

21.1 ELEKTRISCHE LADING EN BEHOUD ERVAN

Sommige voorwerpen worden **elektrisch geladen** als je ze tegen elkaar wrijft.

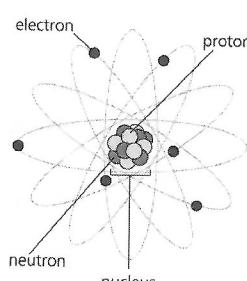


Elektrische ladingen in macroscopische systemen

Twee soorten elektrische lading: positieve en negatieve

Rubberen staaf elektrisch laden door wrijven tegen wol ('negatief')

Glazen staaf elektrisch laden door wrijven tegen zijde ('positief')



Microscopische oorsprong:

Elektronen: negatieve lading = $-e$

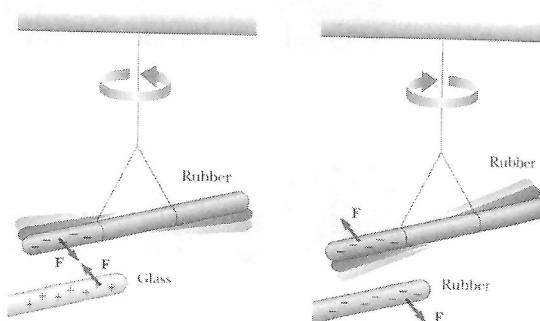
protonen: positieve lading = $+e$

neutronen: elektrisch neutraal (lading = 0)

3

21.1 ELEKTRISCHE LADING EN BEHOUD ERVAN

Tegengestelde ladingen trekken elkaar aan, ladingen met hetzelfde teken stoten elkaar af



Physics for scientists and engineers, Serway & Jewett, 6th ed.

4

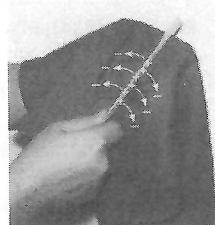
Elektrische ladingen in macroscopische systemen

Macroscopisch voorwerp elektrisch opladen

= elektronen toevoegen of wegnemen (v.e. ander voorwerp)

→ netto lading, excess lading

**De elektrische lading van een geïsoleerd systeem blijft behouden.
Het is niet mogelijk om netto-elektrische lading te genereren of te vernietigen.**



Physics for scientists and engineers,
Serway & Jewett, 6th ed.

Elektrische lading : 1 Coulomb = $0,6 \cdot 10^{19} e$

Eenheid: 1 Coulomb = 1 Ampère seconde (1 C = 1 As)

Elektrische lading is gekwantiseerd

$$Q = ne \quad n = \dots -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots$$

21.3 ELEKTRISCHE GELEIDERS EN ISOLATOREN

Geleider: een deel van de elektronen (vrije elektronen) is niet verbonden met de atomen en kan vrij bewegen.

Koper, goud,
zilver, aluminium, ...



Isolator, dielektrica: alle elektronen zijn verbonden met de atomen; ze kunnen niet vrij door het materiaal bewegen.

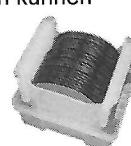
Glas, rubber, hout, ...



Halfgeleider: ladingen zijn minder sterk verbonden met de atomen en kunnen vrij bewegen als ze extra energie krijgen (temperatuur, licht, ...).

Geleiding controleerbaar via dopering met andere atomen.

Silicium, germanium, ...



21.5 DE WET VAN COULOMB

Elektrische krachten tussen geladen objecten

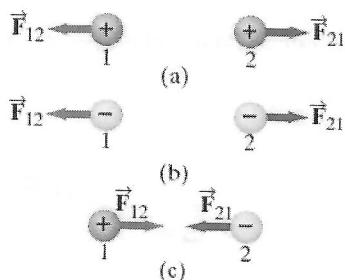
Experimentele bevindingen (Charles Coulomb, 1736-1806):



- Elektrische kracht → aantrekgend als ladingen verschillend teken hebben
- afstotend als ladingen hetzelfde teken hebben

$$\sim Q_1 \times Q_2$$

$$\sim \frac{1}{(\text{afstand tussen } Q_1 \text{ en } Q_2)^2}$$



7

21.5 DE WET VAN COULOMB

De wet van Coulomb

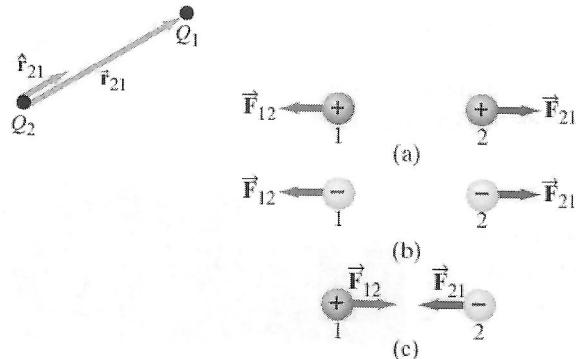
Elektrische kracht op puntlading Q_1 door puntlading Q_2



$$\vec{F}_{12} = \left(\frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \right) \frac{Q_1 Q_2}{r_{21}^2} \hat{r}_{21}$$

ε_0 = permittiviteit van het vacuüm

Coulomb-constante $k_C = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$



8

Meerdere puntladingen:

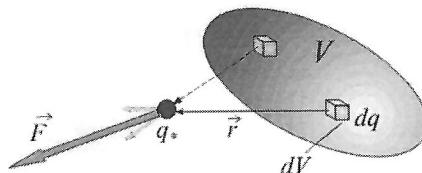
⇒ kracht op q^* = resultante van de Coulombkrachten van de andere ladingen

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q^* q_i}{r_i^2} \vec{e}_r = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} q^* \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \vec{e}_r$$

Continue ladingsverdeling:

⇒ kracht op q^* = integraal van de Coulombkrachten van alle stukjes lading dq

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} q^* \int \frac{1}{r^2} \vec{e}_r dq$$



9

21.5 DE WET VAN COULOMB

Toepassingen Coulomb-krachten

Krachten tussen moleculen; werking van transistoren; elektrische stroom; ...

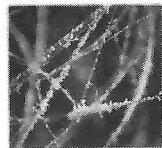


Vb. Gebaseerd op aantrekking tussen geladen voorwerpen

Cosmetica: incorporeren van materialen die elektrisch aangetrokken worden door huid of haren



Contactlenzen: elektrische aantrekking tussen proteïnen in traanvocht en plastic (vb. etafilcon) van contactlenzen



Reinigende poeders voor tapijten:
Elektrostatisch geladen poeders voor betere hechting aan stofdeeltjes

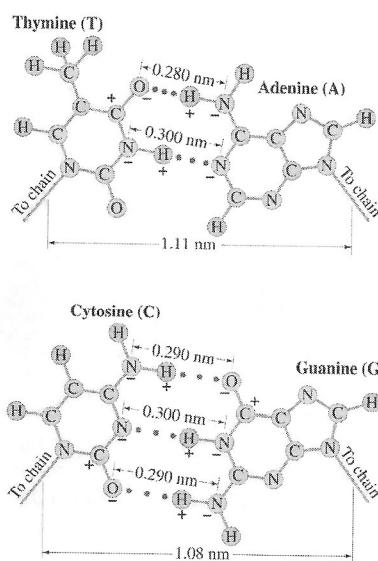
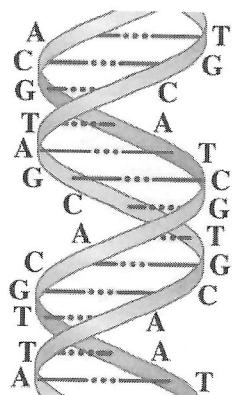


Elektrostatische sproeitechnieken:
Elektrisch geladen vloeistofdruppeltjes voor optimale bedekking van en hechting aan de planten

10

Toepassingen Coulomb-krachten: DNA

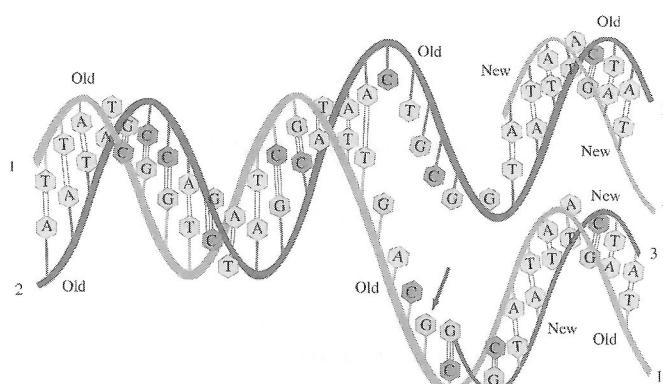
De A-T en G-C nucleotide basen trekken elkaar aan door elektrostatische krachten.



11

Toepassingen Coulomb-krachten: DNA

Replicatie van DNA: in de cel is een 'reservoir' van de basen A, C, G en T aanwezig. Deze moleculen zijn in beweging en botsen regelmatig. Tijdens deze willekeurige botsingen zullen A en T tot mekaar aangetrokken worden, evenals G en C. Andere combinaties zijn elektrostatisch onmogelijk. De Coulombkracht speelt dus een ordenende rol.



12

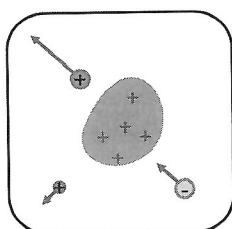
21.6 HET ELEKTRISCH VELD

Krachtveld, krachtwerking op afstand

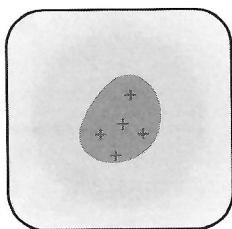
analogie: gravitatiekracht werkt door de ruimte zonder contact tussen de objecten

Gravitatiekrachtveld: in elk punt wordt de gravitatiekracht op massa m voorgesteld

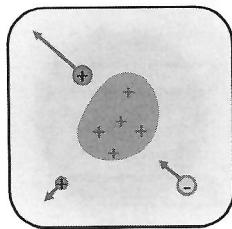
Elektrisch veld



Elektrische kracht tussen ladingen werkt op afstand



Een ladingsverdeling creëert een "elektrisch veld" in de ruimte rond zich



Andere ladingen voelen de elektrische krachtwerking "via het elektrisch veld"

13

21.6 HET ELEKTRISCH VELD

Krachtveld, krachtwerking op afstand

analogie: gravitatiekracht werkt door de ruimte zonder contact tussen de objecten

Gravitatiekrachtveld: in elk punt wordt de gravitatiekracht op massa m voorgesteld

Elektrisch veld

Elektrische ladingsverdeling Q creëert in de ruimte een **elektrisch veld**

(andere) lading q^* zal op elk punt in de ruimte een zekere Coulomb-kracht voelen vanwege het elektrische veld van deze ladingsverdeling.

Testlading q^* : zeer kleine positieve lading die het elektrisch veld van Q niet verstoort

$$\frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^* Q}{r^2} \hat{e}_r}{q^*} \longrightarrow \text{Coulombkracht } q^* \text{ hangt enkel af van de ladingsverdeling die de kracht veroorzaakt en niet van } q^*$$

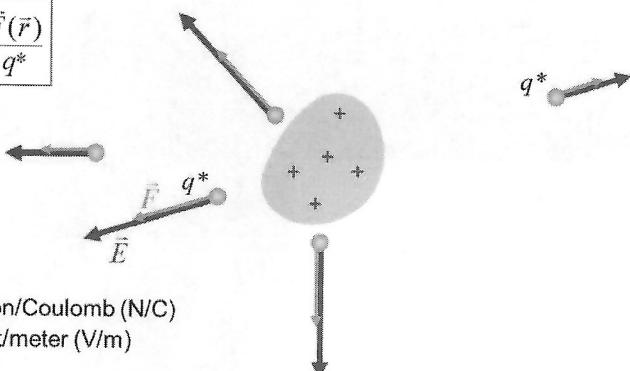
14

Elektrisch veld

Elektrisch veld \vec{E} in een punt in de ruimte =

De elektrische kracht per eenheid van lading die een zeer kleine positieve 'test'lading zou ondervinden in dat punt

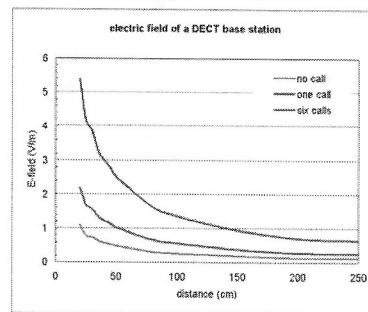
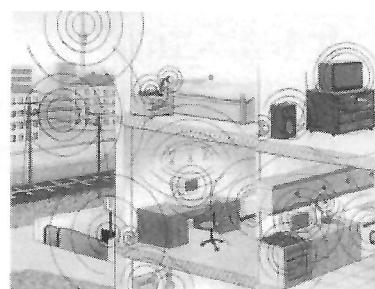
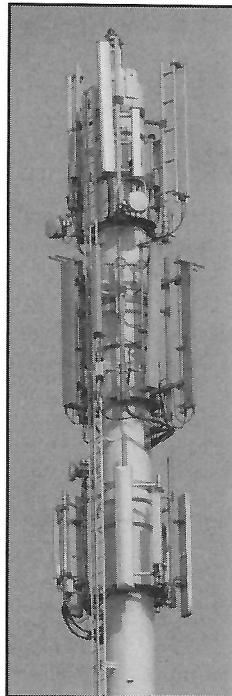
$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q^*}$$



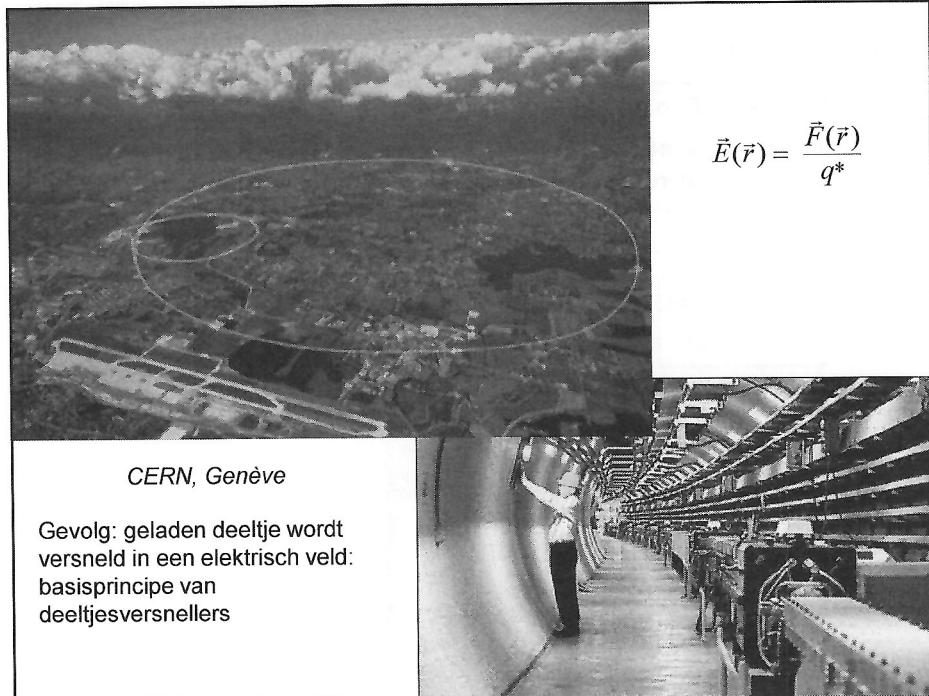
Eenheid: Newton/Coulomb (N/C)
of Volt/meter (V/m)

15

Elektrische veldsterkte: voorbeeld uit dagelijks leven



16



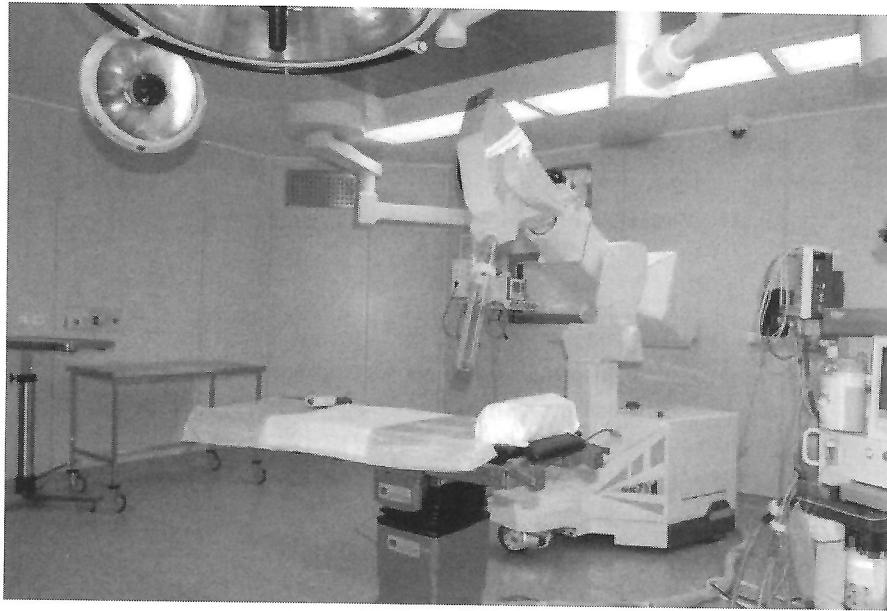
17

Elektronenversneller voor gebruik tijdens operatie



18

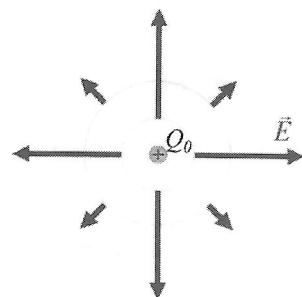
Elektronenversneller voor gebruik tijdens operatie



