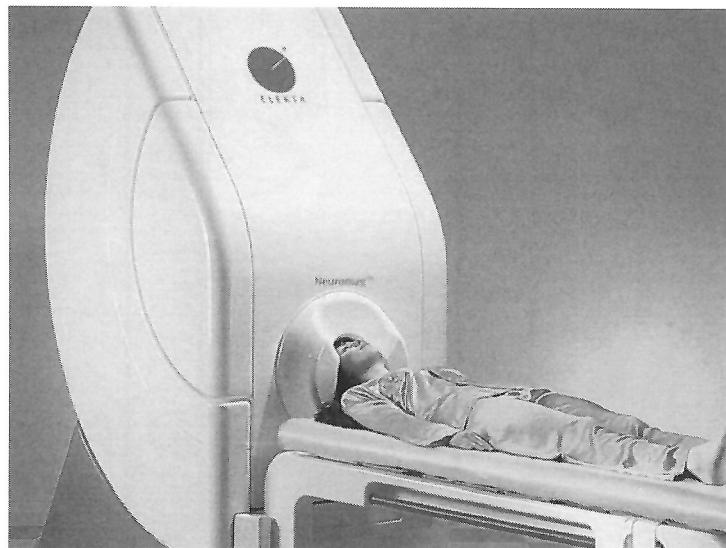
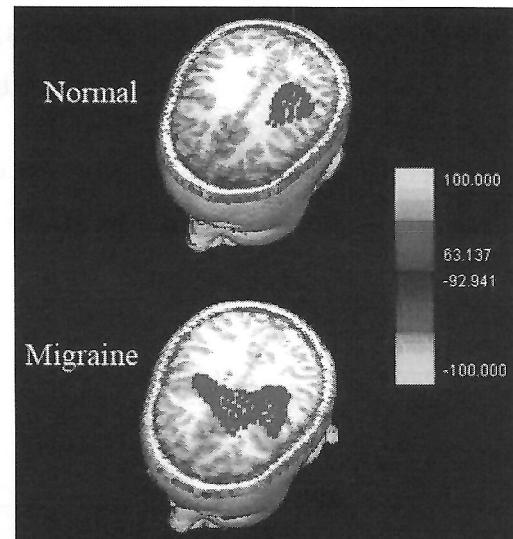
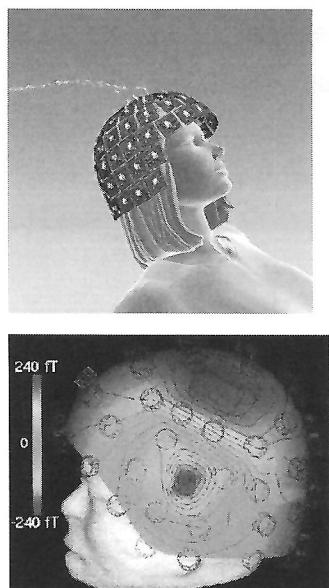


Toepassing: magnetisch veld van de hersenen (magneto-encephalografie)



3

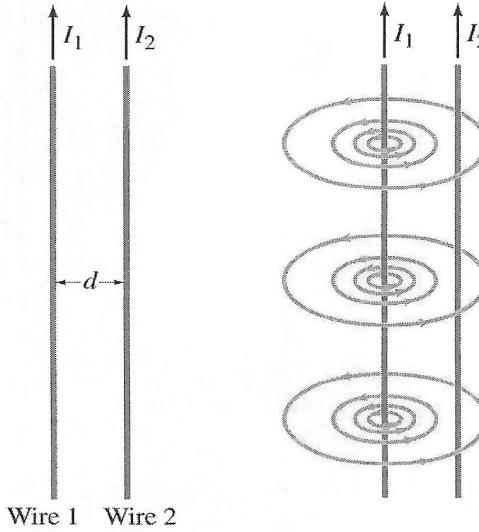
Toepassing: magnetisch veld van de hersenen (magneto-encephalografie)



4

2

## 28.2 MAGNETISCHE KRACHT TUSSEN TWEE EVENWIJDIGE GELEIDERS



Interactie tussen de draden?

5

stroomvoerende geleider in magneetveld: onderhevig aan magnetische kracht  
stroom door een geleider genereert een magneetveld

2 stroomvoerende geleiders oefenen kracht uit op elkaar!

