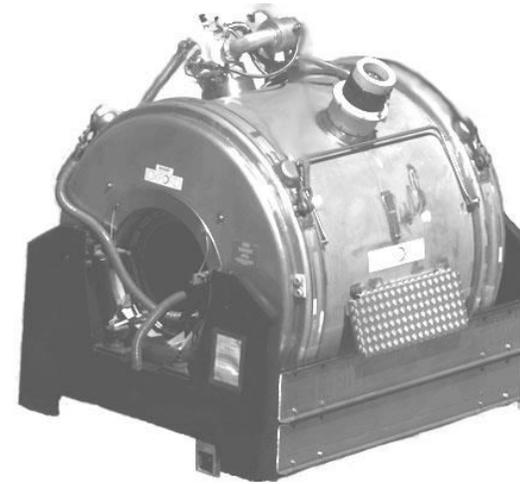
- teuer
- eventuell Klaustrophobie-Symptome

# Das Gerät



# Magneten

Supraleitender Magnet  
(Luftspule)



# fMRI — funktionale Kernspintomographie

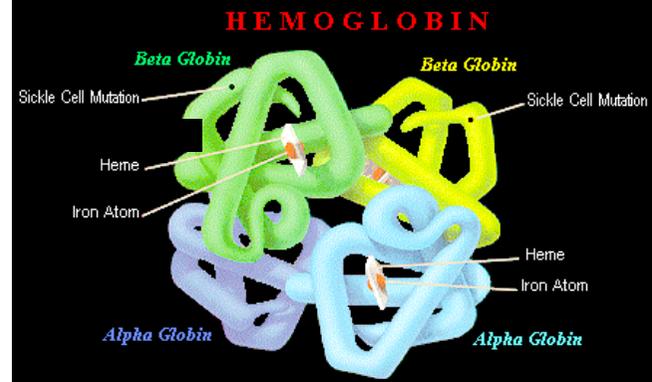
Vorsicht!

starkes Magnetfeld!

keine ferromagnetische Materialien



## A Molecule To Breathe With

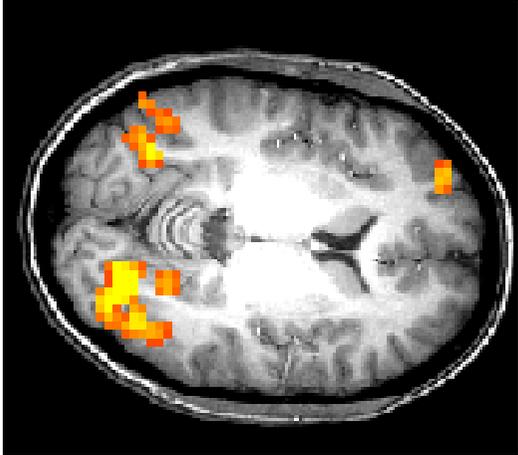


Oxyhämoglobin und Deoxyhämoglobin haben unterschiedliche magnetische Eigenschaften:

Oxyhämoglobin: diamagnetische Eigenschaften

Deoxyhämoglobin: paramagnetische Eigenschaften

## fMRI-Bild



projiziert auf ein  
anatomisches  
MRI-Bild

85

*Vielen Dank für ihre*



*Aufmerksamkeit!*

86  
*Fragen, Bemerkungen, Kommentare?*