19

Elektrisch veld van een puntlading Q_0

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}}{q^*} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_0}{r^2} \vec{e}_r \propto \frac{\text{lading}}{\text{afstand}^2}$$



Ladingsverdeling gekend → elektrisch veld berekenen

Elektrisch veld van meerdere puntladingen Q_1, Q_2, \dots

$$\vec{E}(\vec{r}) = \sum_i \vec{E}_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_i \frac{Q_i}{r_i^2} \vec{e}_{r_i}$$

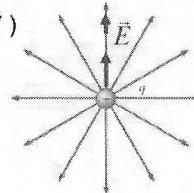
20

21.8 ELEKTRISCHE VELDLIJNEN

Elektrisch veld wordt visueel voorgesteld door **elektrische veldlijnen**

Afspraken:

- \vec{E} is rakend aan de elektrische veldlijnen (**richting van \vec{E}**)
- Zin van veldlijnen = **zin van \vec{E}**
- Dichtheid van veldlijnen evenredig met **grootte** van \vec{E}



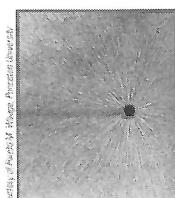
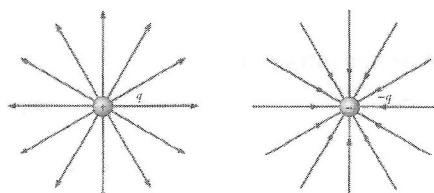
Eigenschappen:

- veldlijnen beginnen bij positieve ladingen en eindigen bij negatieve ladingen
Als er excess-ladingen zijn, beginnen of eindigen sommige veldlijnen ergens oneindig ver.
- het aantal veldlijnen dat vertrekt of aankomt in een lading is evenredig met de grootte van de lading
- veldlijnen kunnen mekaar nooit kruisen

21

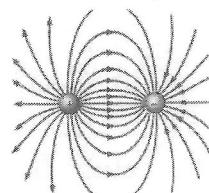
21.8 ELEKTRISCHE VELDLIJNEN

Puntlading

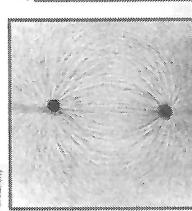


Elektrische dipool

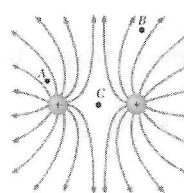
(twee even grote maar tegengestelde elektrische ladingen)



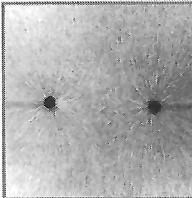
Courtesy of Harold M. Weinstock
Drexel University



Paar van twee gelijke ladingen



Courtesy of Harold M. Weinstock
Drexel University



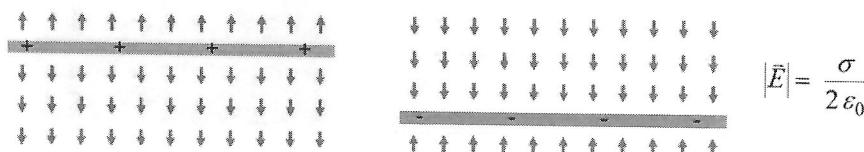
Physics for scientists and engineers, Serway & Jewett, 6th ed.

22

21.10 BEWEGING VAN GELADEN DEELTJE IN ELEKTRISCH VELD

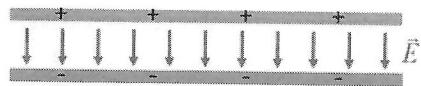
Vlakke condensator

twoe vlakke platen met tegengestelde ladingsdichtheid σ en $-\sigma$



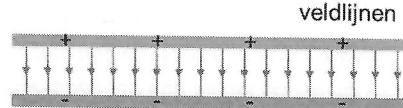
Tussen de platen:

$$\text{homogeen elektrisch veld } E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$



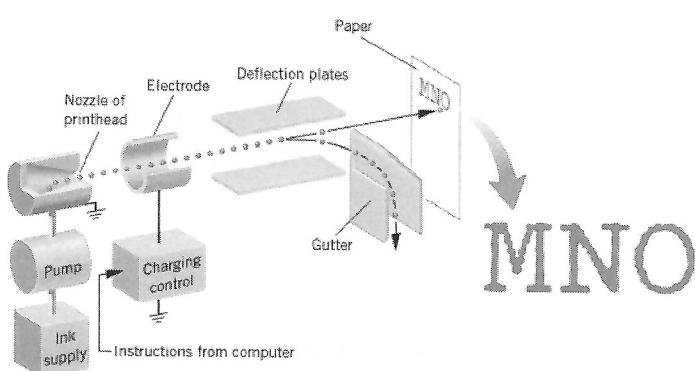
Buiten de platen:

geen elektrisch veld $E = 0$



23

Een toepassing: een inkjet printer



Inkdruppels hebben diameter van ongeveer 1 micrometer

Er worden 150000 druppels per seconde 'gelanceerd' vanuit de printkop die heen en weer gaat over het papier.

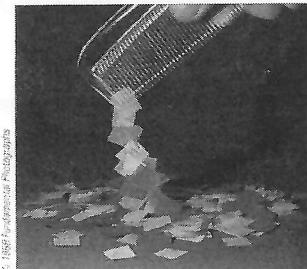
Ongeladen druppels gaan rechtdoor en bereiken het papier. Indien er geen inkt op het blad moet terecht komen, worden de druppels geladen en afgebogen in het elektrische veld.

24

21.4 GEÏNDUCEERDE LADINGEN

Kam elektrisch negatief geladen
bevat excess elektronen

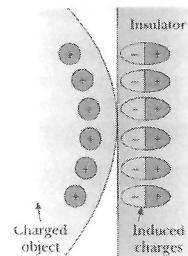
Papiersnippers zijn elektrisch neutraal,
bevatten geen netto lading



Waarom worden papiersnippers aangetrokken door de geladen kam ?

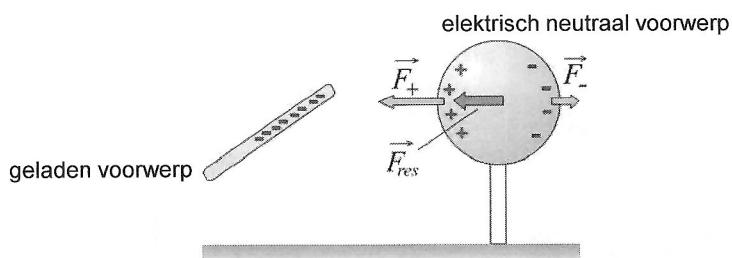
Geladen object **induceert** een ladingsverdeling
op oppervlak van een isolator door
herschikking van de ladingen in de moleculen

*Elektronen in de moleculen van het papier
herschikken zich door de elektrische kracht van de
geladen kam en er ontstaat een 'netto'
geïnduceerde lading aan het oppervlak.*



25

Kracht door een geladen object op een neutraal object



Een geladen voorwerp kan ook een elektrische aantrekkracht uitoefenen op een neutraal voorwerp.

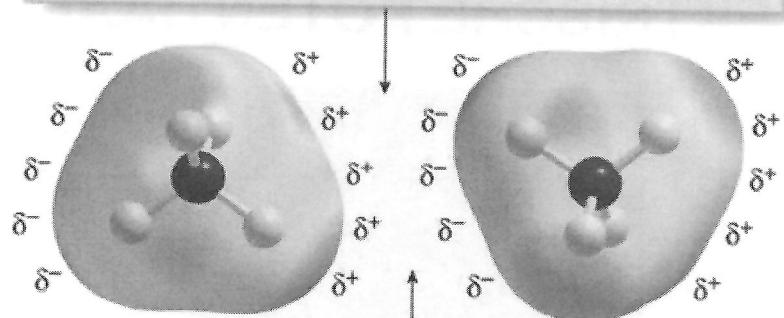
Ook neutrale voorwerpen kunnen zo **elektrische krachten** op elkaar uitoefenen

Voorbeeld: basis van heel wat krachten tussen 'neutrale' moleculen

26

Voorbeeld: van der Waalskracht

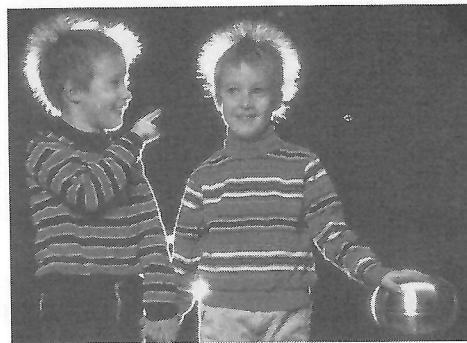
van der Waals interaction between two CH_4 molecules



Unsymmetrical electron density creates a temporary dipole.

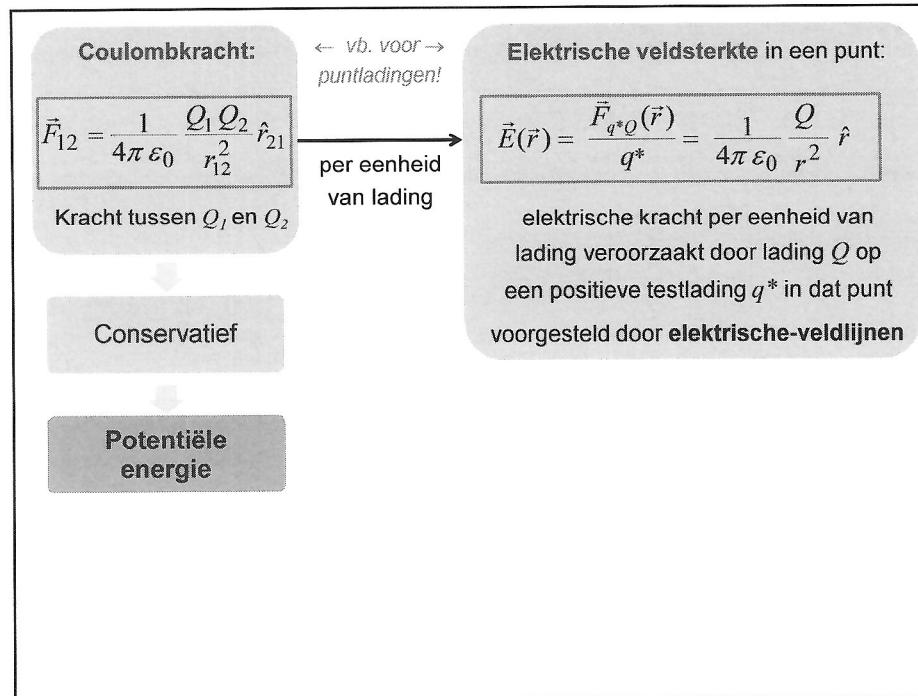
HOOFDSTUK 23

ELEKTRISCHE POTENTIAAL



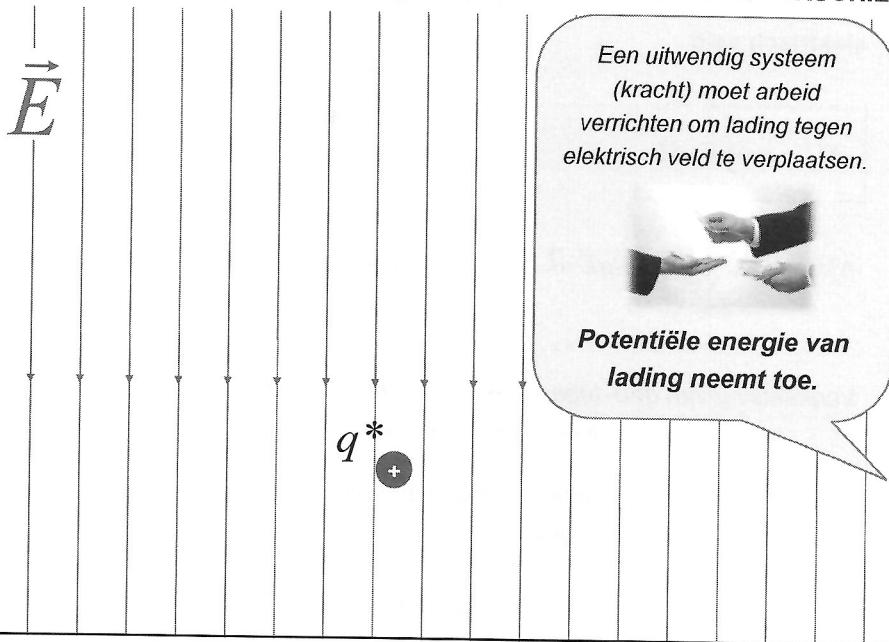
Belangrijkste concepten: elektrische potentiaal, elektrische spanning, Volt

1



2

23.1 ELEKTRISCHE POTENTIËLE ENERGIE EN POTENTIAALVERSCHIL



3

23.1 ELEKTRISCHE POTENTIËLE ENERGIE EN POTENTIAALVERSCHIL

Hoe groot? → algemene definitie potentiële energie:

De verandering van de potentiële energie van het systeem bij verplaatsing van het voorwerp =
het tegengestelde van de arbeid die de conservatieve kracht hierbij verricht.

H8

$$\Delta U \equiv -W_{\vec{F}_{cons}} = - \int_1^2 \vec{F}_{cons} \cdot d\vec{l}$$

Elektrische potentiële energie van een lading in een elektrisch veld

Stel q^* verplaatst a → b in elektrisch veld $\Rightarrow q^*$ ondervindt $\vec{F}_{Coulomb} = q^* \vec{E}$

Verandering van potentiële energie van de lading q^* bij verplaatsing a → b
= - arbeid die de Coulomb-kracht verricht bij verplaatsing van q^*

$$\Delta U = -q^* \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} = -W_{a \rightarrow b}(\vec{F}_{Coulomb})$$

(referentiepositie waar $U = 0$ kiezen we bijv. op ∞)

4

23.1 ELEKTRISCHE POTENTIËLE ENERGIE EN POTENTIAALVERSCHIL

Voorbeeld: een lading q verplaatst evenwijdig met een homogeen elektrisch veld

$$\Delta U = -q \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

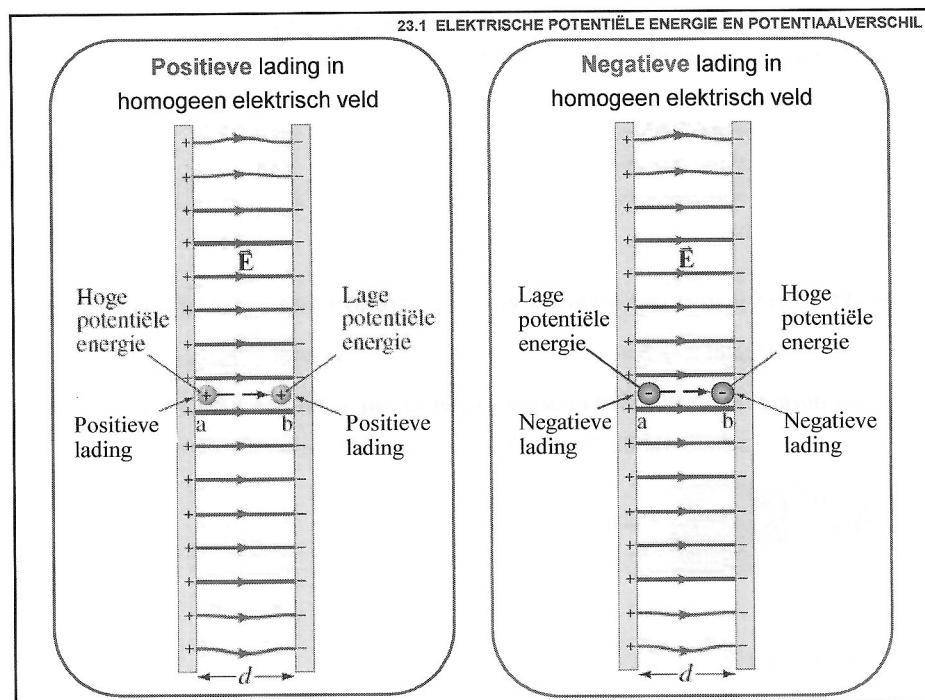
$$\Delta U = -q \vec{E} \cdot \int_a^b d\vec{l} = -q \vec{E} \cdot \vec{d}$$

Verplaatsing van $q>0$ tegen elektrisch veld: $\Rightarrow \Delta U = qEd \Rightarrow U$ stijgt
(tegen elektrische kracht in)

Verplaatsing van $q>0$ volgens elektrisch veld $\Rightarrow \Delta U = -qEd \Rightarrow U$ daalt
(volgens elektrische kracht)

Hoe is dit voor negatieve lading q^* ?