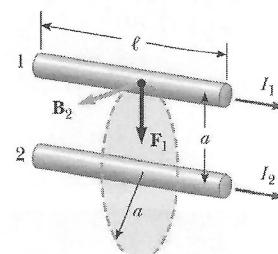
voorbeeld: geleider 2 met  $I_2$  induceert veld  $B_2$

kracht  $F_1$  op geleider 1 ten gevolge van  $B_2$ :

$$\vec{F}_1 = I_1 \vec{l} \times \vec{B}_2 \quad \text{en} \quad \vec{l} \perp \vec{B}_2 \quad \rightarrow \quad F_1 = I_1 l B_2$$

$$F_1 = I_1 l B_2 = I_1 l \left( \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l$$

$$F_2 = I_2 l B_1 = I_2 l \left( \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a} \right) = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} l$$



$$\frac{F}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

evenwijdige stroomvoerende geleiders:

trekken elkaar aan indien de stroom in dezelfde richting vloeit

stoten elkaar af indien de stroom in tegengestelde richting vloeit

6

### 28.3 DEFINITIES VAN AMPÈRE EN COULOMB

evenwijdige stroomvoerende geleiders:

- trekken elkaar aan indien de stroom in dezelfde richting vloeit
- stoten elkaar af indien de stroom in tegengestelde richting vloeit

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

Definitie van de ampère:

*Als door twee lange, evenwijdige geleiders die op 1 meter van elkaar verwijderd zijn, een gelijke stroom in dezelfde richting vloeit en als de geleiders elkaar aantrekken met een kracht per lengte-eenheid van  $2 \times 10^{-7}$  N/m, dan vloeit een stroom van 1 ampère [A] in elke geleider.*

Definitie laat toe om elektrische grootheid via mechanische krachten te meten!

Definitie van de coulomb:

*Als door een geleider een stroom van 1 ampère vloeit, dan is de hoeveelheid lading die in 1 s door de doorsnede van die geleider vloeit, gelijk aan 1 coulomb.*

7

### Ampère (eenheid)

In de natuurkunde is de **ampère**, met symbool A, een eenheid van elektrische stroomsterkte. De ampère is een van de zeven grondseenheden van het SI-systeem en is de Franse fysicus André-Marie Ampère (1775–1836), een van de hoofdontdekkers van het elektromagnetisme.

Inhoud [verbergen]

- 1 Definitie van de ampère
  - 1.1 Tot 2019
  - 1.2 Vanaf 20 mei 2019
- 2 Elektrische lading
- 3 Geschiedenis
- 4 Zie ook

Definitie van de ampère [bewerken]

Tot 2019 [bewerken]

De definitie van de ampère luidde:<sup>[1]</sup>

Een ampère is de constante stroomsterkte die, wanneer deze loopt door twee parallelle geleiders van oneindige lengte en met een verwaarloosbare diameter, op 1 meter van elkaar geplaatst in vacuüm, een lorentzkracht tussen deze geleiders produceert van  $2 \times 10^{-7}$  newton per meter lengte.

Vanaf 20 mei 2019 [bewerken]

De herdefinitie van de ampère is gebaseerd op de exacte vastlegging van de elementaire lading  $e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$  C. Aangezien gehandhaafd blijft dat een stroomsterkte van 1 A een stroom betekent van 1 coulomb per seconde, wordt volgens de herdefinitie van de basiseenheden, een elektrische stroom met sterkte 1 A veroorzaakt door

$$\frac{1}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}}$$

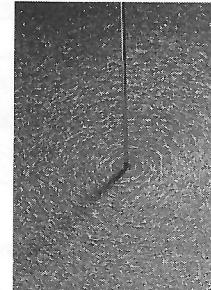
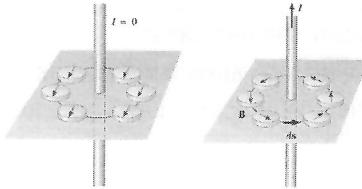
8

## 28.4 DE WET VAN AMPÈRE

B raakt aan cirkel

grootte afhankelijk van :

- stroomsterkte I
- afstand van draad r



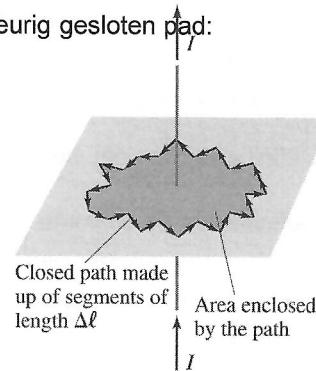
wat als het geen rechte geleider is?

evalueer het product  $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$  langs een willekeurig gesloten pad:

Ampère:

$$\sum \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \sum B_{||} d\ell = \mu_0 I_{in}$$

$$d\ell \rightarrow 0: \oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I_{in}$$

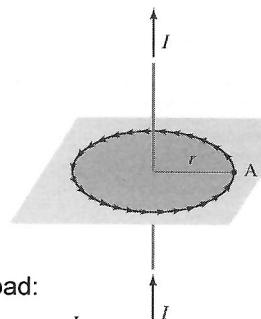


9

### Wet van Ampère

conform met magneetveld van rechte geleider?

keuze van integratiepad: symmetrie gebruiken!



evalueer het product  $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$  langs een gesloten pad:

$$\mu_0 I = \oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \oint B d\ell = B \oint d\ell = B(2\pi r) \quad \rightarrow \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

dit resultaat is algemeen geldig = wet van Ampère

De lijnintegraal van het magneetveld  $(\vec{B} \cdot d\vec{\ell})$  langs een gesloten pad is gelijk aan  $\mu_0 I$ , waarbij I de totale stroom is die vloeit door een oppervlak dat omsloten is door het pad.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$$

10

voorbeeld 28.6: het magnetisch veld tgv een lange stroomvoerende geleider

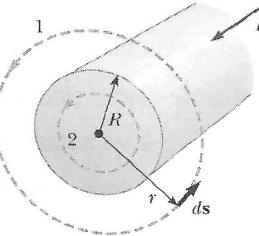
geleider met straal  $R$  en uniforme stroomdichtheid  $J=I/\pi R^2$   
magneetveld ifv  $r$ ?

symmetrie → kies cirkelvormige integratiepaden

1.  $r \geq R$  ten gevolge van symmetrie:  $|B|$  constant

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B ds = B \oint ds = B 2\pi r = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (r \geq R)$$



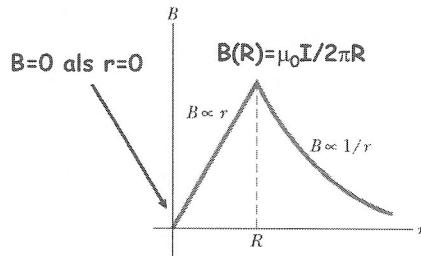
2.  $r < R$

wet van Ampère:

stroom door de cirkel met straal  $r = I' < I$

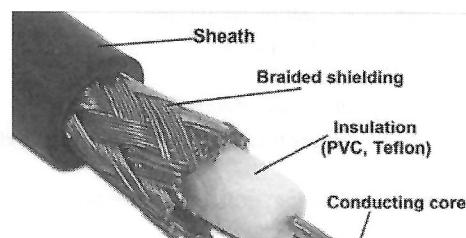
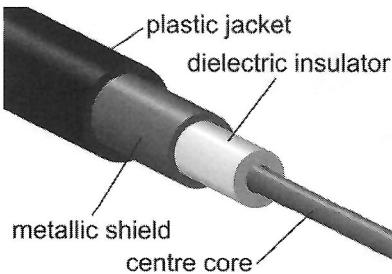
$$\frac{I}{\pi R^2} = \frac{I'}{\pi r^2} \Rightarrow I' = \frac{r^2}{R^2} I \quad \Rightarrow B = \frac{\mu_0 I'}{2\pi r}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r \quad (r < R)$$



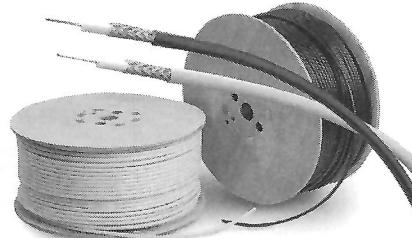
11

**Toepassing: coaxiale kabel**



Magnetisch veld buiten kabel is gelijk aan nul. Ideaal voor transport van signalen bij gevoelige apparatuur.