5



6

23.1 ELEKTRISCHE POTENTIËLE ENERGIE EN POTENTIAALVERSCHIL

Elektrische kracht	$\xrightarrow{\text{per ladingseenheid}}$	Elektrisch veld
Elektrische potentiële energie	$\xrightarrow{\text{per ladingseenheid}}$	Elektrische potentiaal

Elektrische potentiaal V

De **elektrische potentiaal** V_a in een punt a in een elektrisch veld
 ≡ de elektrische potentiële energie per eenheid van lading die een positieve testlading in punt a zou bezitten

Scalaire grootheid

$$V_a \equiv \frac{U_a}{q^*} \quad U_a = q^* V_a$$

Eenheid: 1 Volt = 1 $\frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}}$ $1\text{V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{C}}$

7

23.1 ELEKTRISCHE POTENTIËLE ENERGIE EN POTENTIAALVERSCHIL

*Elektrische potentiële energie en potentiaal zijn niet absoluut bepaald ...
... enkel relatief t.o.v referentiewaarde*

Elektrische spanning ≡ potentiaalverschil

De **elektrische spanning** tussen posities a en b
 = het potentiaalverschil tussen posities a en b
 = de potentiaal van b t.o.v. a

$$V_{ba} \equiv V_b - V_a$$

$$V_{ba} = \frac{U_b - U_a}{q^*} = - \frac{W_{F_{Coulomb}(a \rightarrow b)}}{q^*}$$

Eenheid: 1 Volt = 1 $\frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}}$

8

23.2 RELATIE TUSSEN POTENTIAAL EN ELEKTRISCH VELD

$$V_{ba} = V_b - V_a = \frac{U_b - U_a}{q^*} = - \int_a^b \frac{\vec{F}_{Coulomb} \cdot d\vec{\ell}}{q^*} = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

$$= - \frac{W_{a \rightarrow b}(\vec{F}_{Coulomb})}{q^*} = \frac{W_{a \rightarrow b}(\vec{F}_{uitw})}{q^*}$$

potentiaal en spanning zijn onafhankelijk van q^*

De **spanning** tussen twee posities a en b

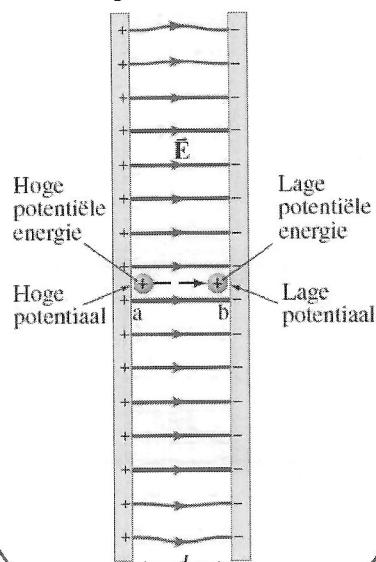
- = – de arbeid per eenheid van lading die de elektrische Coulombkracht verricht bij verplaatsing van een positieve testlading van a → b.
- = + de arbeid per eenheid van lading die een uitwendige kracht moet verrichten om een positieve testlading zonder te versnellen* te verplaatsen van a → b.

* d.w.z. de uitwendige kracht is gelijk in grootte maar tegengesteld gericht aan de Coulomb-kracht

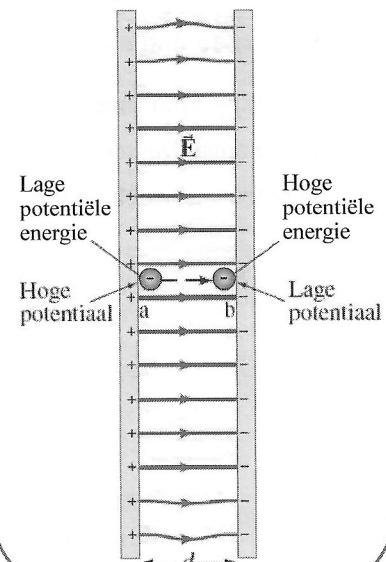
9

23.2 RELATIE TUSSEN POTENTIAAL EN ELEKTRISCH VELD

Positieve lading in homogeen elektrisch veld



Negatieve lading in homogeen elektrisch veld



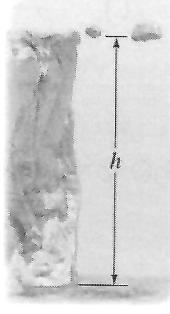
10

Analogie

23.2 RELATIE TUSSEN POTENTIAAL EN ELEKTRISCH VELD

Gravitationele potentiële energie

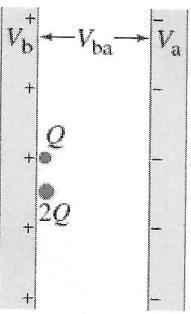
- ~ positie in gravitatie-veld → hoogte
- ~ massa



*Beide stenen bevinden zich op dezelfde hoogte
De zwaarste steen heeft meer potentiële energie*

Elektrische potentiële energie

- ~ positie in elektrisch veld → potentiaal
- ~ lading



*Beide ladingen bevinden zich op dezelfde potentiaal
De grootste (positieve) lading heeft meer potentiële energie*

11

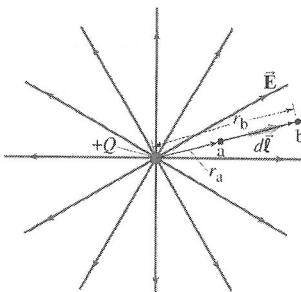
23.3 ELEKTRISCHE POTENTIAAL VAN EEN PUNTLADING

Berekening moet je niet kennen!!!!

$$V_{ba} = V_b - V_a = - \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell} \quad \text{met} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \hat{r}$$

$$\begin{aligned} V_b - V_a &= - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{\hat{r}}{r^2} \cdot d\vec{\ell} = - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_a^b \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right) \end{aligned}$$

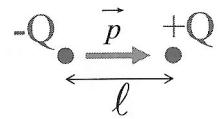
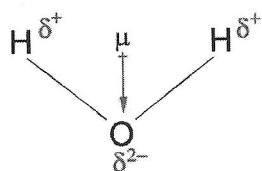
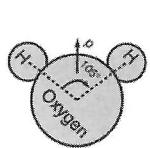
stel $V = 0$ voor $r = \infty$ en
stel $r_b = \infty$ en r_a is een willekeurige afstand r

$$0 - V(r) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(0 - \frac{1}{r} \right) \Leftrightarrow V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$


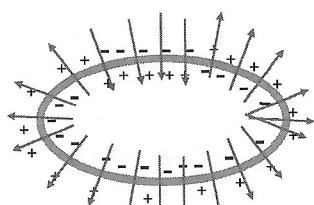
12

23.6 ELEKTRISCHE POTENTIAAL ALS GEVOLG VAN EEN DIPOOL

Ladingsverdelingen: dipool



$$\text{H}_2\text{O}: p = 6,1 \cdot 10^{-29} \text{ Cm}$$



gedepolariseerde cel
wel netto dipoolmoment

13

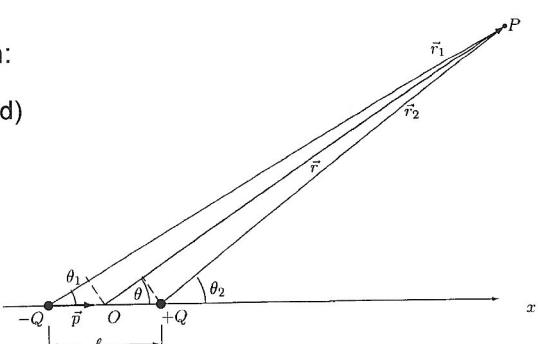
Potentiaal veroorzaakt door dipool

in poolcoördinaten:

(op grote afstand)

$$r_1 \approx r + \frac{l}{2} \cos \theta$$

$$r_2 \approx r - \frac{l}{2} \cos \theta$$



14

Potentiaal veroorzaakt door dipool

$$\begin{aligned}
 V(\vec{r}) &= kQ \left(\frac{-1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \\
 &\simeq kQ \left(-\frac{1}{r + \frac{l}{2} \cos \theta} + \frac{1}{r - \frac{l}{2} \cos \theta} \right) \\
 &\simeq kQ \left(\frac{-(r - \frac{l}{2} \cos \theta) + r + \frac{l}{2} \cos \theta}{r^2 - (\frac{l}{2} \cos \theta)^2} \right) \\
 &\simeq \frac{kQ}{r^2} \left(\frac{l \cos \theta}{1 - (\frac{l}{2r} \cos \theta)^2} \right)
 \end{aligned}$$

$r \gg l$ en dus $l/r \ll 1$, dus tweede term in noemer kan verwaarloosd worden

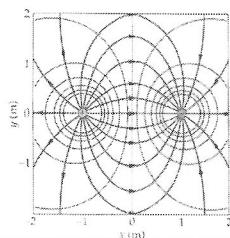
15

Potentiaal veroorzaakt door dipool

$$V(\vec{r}) = \frac{kQl \cos \theta}{r^2} = \frac{\|\vec{p}\| \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

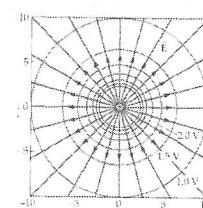
dipool

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2}$$



puntlading
(monopool)

$$V(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}$$

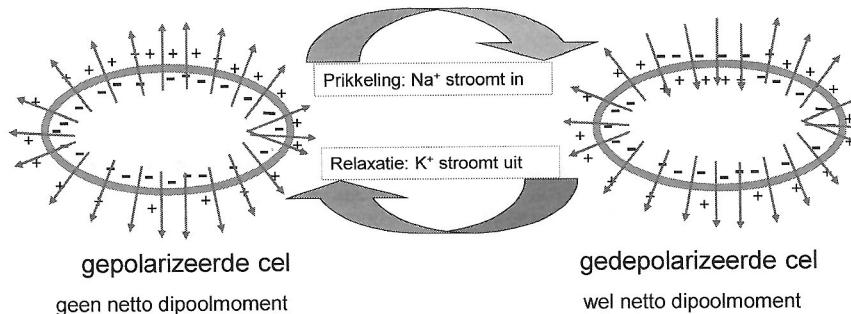


16

Dipool en EKG : celspanning en hartvector

EKG: meting van potentiaalverschillen tussen verschillende goed gekozen locaties op het lichaam. Analyse laat toe de goede werking van het hart te controleren.

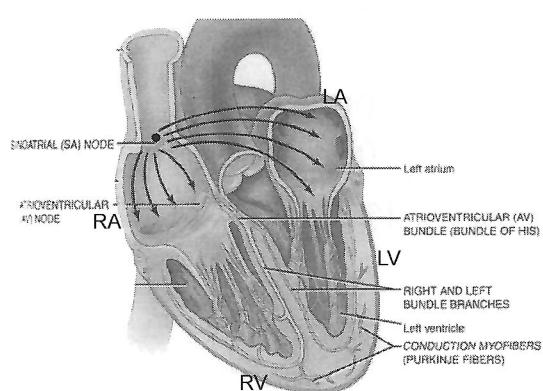
Essentieel: eigenschappen en gedrag van **myocardiale cellen**



17

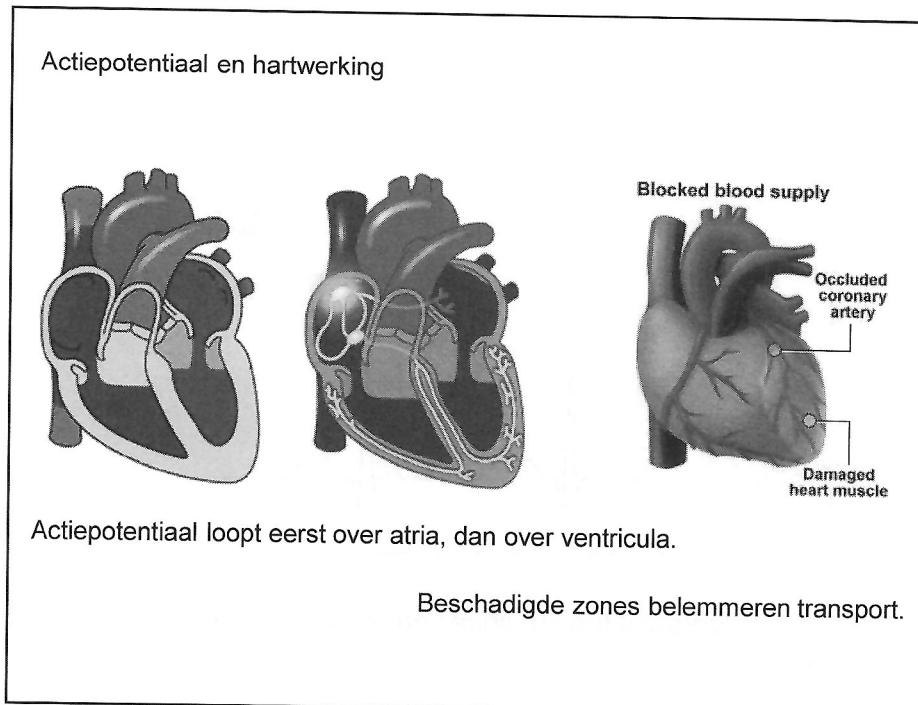
Dipool en EKG: celspanning en hartvector

Dipoolvector

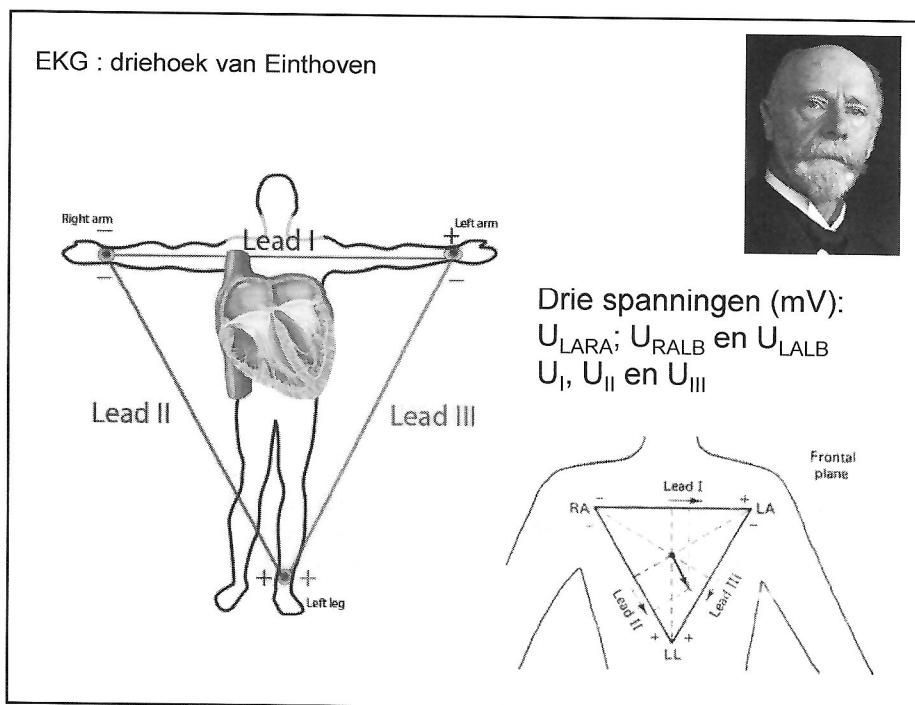


<http://www.nobel.se/medicine/educational/ecg/ecg-readmore.html>

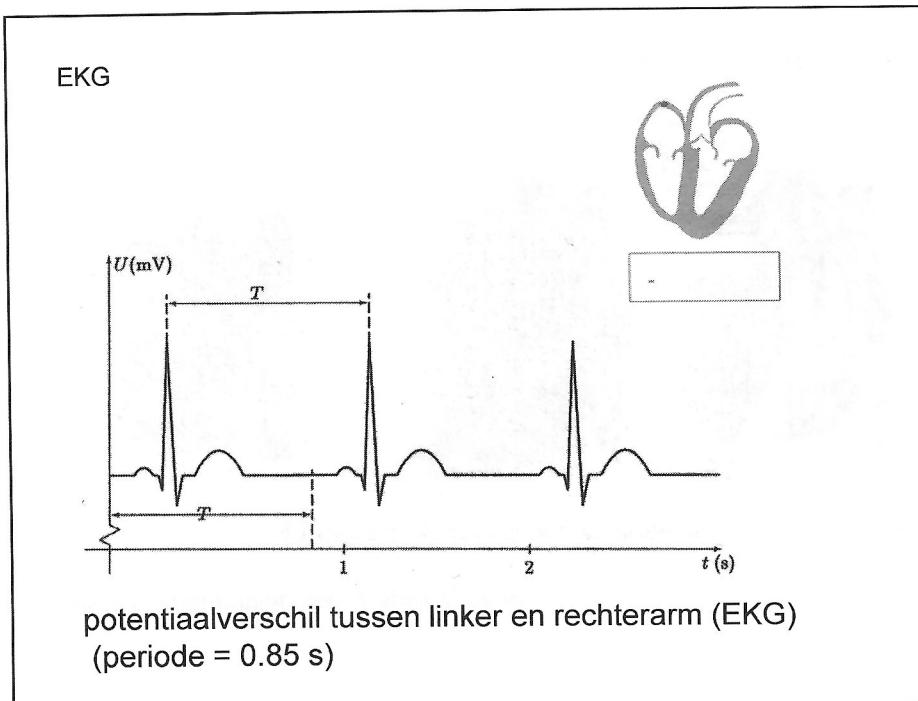
18



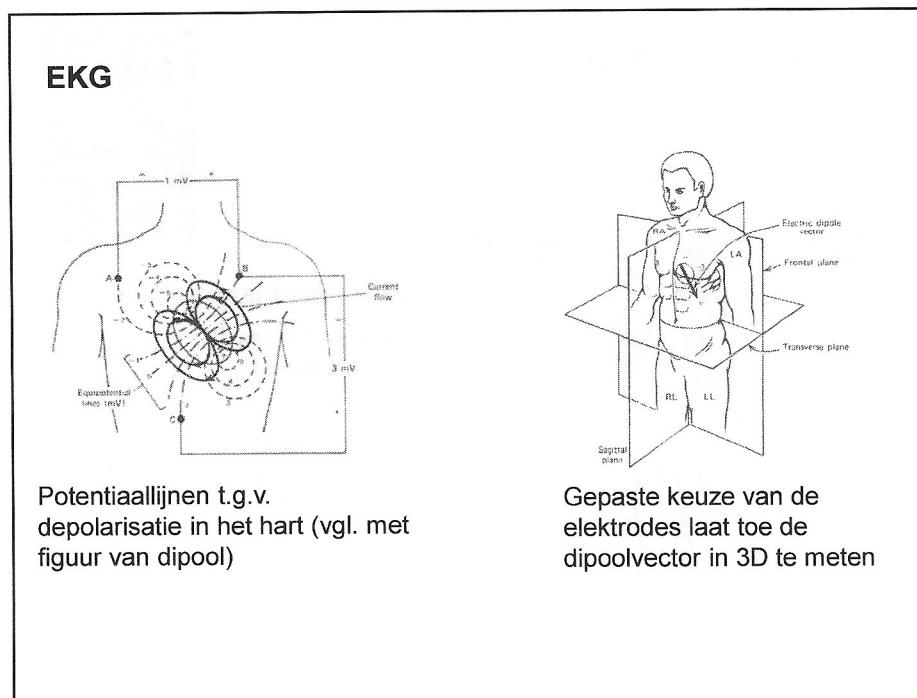
19



20



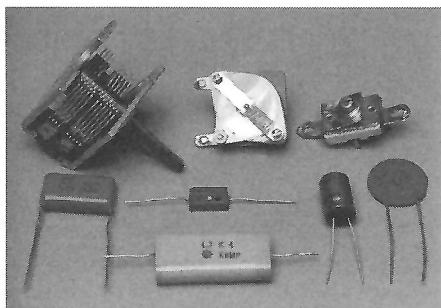
21



22

HOOFDSTUK 24

CAPACITEIT, OPSLAG VAN ELEKTRISCHE ENERGIE



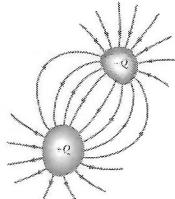
Belangrijkste concepten: condensatoren en capaciteit

1

24.1 CONDENSATOREN

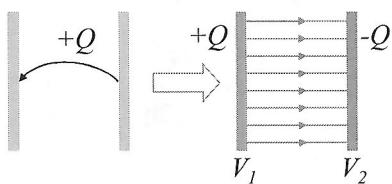
Condensator en capaciteit

Condensator (Engels: 'capacitor') = combinatie van twee geleiders waarop elektrische lading wordt opgeslaan



Lading ~ spanning: $Q \sim V_1 - V_2$

$$\text{Capaciteit} = \frac{\text{lading}}{\text{spanning}} \quad C = \frac{Q}{V}$$



De capaciteit van een condensator is de verhouding tussen de lading Q op de condensator en de spanning V over de condensator.

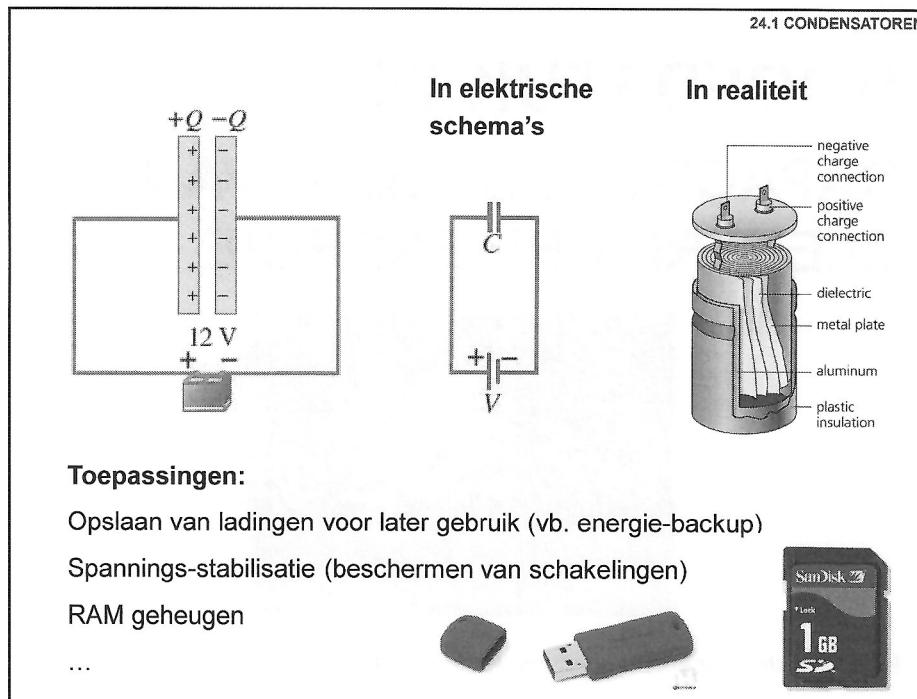
Maat voor de hoeveelheid lading (energie) die kan opgeslaan worden per Volt

Eenheid: 1 Farad = 1 Coulomb / Volt 1 F = 1 C/V

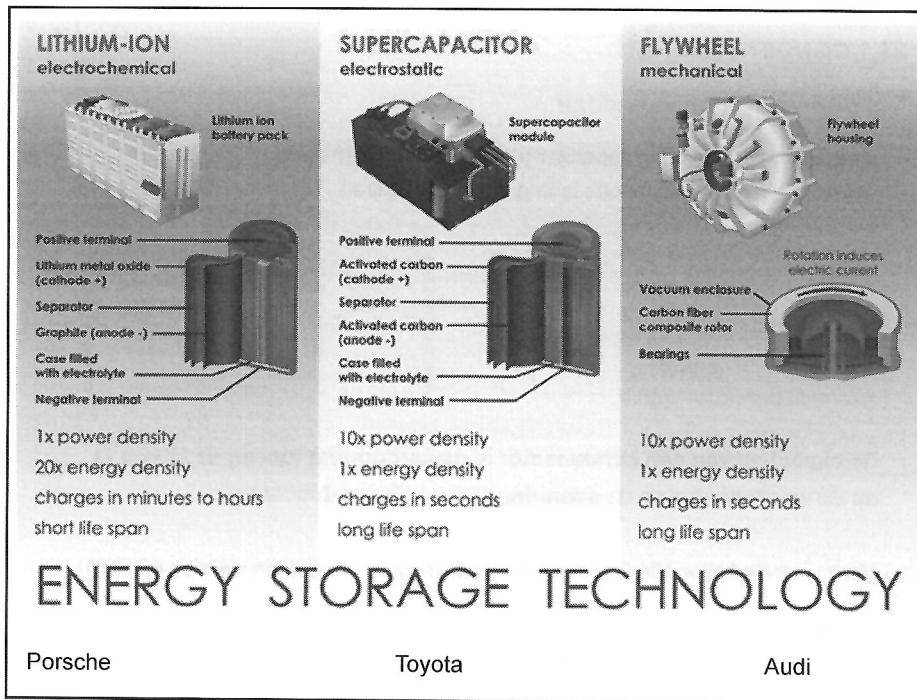
microfarad: 1 $\mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$ picofarad: 1 $\text{pF} = 10^{-12} \text{ F}$

2

24.1 CONDENSATOREN



3



4

Celmembraan als condensator

ELECTRICAL CAPACITOR AND BIOLOGICAL MEMBRANE

Capaciteit van celmembraan is ongeveer 100 pF (d.w.z. behoorlijk veel)

5

24.2 BEPALEN VAN DE CAPACITEIT

Capaciteit van vlakke condensator

Potentiaalverschil: $V_+ - V_- = Ed$

Elektrische veldsterkte: $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$

Capaciteit:
$$C = \frac{Q}{V_+ - V_-} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

groot oppervlak en kleine afstand tussen de platen geeft grote capaciteit

Andere middenstof levert grotere permittiviteit (zie 24.5)

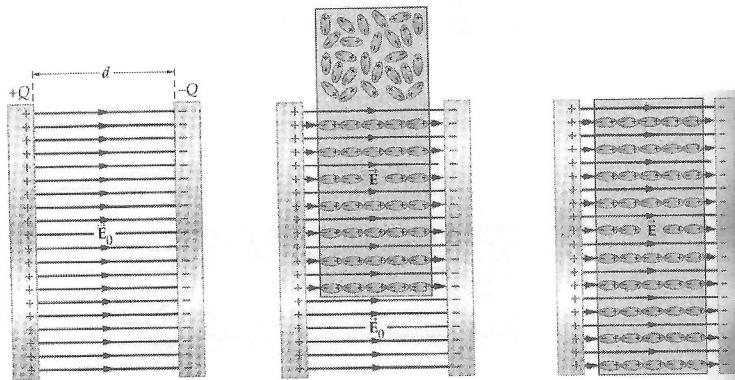
$$\epsilon_0 \rightarrow \epsilon_0 \epsilon_r$$

zodat

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d$$

6

Condensator met dielectricum (middenstof)



De middenstof bestaat uit moleculen die georiënteerd worden in het elektrische veld tussen de platen van de condensator. In het diëlectricum ontstaat een elektrisch veld dat het oorspronkelijke veld deels compenseert. De veldsterkte wordt minder, dus bijgevolg ook het spanningsverschil tussen de platen. Aangezien de hoeveelheid lading dezelfde blijft, stijgt de capaciteit.

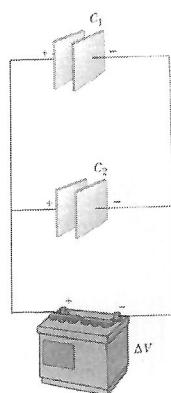
7

24.3 CONDENSATOREN IN SERIE EN PARALLEL

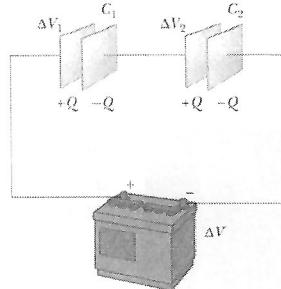
In elektrische circuits: vaak combinaties van condensatoren

Equivalent capaciteit = capaciteit van één condensator met dezelfde opslag van lading per Volt als de combinatie

Parallelschakeling

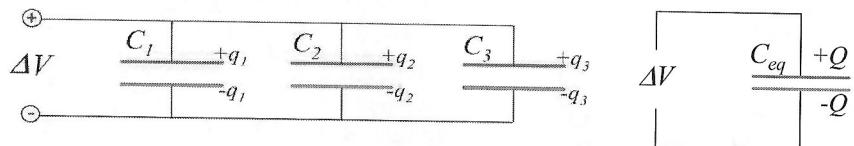


Serieschakeling



8

Parallelschakeling van condensatoren → Toename van capaciteit



Dezelfde spanning over elk van de condensatoren: $\Delta V = \frac{q_1}{C_1} = \frac{q_2}{C_2} = \frac{q_3}{C_3}$

Lading op elke condensator: $q_1 = C_1 \Delta V \quad q_2 = C_2 \Delta V \quad q_3 = C_3 \Delta V, \dots$

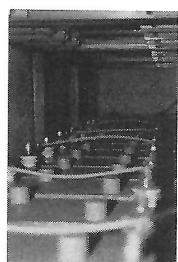
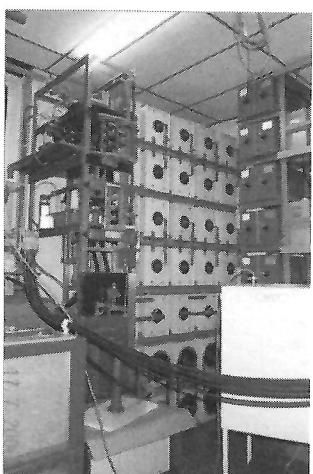
Totale lading opgeslaan in schakeling: $Q = q_1 + q_2 + q_3 = (C_1 + C_2 + C_3) \Delta V$

$$\text{Equivalent capaciteit: } C_{eq} = \frac{Q}{\Delta V} = C_1 + C_2 + C_3 \quad C_{eq} = \sum_1^N C_i$$

9

Toepassing

Condensatorbank voor het opwekken van gepulste magneetvelden



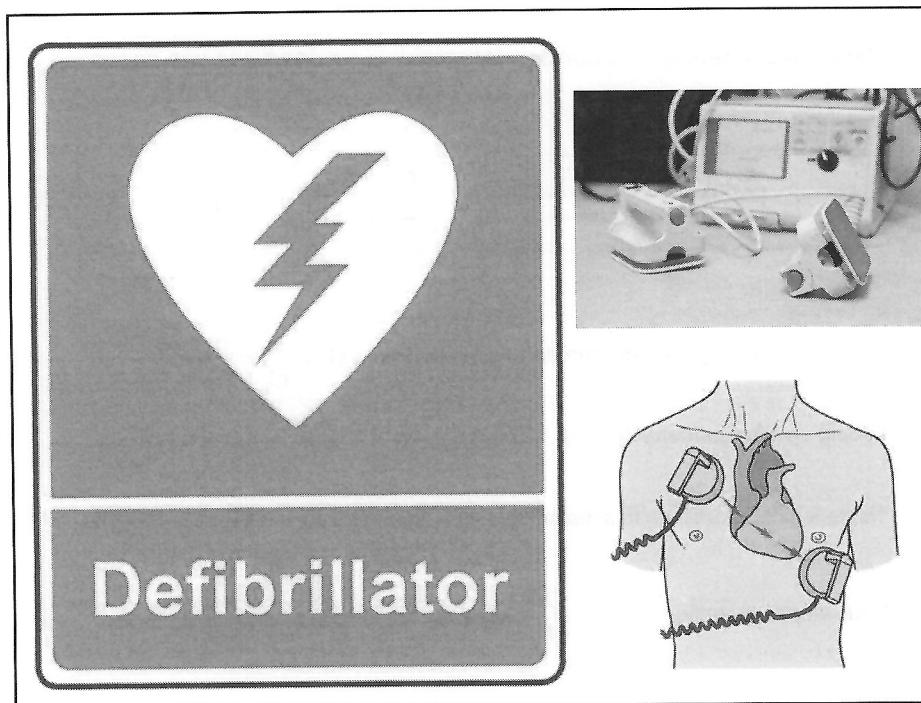
5 kV condensatoren

Condensatorbank met een totale energie van 600 kJ; $C=0,05 F$

Deze kan gedurende enkele milliseconden magneetvelden opwekken tot 70 T
(=700000 maal het aardveld)

<http://www.kuleuven.be/fys/vsm>

10



11

Serieschakeling van condensatoren

Lading: $q_1 = q_2 = q_3 = Q$

Spanning over elk van de condensatoren:

$$\Delta V_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \Delta V_2 = \frac{Q}{C_2} \quad \Delta V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

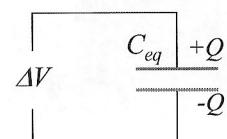
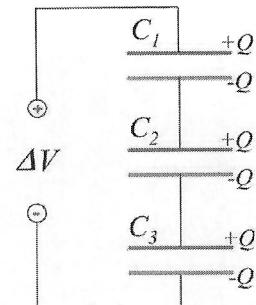
Totale spanning over de schakeling:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 + \Delta V_3 = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

Equivalent capaciteit: $\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$

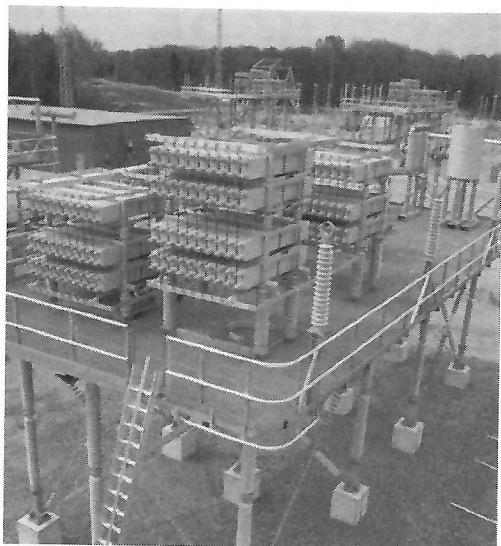
$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$$

\rightarrow daling van capaciteit



12

Serieschakeling van condensatoren: toepassing



Verminderen van verliezen bij hoogspanningslijnen

13

24.4 OPSLAG VAN ELEKTRISCHE ENERGIE

Er moet arbeid geleverd worden om een condensator op te laden

Geleverde arbeid aan condensator = toename van energie van de condensator

Elektrische energie opgeslagen in een condensator

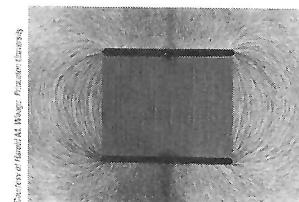
= geleverde energie (arbeid) bij opladen van condensator van lading $q = 0 \rightarrow Q$

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} \quad (\text{zonder bewijs})$$

$$\downarrow \quad E = \frac{Q}{\epsilon_0 A} \quad \text{en} \quad C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 Ad$$

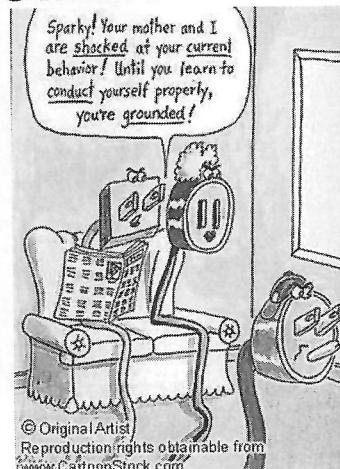
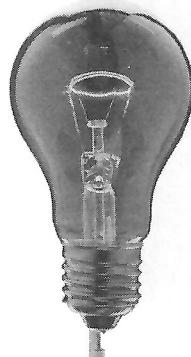
Algemeen: **energiedichtheid** van elektrisch veld



14

HOOFDSTUK 25

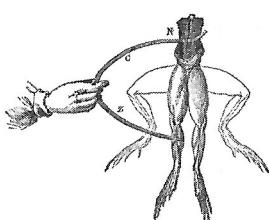
ELEKTRISCHE STROMEN EN WEERSTAND



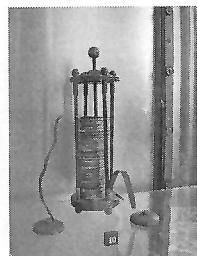
1

25.1 DE ELEKTRISCHE BATTERIJ

<http://www.youtube.com/watch?v=yS7IKdas5D4>



Luigi Galvani (1780):
statische elektriciteit doet
spieren van een kikker
samentrekken.
Volgens Galvani ligt de
oorsprong van de elektriciteit
bij het dier.