Voorbeeld van toepassing:  
internetbekabeling



12

### 28.5 HET MAGNETISCH VELD VAN EEN SPOEL

solenoïde = aantal windingen  
 binnein uniform veld  
 elke winding  $\approx$  cirkelvormige geleider  
 $\rightarrow$  vectorsom van de magneetvelden  
 dichte windingen: spoel gedraagt zich als staafmagneet

ideale solenoïde:  
 dichte windingen  
 lengte  $\gg$  straal

13

### Magnetisch veld van een spoel

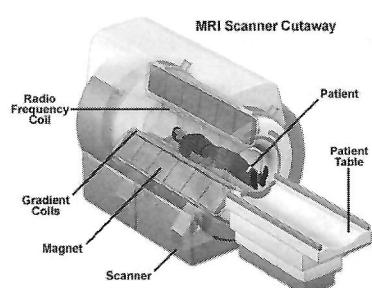
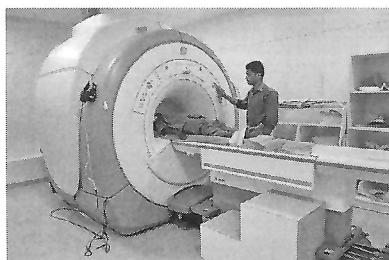
solenoïde = aantal windingen  
 binnein uniform veld  
 elke winding  $\approx$  cirkelvormige geleider  
 $\rightarrow$  vectorsom van de magneetvelden

magneetveld van een ideale solenoïde?

inwendig veld : uniform !  
 $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_{pad1} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_{pad2} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_{pad3} \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_{pad4} \vec{B} \cdot d\vec{s}$   
 $\int_{pad1} \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \int_{pad1} ds = B\ell = \mu_0 NI$   
 $B = \mu_0 \frac{NI}{\ell} = \mu_0 nI$  (N = aantal wikkelingen over een afstand l)  
 uitwendig veld  $\neq 0$  (compenseren met tegengestelde winding)

14

## Toepassing: spoel voor MRI-scanner

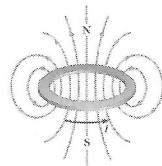


Magnetisch veld van de orde van 10 T

15

## 28.7-9-10 MAGNETISME IN MATERIALEN

## Magnetisch moment van een atoom

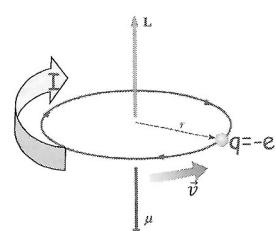


$$\text{stroom} \quad I = \frac{e}{T} = \frac{e\omega}{2\pi} = \frac{ev}{2\pi r} \quad \rightarrow \text{elektron cirkelt rond kern} = \text{stroom}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad \qquad v = \omega r$$

$$\text{magnetisch moment} \quad \mu = IA = I\pi r^2 = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{1}{2} evr$$

$$\text{orbitaal impulsmoment} \quad |\vec{L}| = |m_e \vec{r} \times \vec{v}| = m_e r v$$



orbitaal magnetisch moment

$$\boxed{\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}}$$

16

**Grootte van het magnetisch moment van een atoom (zie ook 39.7)**

impulsmoment is gekwantiseerd:  $L = \sqrt{\ell(\ell+1)}\hbar$   $\ell = 0, 1, 2, \dots$   $\hbar = 1.05 \times 10^{-3} \text{ Js}$

kleinste orbitaal magnetisch moment van elektron  $\mu = \sqrt{2} \frac{e}{2m_e} \hbar$  constante van Planck

**waarom bestaan er niet-magnetische materialen?**

veel elektronen → willekeurige oriëntatie van de orbitale magnetische momenten maakt dat het magnetisch effect klein of nul is

**Spinbijdrage tot het magnetisch moment (= intrinsieke eigenschap)**

magnetisch moment geassocieerd met de spin van een elektron

Bohr magneton:  $\mu_b = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$

proton en neutron : verwaarloosbare bijdrage!

totaal magnetische moment = vectorsom van de orbitale en intrinsieke magnetische momenten

Atom or Ion	Magnetic Moment ( $10^{-24} \text{ J/T}$ )
H	0.27
He	0
Ne	0
Ce <sup>3+</sup>	19.8
Yb <sup>3+</sup>	37.1

ongeveer het Bohr magneton  
even aantal elektronen

17

**Ferromagnetisme**

voorbeelden van ferromagnetische materialen: ijzer, nikkel, kobalt, gadolinium bezitten permanente magnetische momenten die evenwijdig met elkaar oplijnen zelfs in een zwak uitwendig magnetisch veld (sterke interactie tussen de magnetische momenten).

bestaan uit domeinen:  $10^{-12}$  tot  $10^{-8} \text{ m}^3$  of  $10^{17}$  tot  $10^{21}$  atomen

**Magnetisatiecurve - hysteresis**

Curietemperatuur

$T > T_C$ : thermische agitatie doet oplijning van de magnetische momenten teniet