Alessandro Volta
meende dat de elektriciteit
het gevolg was van het
contact tussen
verschillende metalen.

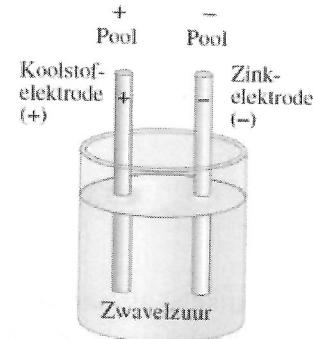


2

Elektrische cellen en batterijen

25.1 DE ELEKTRISCHE BATTERIJ

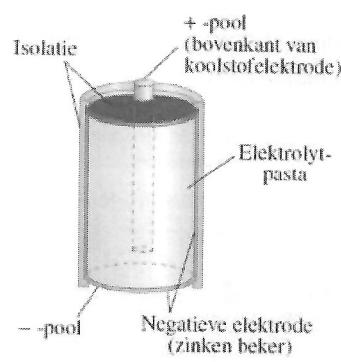
- Zink lost op in zwavelzuur (**elektrolyt**):
 - elk zinkatoom laat twee elektronen achter in de elektrode en komt in de oplossing als een positief ion.
 - De **zinkelektrode** wordt **negatief** geladen.
- De positief geladen elektrolyt trekt elektronen los van de koolstofelektrode
 - De **koolstofelektrode** wordt **positief** geladen.



Resultaat: potentiaalverschil tussen de elektroden.

Proces stopt indien de ladingen niet kunnen wegvloeien

3



(a) Een D-cel



(b) Twee AA-batterijen

Moderne 'droge' batterij: zinken beker, met daarin elektrolytpasta en een koolstofelektrode.

4

25.2 ELEKTRISCHE STROOM

Schematische voorstelling van een batterij

Wanneer een **gesloten kring** gemaakt wordt, kan er een elektrische stroom lopen.

Elektrische stroom door een geleider = hoeveelheid lading die per tijdsinterval door de doorsnede van een geleider stroomt

gemiddeld $\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$ momentaan $I(t) = \frac{dQ}{dt}$

SI-eenheid: 1 **Ampère** = 1 A = 1 C/s

5

Conventie stroomzin

Om historische redenen is de conventionele stroomzin tegengesteld aan de effectieve bewegingsrichting van elektronen.

6

25.3 DE WET VAN OHM: WEERSTAND



$I \propto V$ De stroom is evenredig met het potentiaalverschil

$I \propto \frac{1}{R}$ De stroom is omgekeerd evenredig met de 'elektrische weerstand' van de geleider

$$\rightarrow I = \frac{V}{R} \quad \text{of} \quad V = IR$$

Elektrische weerstand = $\frac{\text{spanning}}{\text{stroom}}$ $R = V/I$

Eenheid: 1 Ohm = $1 \frac{\text{Volt}}{\text{Ampère}}$ $1 \Omega = 1 \text{ V/A}$

Volgens de (empirische) **wet van Ohm** is de weerstand van metalen geleiders onafhankelijk van de spanning: $R = V/I = \text{constant}$

<http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/ohmslaw/index.html>

7

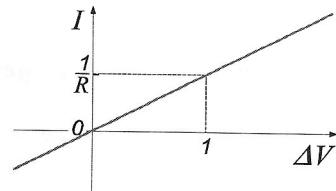
25.3 DE WET VAN OHM: WEERSTAND

Ohmse geleider

voldoet aan de wet van Ohm
R onafhankelijk van V

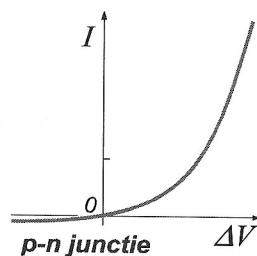
Lineair verband tussen spanning en stroom
→ helling levert weerstand

$$I = \frac{\Delta V}{R}$$



De wet van Ohm is niet universeel geldig

Tegenvoorbeeld: gelijkrichter
Halfgeleider diode (p-n junc tie)



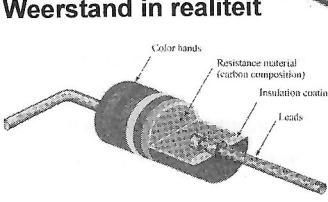
8

25.3 DE WET VAN OHM: WEERSTAND

Weerstand in elektronisch schema



Weerstand in realiteit



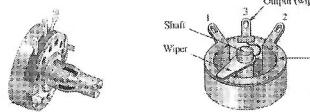
Koolstof-weerstand





Hoog-vermogen weerstand





(a) Typical 5 W potentiometer
(b) Basic construct

Potentiometer



(a) Outside view
(b) Cutaway view



Fijnafregeling

9

25.4 SOORTELIJKE WEERSTAND

Weerstand van een draadgeleider (wet van Pouillet):

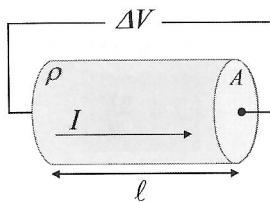
$$R = (\rho) \frac{\ell}{A}$$

↓

Soortelijke weerstand of resistiviteit ρ

Materiaalconstante
SI-eenheid: $1 \Omega \cdot m$





$$\rho = \frac{\Delta V \cdot A}{I \cdot l}$$

Soortelijke geleidingsvermogen of conductiviteit σ

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

Materiaalconstante
SI-eenheid: $1 (\Omega \cdot m)^{-1}$

10

25.4 SOORTELIJKE WEERSTAND

Temperatuursafhankelijkheid van resistiviteit

$$\rho_T = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_o)]$$

→ α = temperatuurcoëfficiënt
(maat voor temperatuurgevoeligheid
van de resistiviteit)

Toepassing:

thermometers: $T - T_o = \frac{R - R_o}{\alpha R_o}$

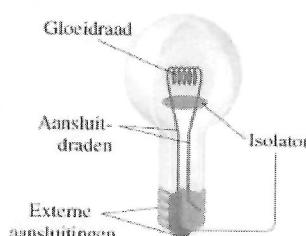


Koortsthermometer: meet m.b.v. nauwkeurig gecalibreerde weerstand de weerstandsverandering t.g.v. de verhoogde temperatuur van de patient.

11

25.5 ELEKTRISCH VERMOGEN

Draadweerstand: elektrische energie wordt omgezet in thermische energie.



Gloeilamp: elektrische energie wordt omgezet in zichtbaar licht (enkele procent) en thermische energie (meer dan 90%)

HOE? elektronen botsen met ionen, geven deel van hun kinetische energie af, kinetische energie van ionen stijgt, metaal warmt op.
Thermische energie wordt gedissipeerd naar de omgeving

12

25.5 ELEKTRISCH VERMOGEN

Hoeveel energie wordt door het apparaat in de omgeving gedissipeerd?

m.a.w.

Hoeveel energie wordt door de ladingen afgestaan aan het apparaat (weerstand)?

m.a.w.

Hoeveel energie verliezen de ladingen in het apparaat (in de weerstand)?

Stel lading dq doorloopt het potentiaalverschil V over het apparaat

\Rightarrow **energie** van lading verandert: $dU = dq V$

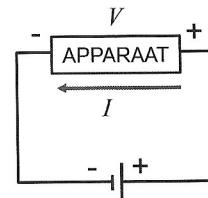
Dit is de energie
die wordt omgezet
in het apparaat

Stel dit gebeurt in een tijd dt

\Rightarrow **elektrisch vermogen** = tempo waaraan elektrische energie wordt omgezet

$$P = \frac{dU}{dt} = \frac{dq}{dt} V = IV$$

$$P = IV = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

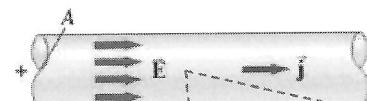


13

25.8 MICROSCOPISCH... STROOMDICHTHEID EN DRIFTSNELHEID

Stroomdichtheid = elektrische stroom per oppervlakte-eenheid loodrecht op de richting van de stroom

$$|\vec{j}| = \frac{|I|}{A}$$



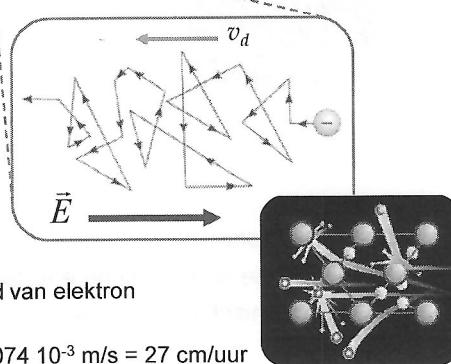
Dimensie: $I L^{-2}$
SI-eenheid: $1 A/m^2$

Elektronen bewegen tegen het elektrische veld in en botsen daarbij veelvuldig met de ionen van het rooster.

Ze bereiken een constante gemiddelde snelheid:
driftsnelheid

driftsnelheid \ll absolute (baan)snelheid van elektron

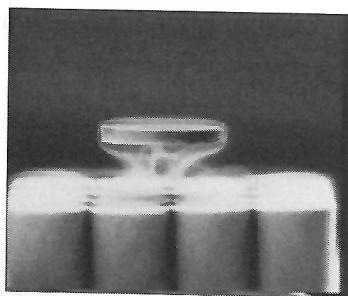
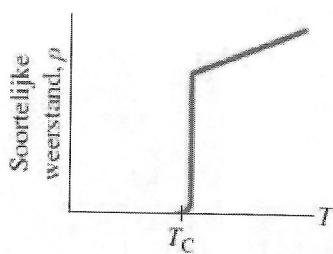
vb. 1A door koperdraad 1 mm^2 $v_d = 0,074 \cdot 10^{-3}\text{ m/s} = 27\text{ cm/uur}$



14

25.9 SUPERGELEIDING: weerstand nul!

Toepassingen: opwekken van magneetvelden d.m.v. hoge stromen

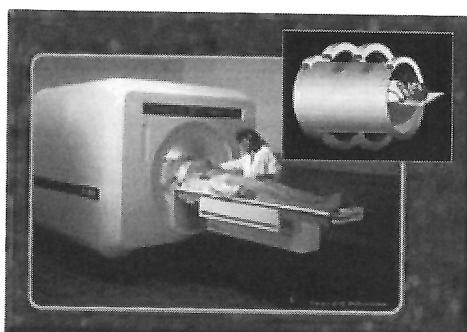


*Supergeleidende spoelen kunnen velden opwekken tot ongeveer 25 T
(500000 x krachtiger dan magneetveld van aarde)*

Beperking: supergeleiding treedt slechts op bij lage temperaturen!
Bv. Pb@7.2 K, Nb@9 K, Nb₃Sn@13 K

15

Toepassingen in medische sector: MRI

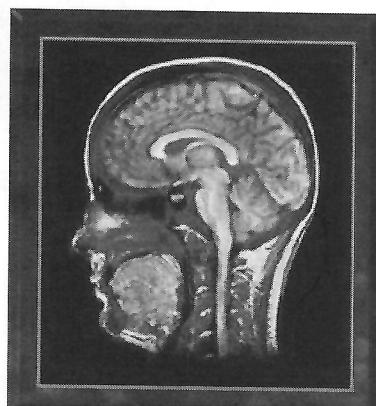


MRI-scanner

Magnetic Resonance Imaging

*Gebaseerd op 'aanspreken'
(resoneren) van waterstofatomen in lichaam*

Zeer precieze controle over magneetveld vereist

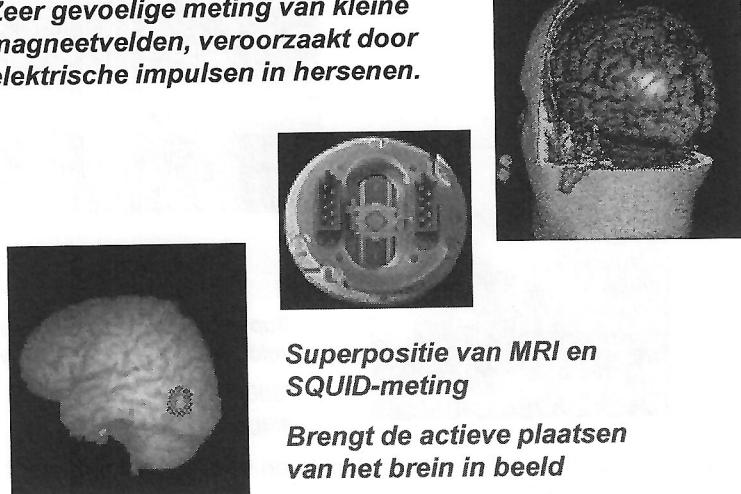


16

Toepassingen: hersenonderzoek m.b.v. SQUID

Superconducting Quantum Interference Device

Zeer gevoelige meting van kleine magneetvelden, veroorzaakt door elektrische impulsen in hersenen.

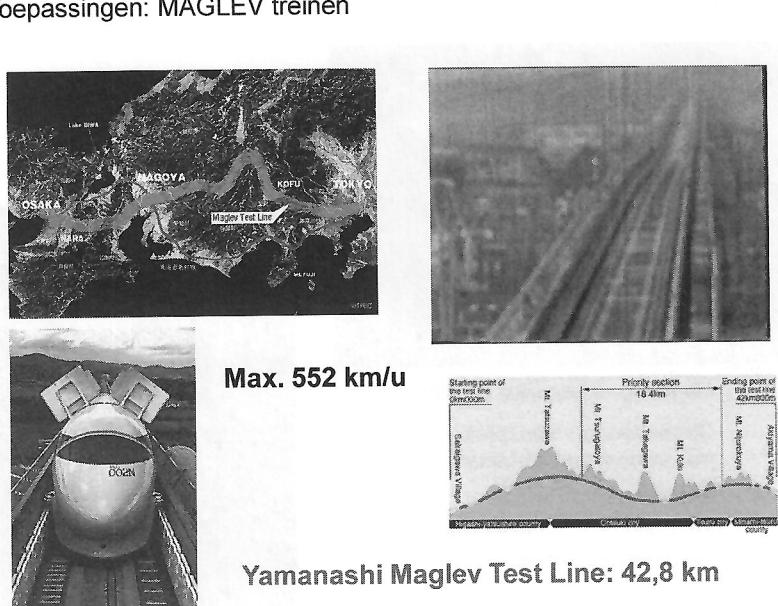


Superpositie van MRI en SQUID-meting

Brengt de actieve plaatsen van het brein in beeld

17

Toepassingen: MAGLEV treinen



Max. 552 km/u

Yamanashi Maglev Test Line: 42,8 km

18

Interessante links:

<https://www.youtube.com/watch?v=rEwGeA-ws6E>

<https://www.youtube.com/watch?v=mKb5fZHsJ3c>

<https://www.youtube.com/watch?v=MnxQDvyP8Lc>

<https://www.youtube.com/watch?v=8x8Vf8UtElQ>

<https://www.youtube.com/watch?v=aqAJemM6xYs>

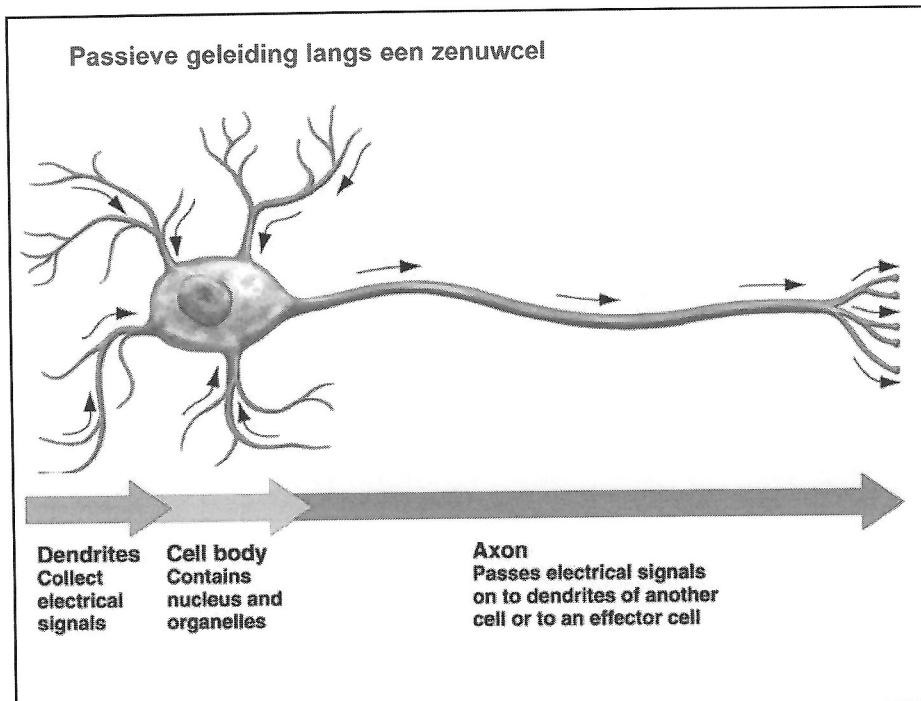
https://www.youtube.com/watch?v=kxd_BqQMvck

19

25.10 Elektrische geleiding in het zenuwstelsel



20



21

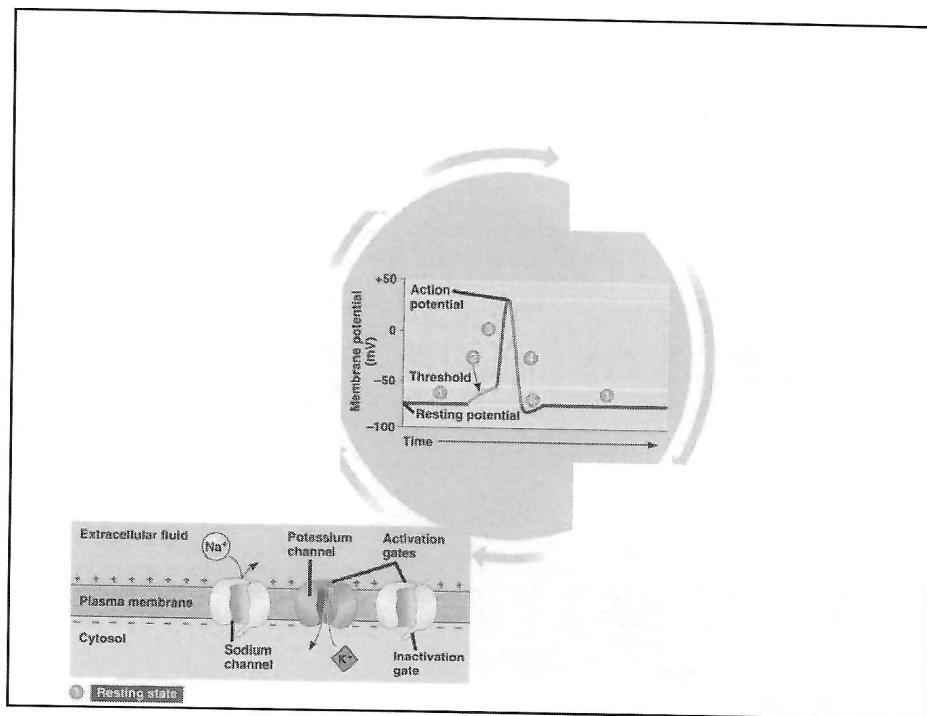
In rusttoestand is interne potentiaal -70 mV en is het celmembraan volledig gepolariseerd.

Door prikkeling kan het membraan lokaal gedepolariseerd worden: er gebeurt hierbij een instroom van Na^+ ionen. De potentiaal stijgt tot ongeveer 30 mV

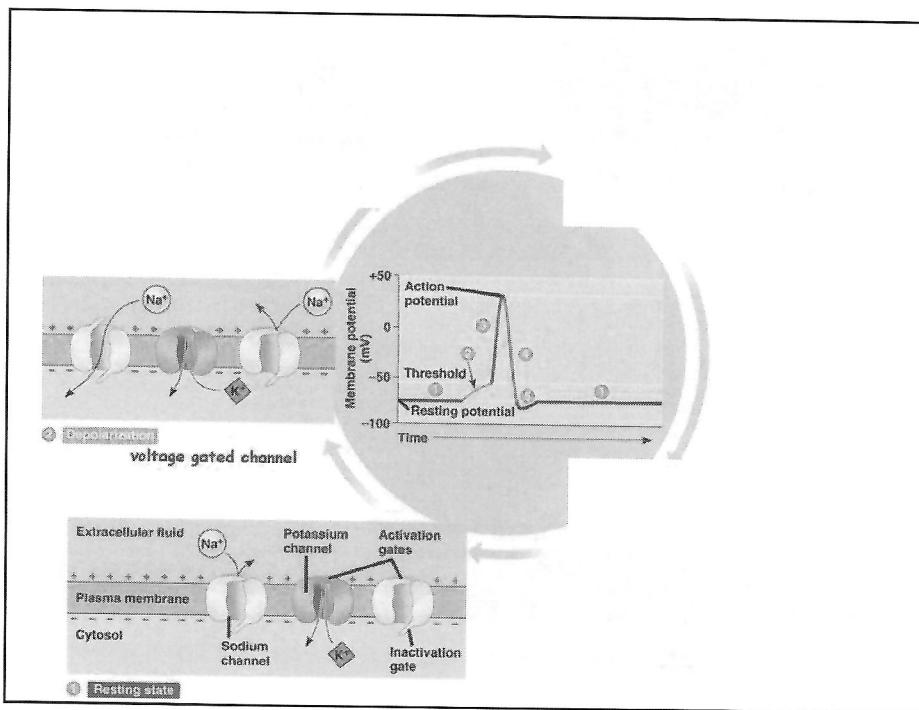
De potentiaal zakt terug naar zijn oorspronkelijke waarde door de uitstroom van K^+ ionen. Ondertussen is ook het naburige deel van het membraan gedepolariseerd.

In geval van een mondeling examen over deze materie: <http://www.youtube.com/watch?v=Pfu1DE9PK2w>

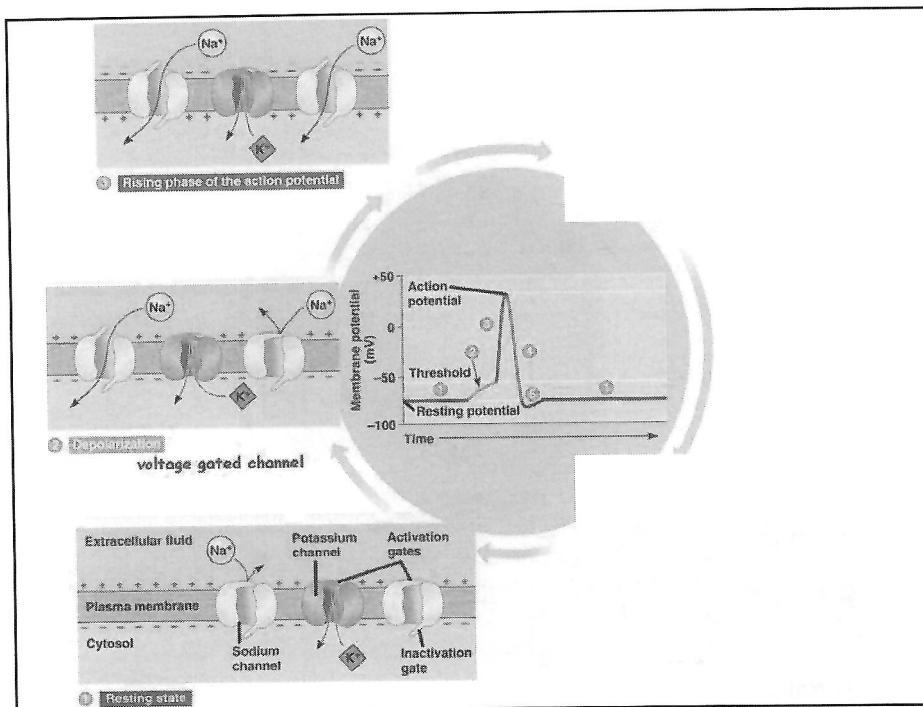
22



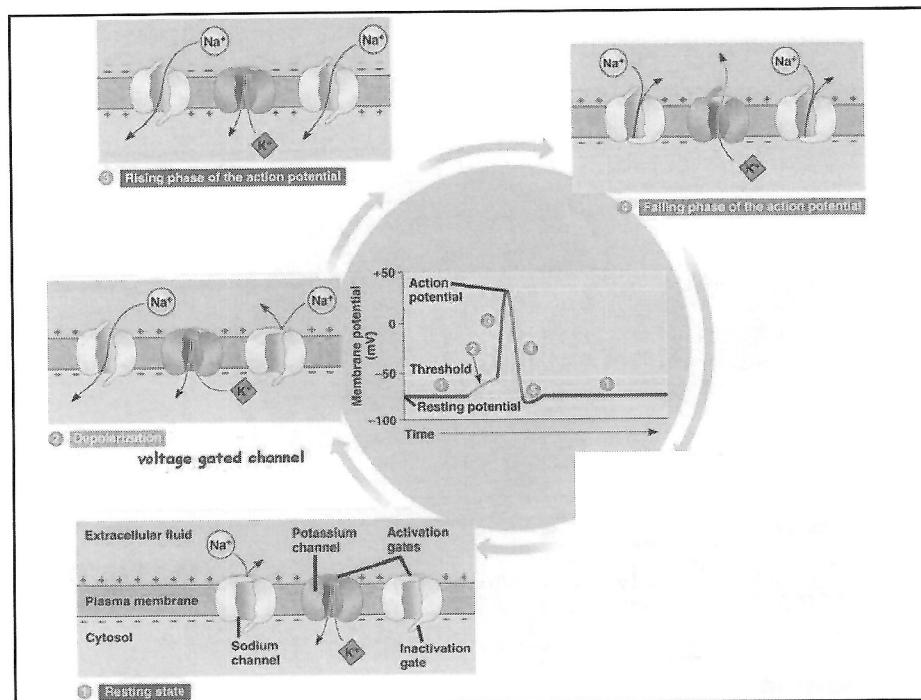
23



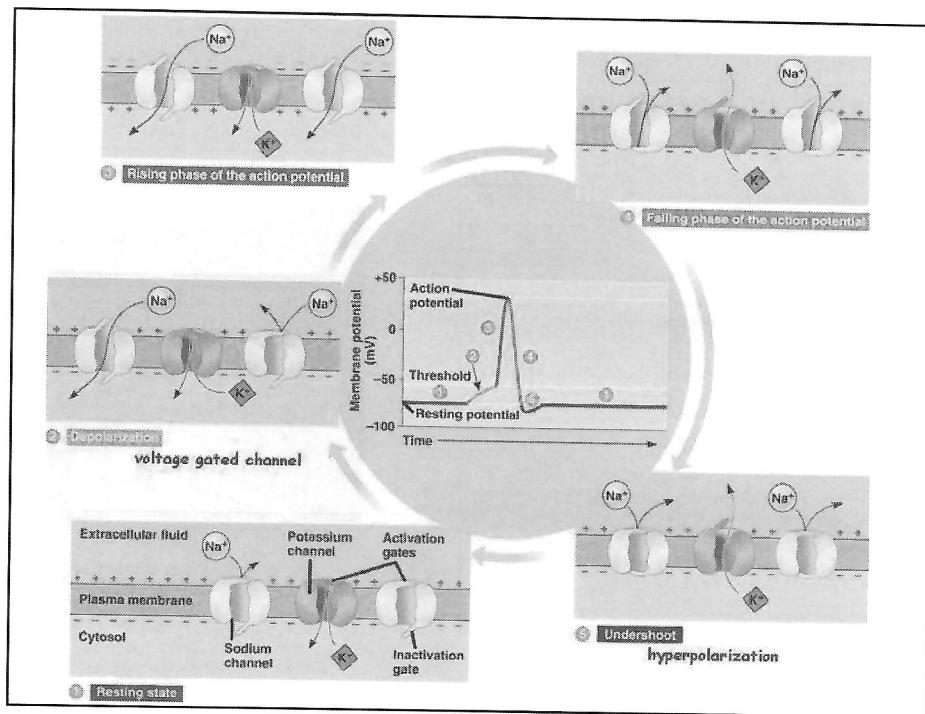
24



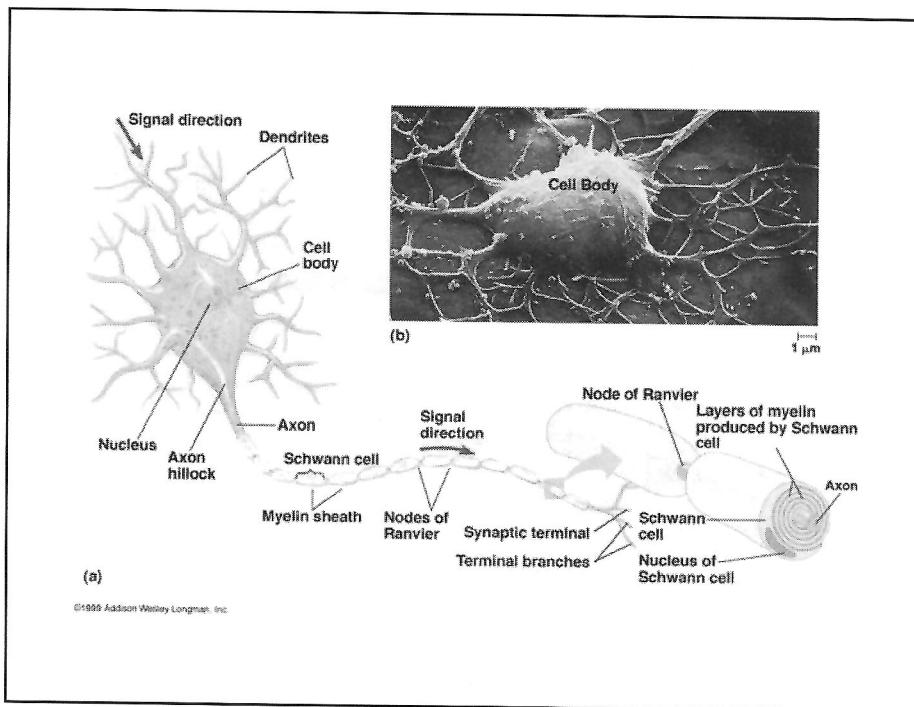
25



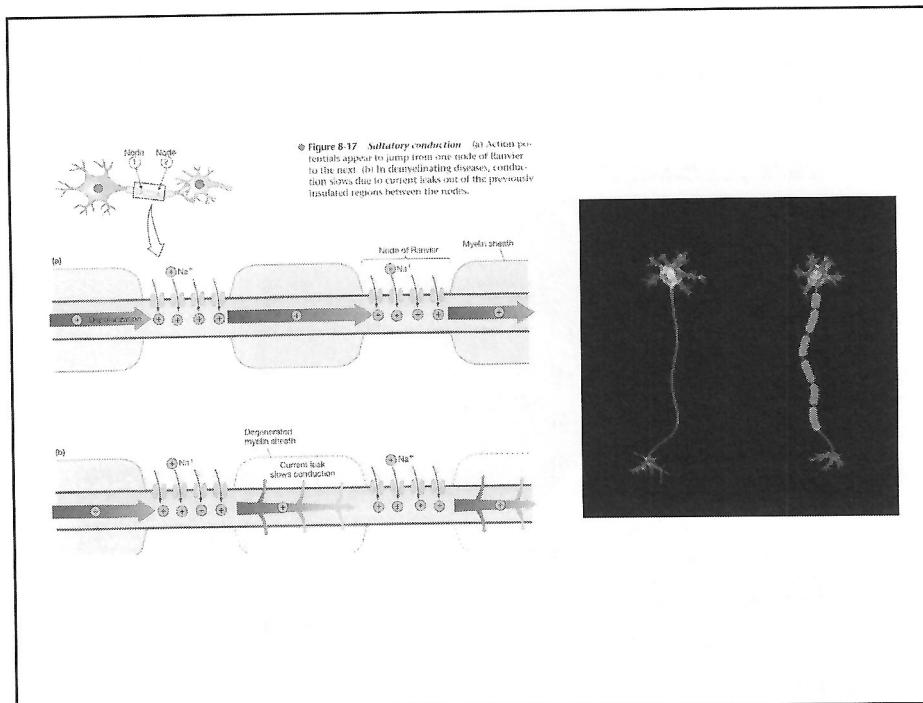
26



27

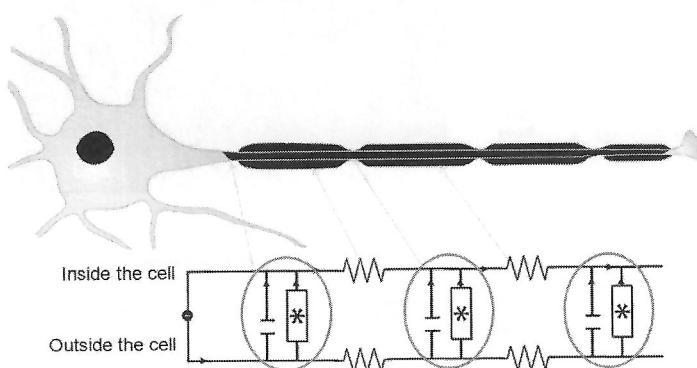


28



29

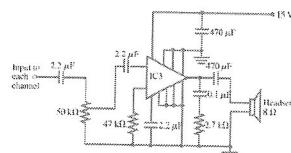
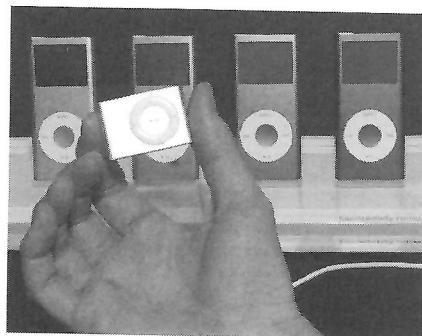
Modellering: circuit met combinatie van weerstanden en condensatoren