$M_s$ : saturatiewaarde van de magnetisatie

$B=1 \text{ T}$

$\mu_m = 1000 \mu_0$

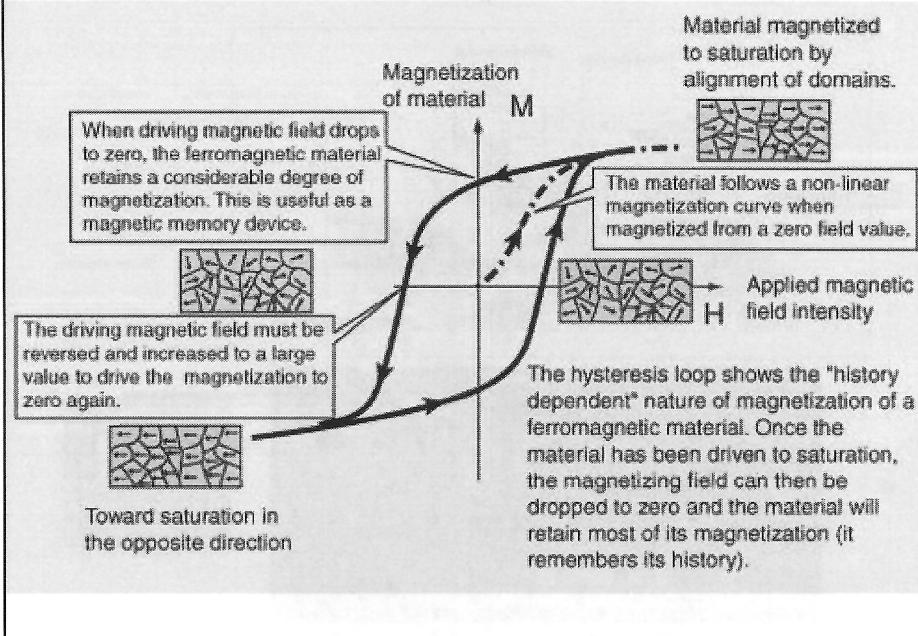
$B_c = \mu_0 H = 10^{-3} \text{ T}$

$T_{\text{Curie}}(\text{K})$

Substance	$T_{\text{Curie}}(\text{K})$
Iron	1 043
Cobalt	1 394
Nickel	631
Gadolinium	317
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	893

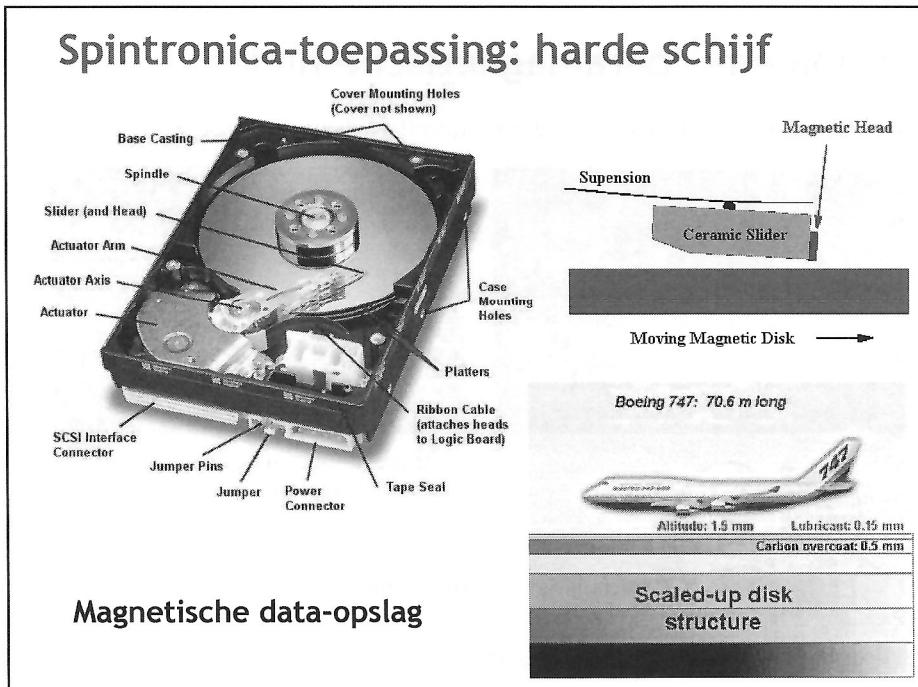
18

### Magnetisatiecurve - hysteresis



19

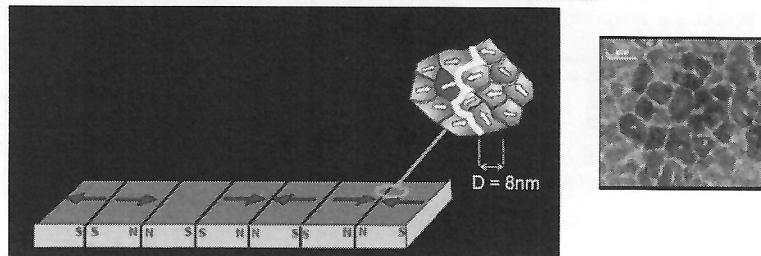
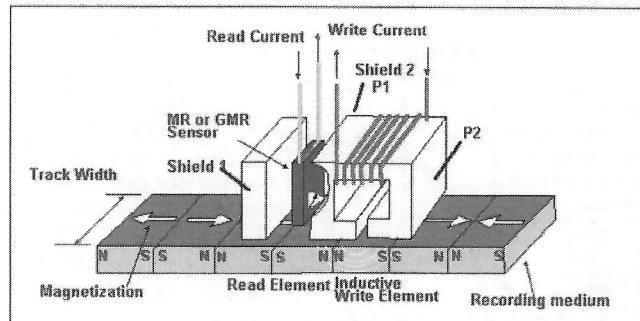
### Spintronica-toepassing: harde schijf



### Magnetische data-opslag

20

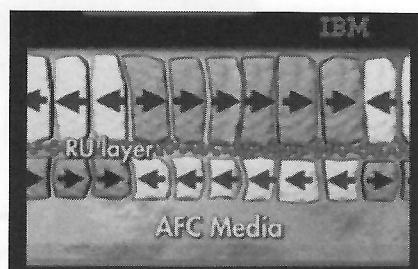
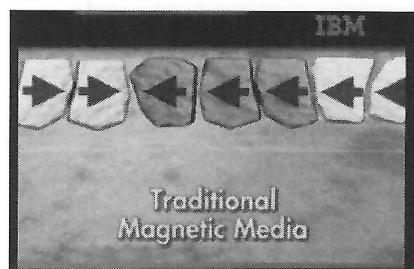
### Schrijven van data=magnetische domeinen maken



21

### Probleem: ‘paramagnetische limiet’

Kleine magnetische domeinen worden onstabiel! Maximum levensduur: 10 jaar



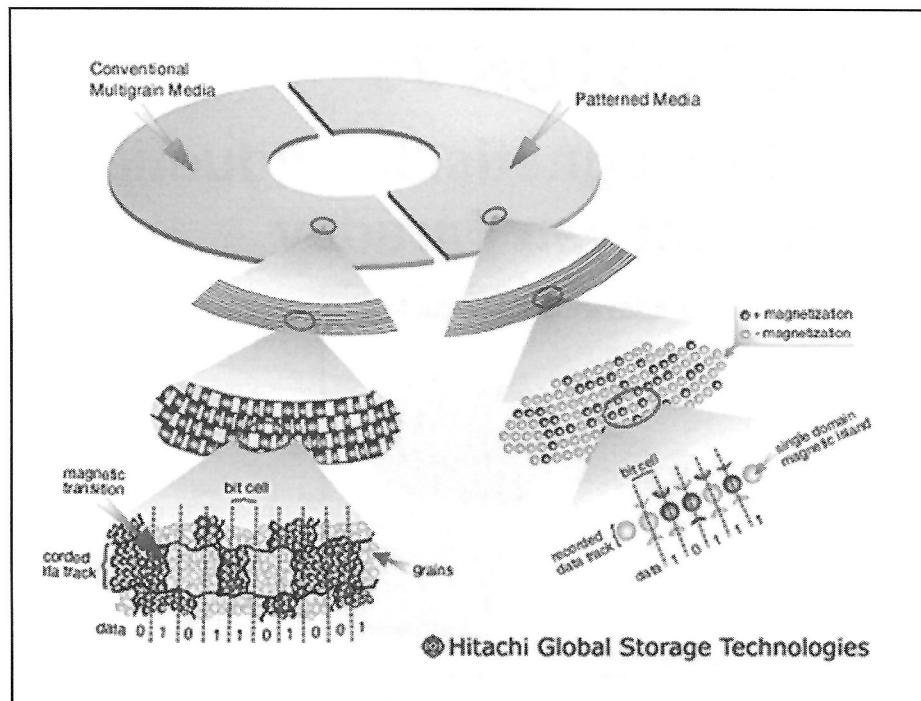
Bits are stabilized by coupling them to underlying layer (via exchange bias).