30

Hoofdstuk 26

Gelijkstroomschakelingen

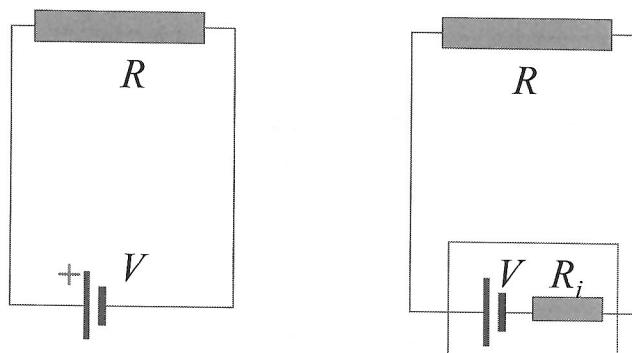


1

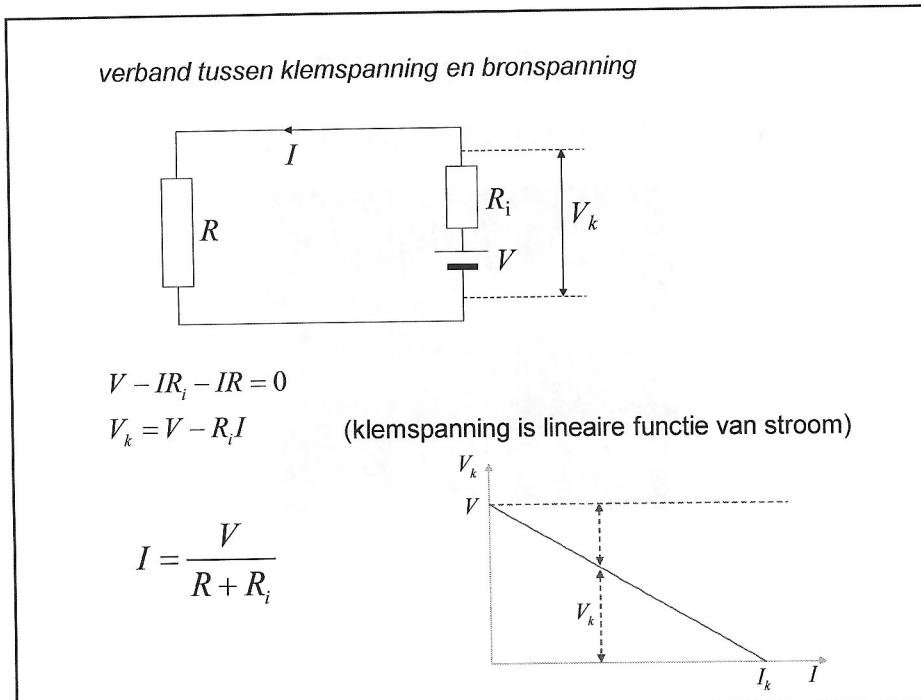
26.1 ELEKTROMOTORISCHE KRACHT (emk) EN KLEMSPANNING

Batterij: levert quasi constant potentiaalverschil, behalve wanneer er een grote stroom moet lopen. (inwendige weerstand)

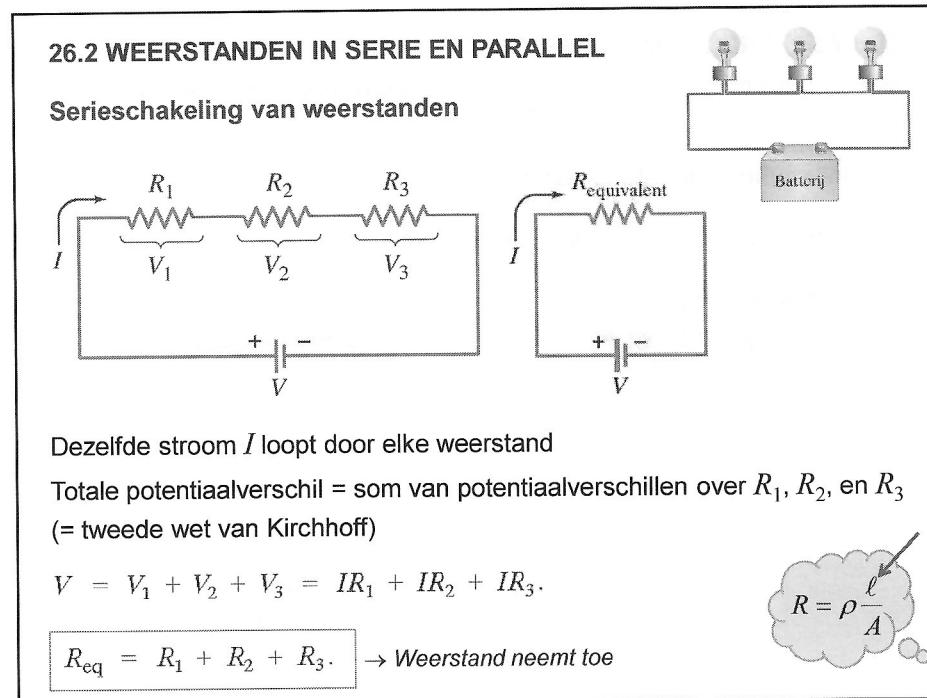
- **inwendige weerstand van de bron (R_i)**
- **bronspanning:** spanning die ideale bron kan leveren (emk) (V)
- **klemspanning:** reële spanning (V_{ab})



2



3



4

Parallelschakeling van weerstanden

26.2 WEERSTANDEN IN SERIE EN PARALLEL

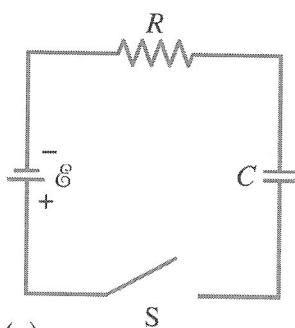
Het potentiaalverschil over alle weerstanden is hetzelfde ($=V$);
De totale stroom I verdeelt zich over de verschillende takken:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \Leftrightarrow \frac{V}{R_{\text{eq}}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3}.$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \rightarrow \text{Weerstand daalt}$$

R = ρ ℓ / A

5

26.5 SCHAKELINGEN MET WEERSTANDEN EN CONDENSATOREN**Opladen van een condensator**

Na het sluiten van de schakelaar kunnen ladingen zich verplaatsen in de kring en wordt de condensator opgeladen.

Na bepaalde tijd is het potentiaalverschil over de condensator gelijk aan de emk van de batterij.

Hoe zullen potentiaalverschil en lading evolueren als functie van de tijd?

Vanuit de tweede wet van Kirchhoff (som van de potentiaalverschillen):

$$\mathcal{E} = IR + \frac{Q}{C}.$$

Waarin we de stroom schrijven als $I = dQ/dt$

6

$$\varepsilon = R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} Q$$

$$\frac{dQ}{C\varepsilon - Q} = \frac{dt}{RC}$$

Deze differentiaalvergelijking kunnen we oplossen door te integreren van $t=0$ (dan is $Q=0$) tot een tijdstip t (dan is er een lading Q op de condensator)

$$\int_0^Q \frac{dQ}{C\varepsilon - Q} = \frac{1}{RC} \int_0^t dt$$

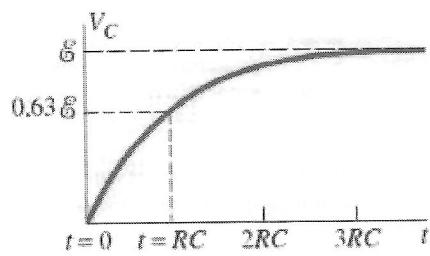
$$-\ln(C\varepsilon - Q) \Big|_0^Q = \frac{t}{RC} \Big|_0^t$$

Zie boek voor gedetailleerde berekening!

$$Q = C\varepsilon(1 - e^{-t/RC})$$

7

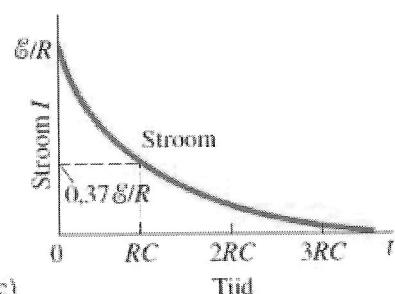
Potentiaalverschil over de condensator: $V=Q/C$



$$\text{Tijdsconstante } \tau = RC$$

tijd die nodig is om 63 % van de eindwaarde te behalen:

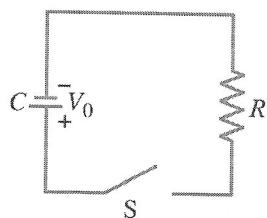
Stroom doorheen de kring: $I = dQ/dt$



De tijdsconstante stelt de tijd voor waarin de stroom daalt naar 1/e (ongeveer 37 procent) van de oorspronkelijke waarde.

8

Ontladen van een condensator



In dit geval is er geen bron.

Wanneer de schakelaar gesloten wordt, kan de opgeladen condensator zich ontladen doorheen de weerstand.

Zie boek voor gedetailleerde berekening!

Vanuit de tweede wet van Kirchhoff:

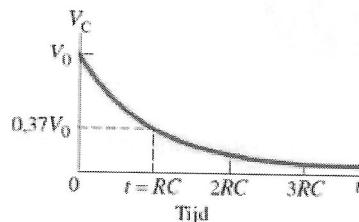
$$IR = \frac{Q}{C}$$

We schrijven $I = -dQ/dt$ omdat de lading op de condensator afneemt

$$-\frac{dQ}{dt}R = \frac{Q}{C}$$

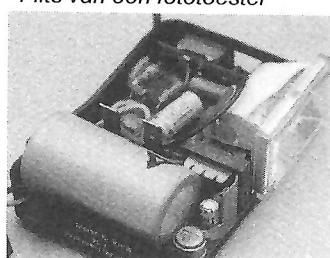
$$\frac{dQ}{Q} = -\frac{dt}{RC}$$

$$Q = Q_0 e^{-t/RC}$$



9

Flits van een fotoestel



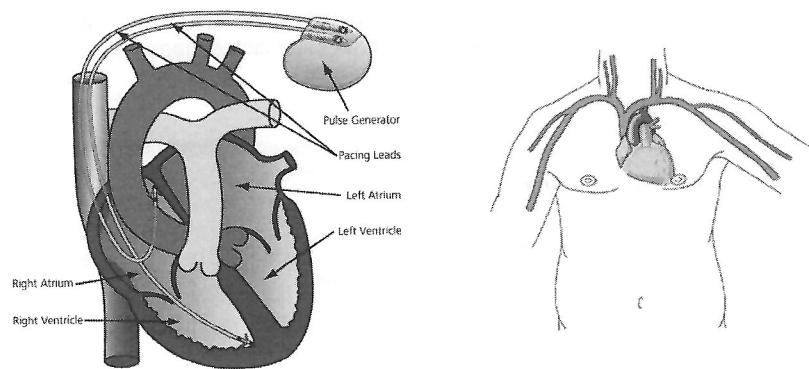
Defibrillator voor het hart



Capaciteit van $175 \mu F$; spanning van 2240 V; pulsduur 2 ms, oplaadtijd 30 s

10

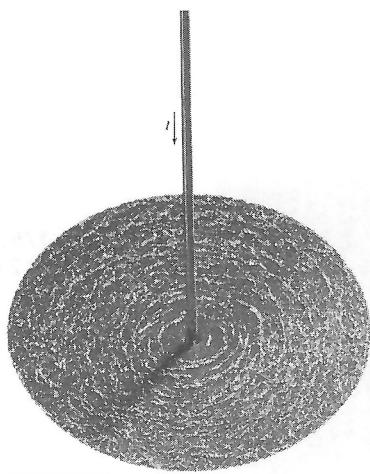
Toepassing: pacemaker



Timing van pulsen kan geregeld worden via RC-kring

11

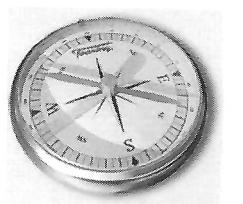
Hoofdstuk 27 Magnetisme



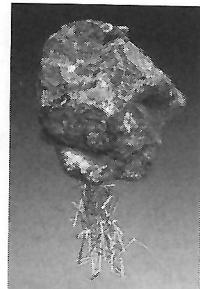
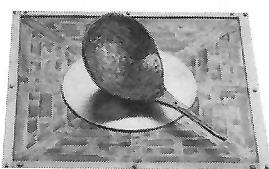
12

27.1 MAGNETEN EN MAGNETISCHE VELDEN

Historiek

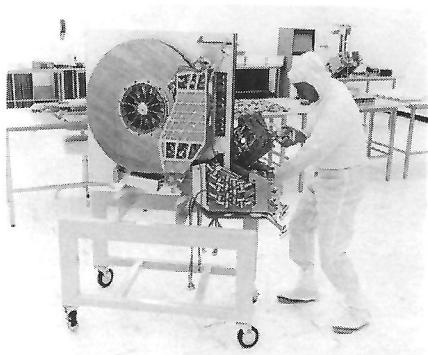


1300 BC (China)

Magnetite Fe_3O_4
800 BC (Grieken)

13

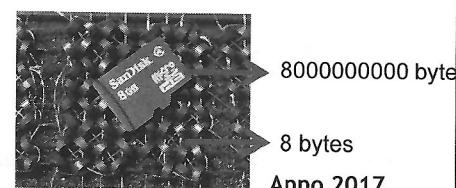
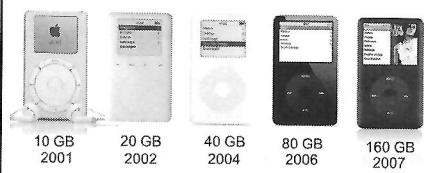
Belangrijke toepassing: magnetische data-opslag (harde schijven)



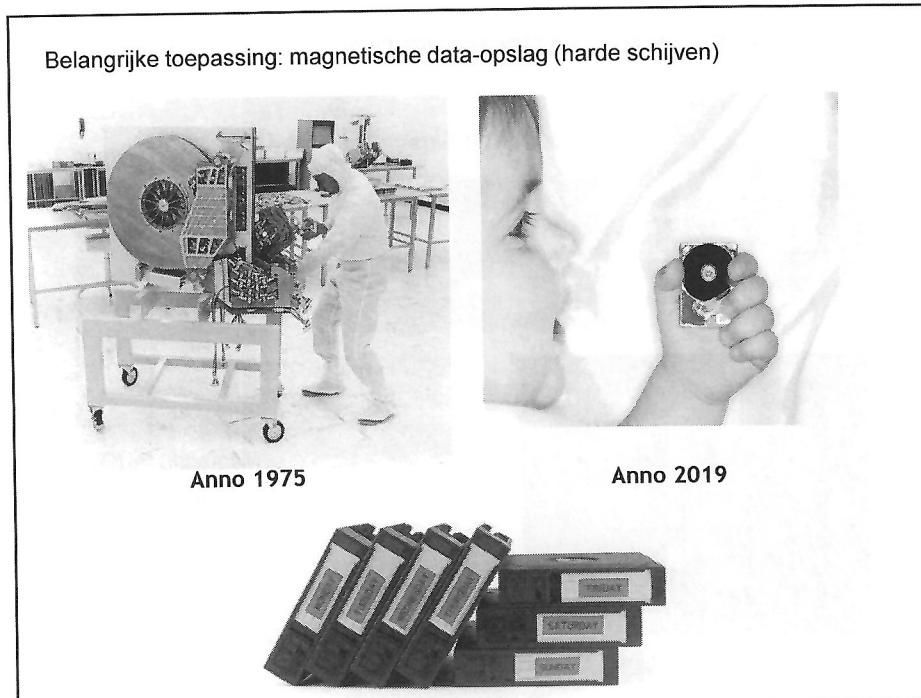
Anno 1975



Anno 2020



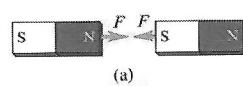
14



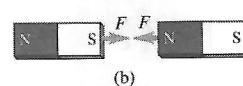
15

Elke magneet heeft twee polen: Noordpool en Zuidpool

Tegengestelde magnetische polen
trekken elkaar aan:

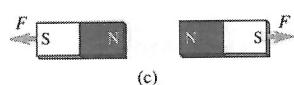


(a)

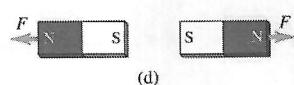


(b)

Gelijke magnetische polen
stoten elkaar af:

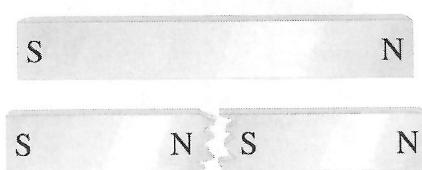


(c)



(d)

Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

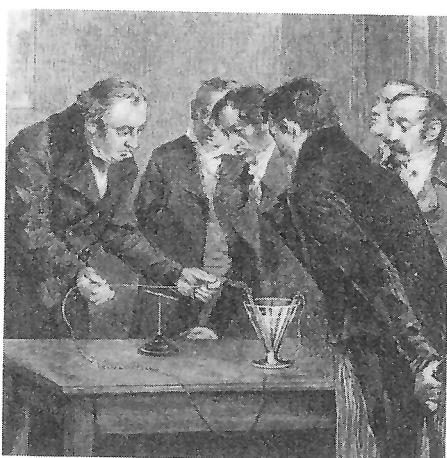


MAAR ... magnetische polen komen nooit afzonderlijk voor

16

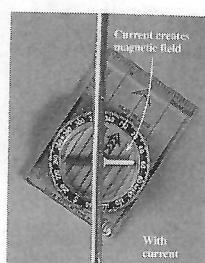
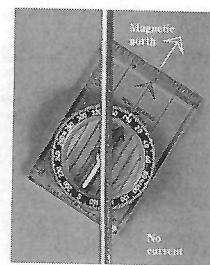
27.2 ELEKTRISCHE STROMEN PRODUCEREN MAGNETISCHE VELDEN

Experiment van Oersted



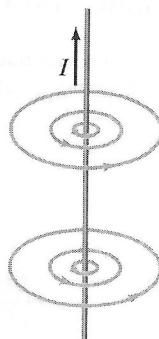
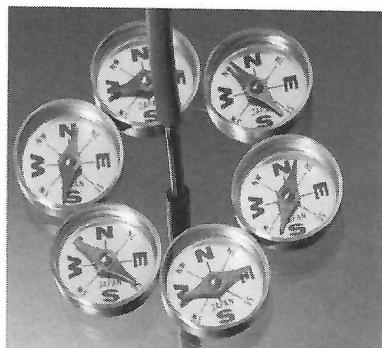
Elektrische stroom geeft aanleiding tot magneetveld !