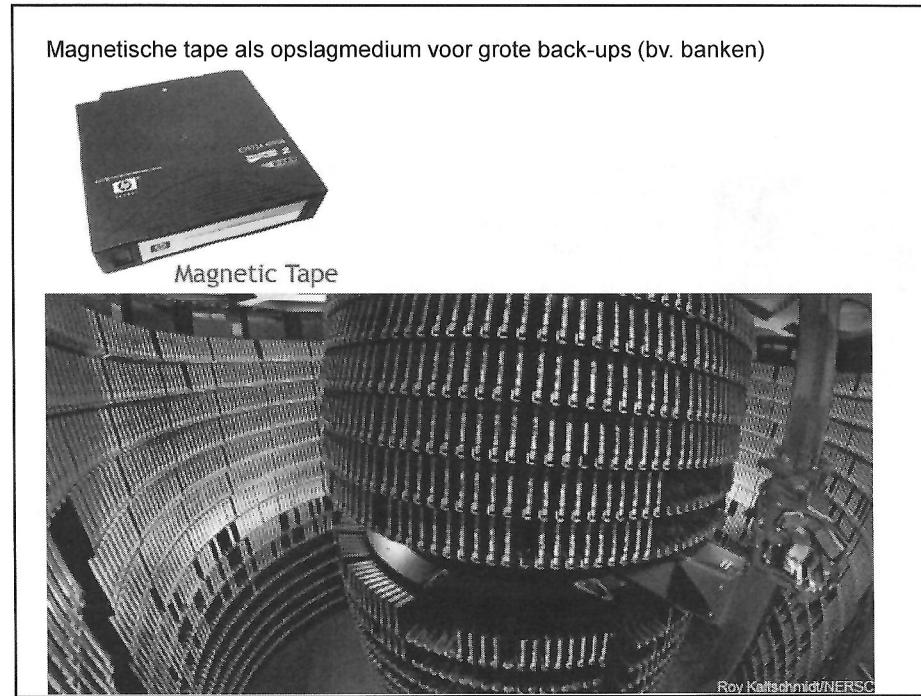
Alternatief: loodrechte magnetisatie

[https://www.youtube.com/watch?v=xb\\_PyKuI7II](https://www.youtube.com/watch?v=xb_PyKuI7II)

22



23

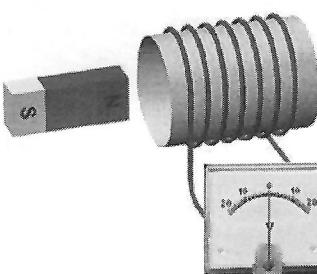


24

# HOOFDSTUK 29

## Elektromagnetische inductie en de wet van Faraday

Faradays Law of Induction



Kieran McKenzie

1

emk kan geïnduceerd worden door variërend magnetisch veld (1831)



legt de "missing link"  
tussen elektriciteit en  
magnetisme

Michael Faraday  
(1791-1867)

- Hij weigert mee te werken aan de ontwikkeling van gifgas voor het Britse leger
- Start “kerstlezingen” over hedendaagse vragen ivm wetenschap (nu nog op BBC)
- Licht is elektromagnetische golf (1873 Maxwell). In 1832 deponeert Faraday een verzegelde brief bij de Royal Society (Londen). In 1937 werd deze geopend:  
“Er bestaan elektromagnetische golven die zich gedragen als golven op een wateroppervlak”
- Unificatie van gravitatie en elektromagnetisme (*Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1851) :

“Hier houden voor het ogenblik mijn proeven op. De resultaten zijn negatief; zij ondermijnen niet mijn sterke gevoel dat er een betrekking bestaat tussen zwaartekracht en elektriciteit, hoewel ze geen bewijs leveren voor het bestaan van zo'n betrekking”