<https://www.youtube.com/watch?v=-w-1-4Xnjuw>



(a)

17



$$\text{Magnetisch veld: } |\vec{B}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

μ is de magnetische permeabiliteit

In vacuüm: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

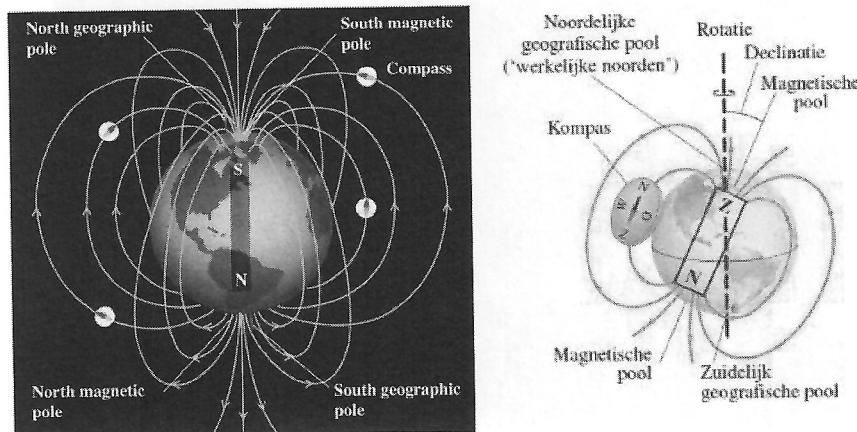
Eenheid magneetveld: 1 Tesla $1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A m}}$

Zie ook 28.1 in Giancoli

18

Het magnetisch veld van de aarde

Oorsprong: bewegende ladingen in vloeibare kern van de aarde



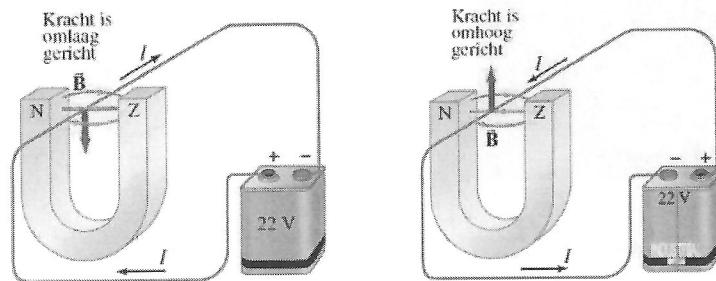
Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Hoekverschil tussen magnetische en geografische noorden varieert tussen 0 en 20 graden

19

27.3 KRACHT OP ELEKTRISCHE STROOM IN MAGNETISCH VELD

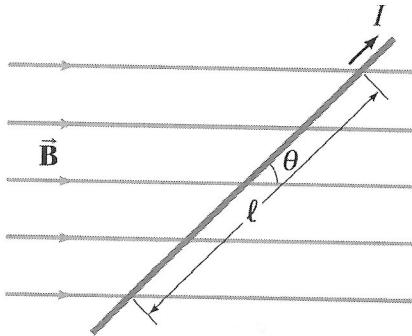
Elektrische stroom oefent kracht uit op een magneet. Volgens derde wet van Newton zou een magneet kracht moeten uitoefenen op een stroomvoerende draad.



Experimenteel waargenomen door Oersted.

20

Grootte van de kracht is afhankelijk van de orientatie van de geleider



I

\vec{B}

θ

ℓ

$F = I\ell B \sin \theta.$

Vectorieel:

$\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B}.$

In algemeen, voor niet-homogeen veld:

$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$

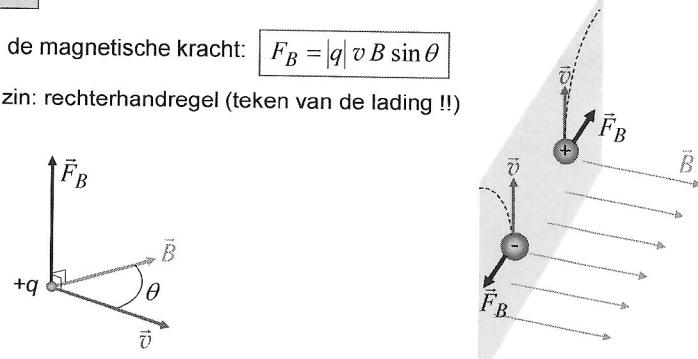
21

27.4 KRACHT OP EEN ELEKTRISCHE LADING DIE IN EEN MAGNETISCH VELD BEWEEGT: LORENTZKRACHT

$$\vec{F}_B = q \vec{v} \times \vec{B}$$

Grootte van de magnetische kracht: $F_B = |q| v B \sin \theta$

Richting en zin: rechterhandregel (teken van de lading !!)



eveneens definitie van magnetisch veld
→ bepaald door de kracht op een bewegende lading

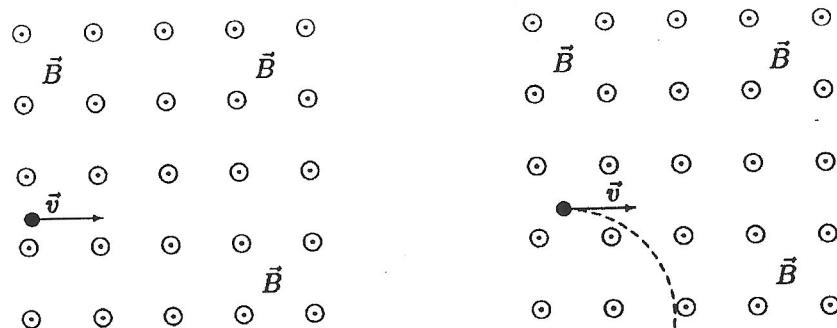
Eenheid magneetveld: 1 Tesla $1 T = 1 \frac{N}{A m}$



22

Proton in een magnetisch veld:

Toepassing van magnetische kracht op bewegend geladen deeltje: snelheid proton (150.000 km/s) in een vlak loodrecht op een magnetisch veld met grootte $B = 5 \text{ T}$. Beschrijf de beweging van het proton.



Kracht staat loodrecht op snelheid, dus de versnelling is loodrecht op de snelheid.
Uitsluitend centripetale versnelling: cirkelbaan!

23

- 2de wet van Newton:

$$m\vec{a} = \vec{F}_m = e \vec{v} \times \vec{B}$$

- projectie op *tangentiële* en *radiale assen*

$$a_n = \frac{e v B}{m} \quad a_t = 0$$

$$\text{met: } a_n = \frac{v^2}{r} \quad (\text{cirkelbeweging})$$

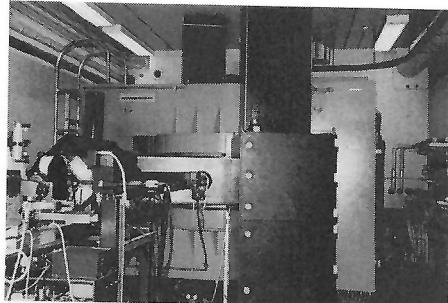
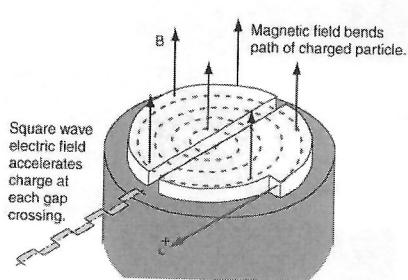
$$\boxed{\Rightarrow m a_n = e v B = \frac{mv^2}{r}}$$

$$r = \frac{mv}{eB}$$

24

Toepassing: het cyclotron

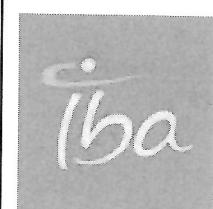
Idee: deeltje wordt versneld door een elektrisch veld; afbuiging in een magneetveld wordt gebruikt om het deeltje binnen de machine te houden.



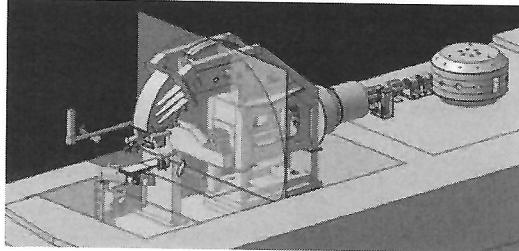
<http://www.youtube.com/watch?v=cNnNM2Zqlsc>

Deze technologie wordt nog steeds toegepast. Voorbeeld het bedrijf IBA (Ion Beam Applications) te Louvain-la-Neuve.

25



Hadrontherapie
@GHB



26

Protontherapie

The diagram shows a 3D floor plan of a proton therapy facility. The main area is a rectangle measuring 13 m by 30 m. Inside this area, there is a circular platform labeled 'S2C2' and a 'compact gantry' structure. Arrows point from the text labels to their respective parts in the diagram.

<https://www.youtube.com/watch?v=MS590Xtg9M4>

<https://www.youtube.com/watch?v=J0UsLBq-QDI>

27

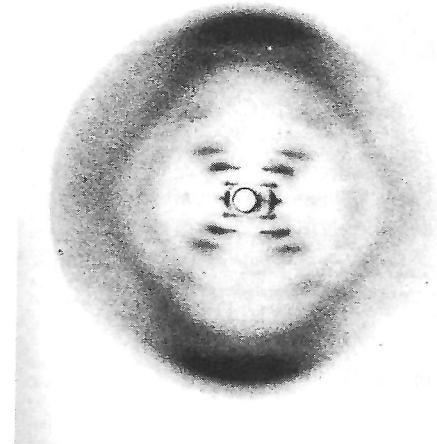
Toepassing in onderzoek en ontwikkeling: deeltjesversnellers

Elektronen en protonen worden versneld en worden op een cirkelvormige baan gehouden door een magneetveld loodrecht op het vlak van hun baan

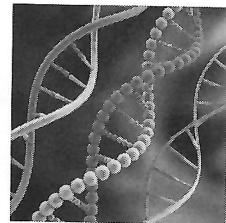
European Synchrotron Radiation Facility, Grenoble (Frankrijk)
<http://www.esrf.eu>
Rondcirkelende elektronen zenden X-stralen uit.

28

Ontrafeling van structuur van DNA



Structuur van DNA



The Nobel Prize in Chemistry 2009

"for studies of the structure and function of the ribosome"

Venkatraman
Ramakrishnan

Thomas A. Steitz

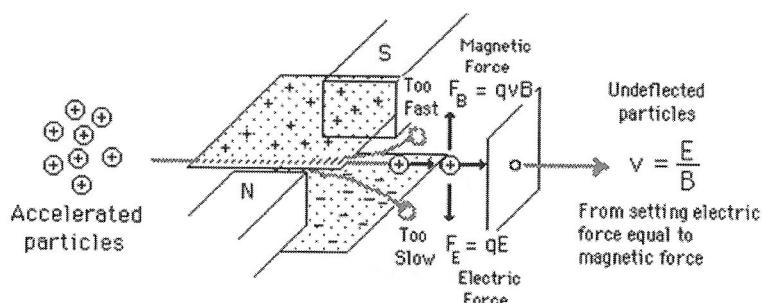


Ada E. Yonath

29

Toepassing: de snelheidsfilter

In een aantal toepassingen (o.a. de micro-elektronica) heeft men bundels van deeltjes met welbepaalde energie nodig. Een filter bestaat uit een elektrisch en een magnetisch veld, loodrecht op elkaar.

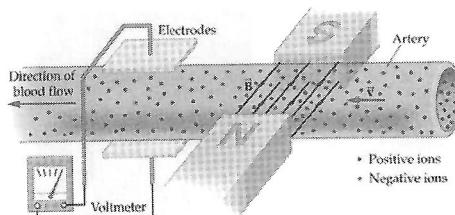


Er is geen resulterende kracht wanneer beide krachten mekaar compenseren:

$$qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B}$$

30

Toepassing: meting van de stromingssnelheid van het bloed



Er wordt een gekend magneetveld aangelegd. Dit zorgt ervoor dat positieve en negatieve ladingen in het bloed op verschillende wijze afgebogen worden.

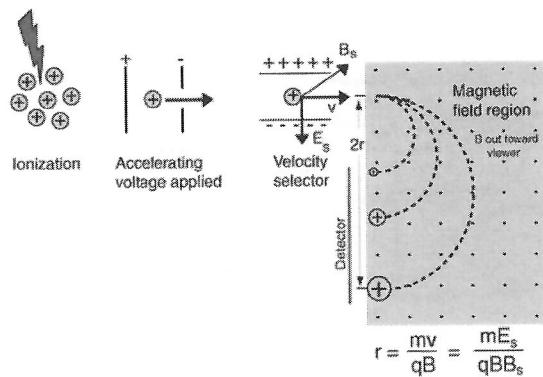
Als gevolg daarvan ontstaat er een elektrisch veld dat gemeten kan worden met elektrodes. Het elektrisch veld gaat de magnetische afbuiging tegen.

De stromingssnelheid van het bloed is dan $v = E/B$.

31

Toepassing: de massaspectrometer

Voorbeeld: analyse van fotosyntheseproducten, analyse van atmosferische samenstelling, scheiding van verschillende isotopen van eenzelfde atoom,...



Deeltjes gaan eerst door snelheidsfilter (daarna hebben ze allemaal dezelfde snelheid) en worden dan afgebogen in magneetveld (straal afhankelijk van hun massa).

Voorbeeld: ^{235}U ($m=3,90 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$) en ^{238}U ($m=3,95 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$) krijgen een snelheid van $1,05 \cdot 10^5 \text{ m/s}$ en gaan in magneetveld van 0.75 T . De afstand tussen eindpunten van de banen is dan 1 cm .

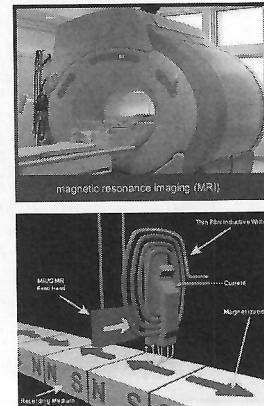
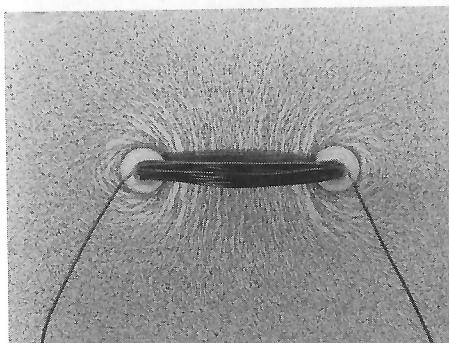
32



33

HOOFDSTUK 28

BRONNEN VAN MAGNETISCHE VELDEN



1

28.1 MAGNETISCH VELD ALS GEVOLG VAN EEN RECHTE DRAAD

Essentieel: bewegende elektrische lading...

vorig hoofdstuk: *bewegende lading in een magneetveld* (hoofdstuk 27)
nu: **magneetveld ten gevolge van een bewegende lading**

<https://www.youtube.com/watch?v=-w-1-4Xnjuw>

kwantitatieve bepaling van het magneetveld
ten gevolge van een elektrische stroom

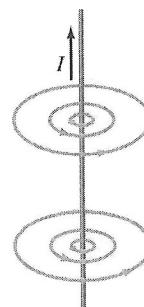
$$B \sim \frac{I}{r}$$

evenredigheidsconstante:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T.m/A}$$

magnetische permeabiliteit in vacuum



2