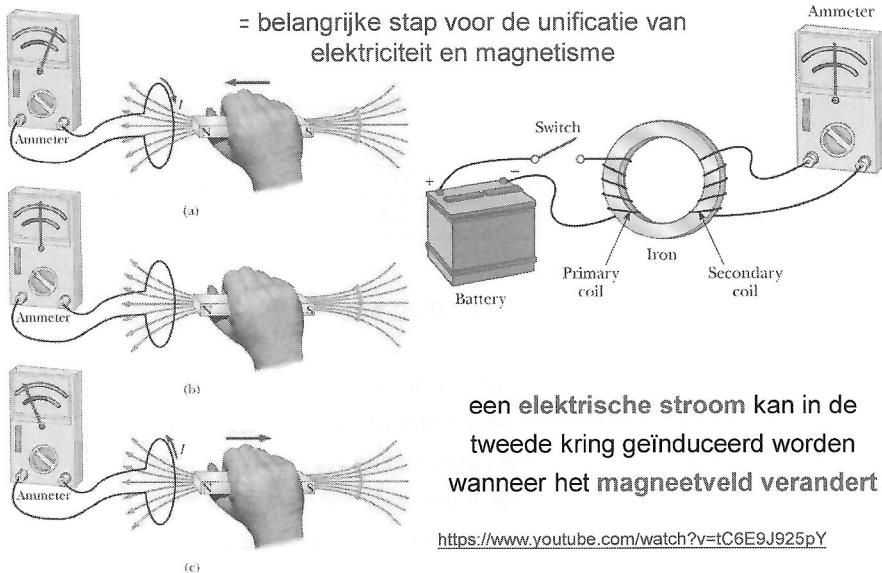
2

1

## 29.1 GEÏNDUCEERDE EMK

= magnetische inductie

= belangrijke stap voor de unificatie van elektriciteit en magnetisme



een elektrische stroom kan in de tweede kring geïnduceerd worden wanneer het magneetveld verandert

<https://www.youtube.com/watch?v=tC6E9J925pY>

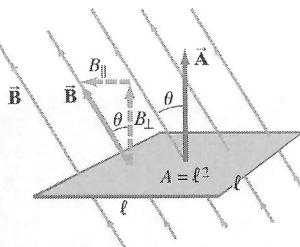
3

## 29.2 DE INDUCTIEWET VAN FARADAY

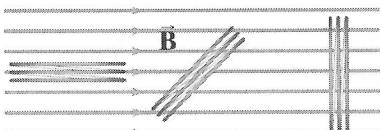
Magnetische flux

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B \cos \theta dA$$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int B \cos \theta dA$$



eenheid: Weber [Wb]: 1 Wb = 1 Tm<sup>2</sup>



$$\begin{array}{ccc} \theta = 90^\circ & \theta = 45^\circ & \theta = 0^\circ \\ \Phi = 0 & \Phi_B = BA \cos 45^\circ & \Phi_B = BA \end{array}$$

homogeen veld door een vlak:

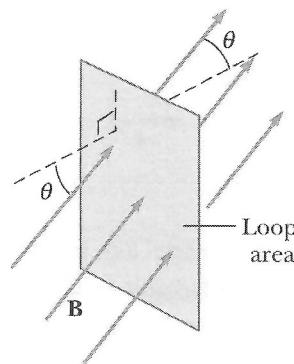
$$\Phi_B = BA \cos \theta$$

4

### De inductiewet van Faraday

Door een in de tijd variërend magnetisch veld wordt een spanning (emk) geïnduceerd in een gesloten kring.

De geïnduceerde spanning in een gesloten circuit is gelijk aan minus de tijdsverandering van de magnetische flux door de kring.



$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad \text{met} \quad \Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

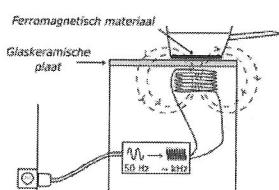
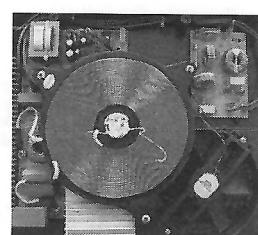
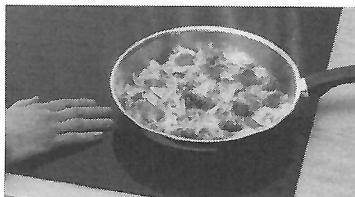
$$\text{homogeen magnetisch veld} \quad \mathcal{E} = -\frac{d(B\cos\theta)}{dt}$$

**E wordt geïnduceerd als:**

- de grootte van B in de tijd verandert
- de grootte van A in de tijd verandert
- de hoek in de tijd verandert
- een combinatie in de tijd verandert

5

### conceptueel voorbeeld 29.3: inductiekookplaat



Wisselstroom in spoel zorgt voor een veranderend magnetisch veld dat gevoeld wordt door de bodem van de pan. Hierdoor wordt een geïnduceerde stroom opgewekt in de bodem van de pan, die via de weerstand warmte opwekt.

6

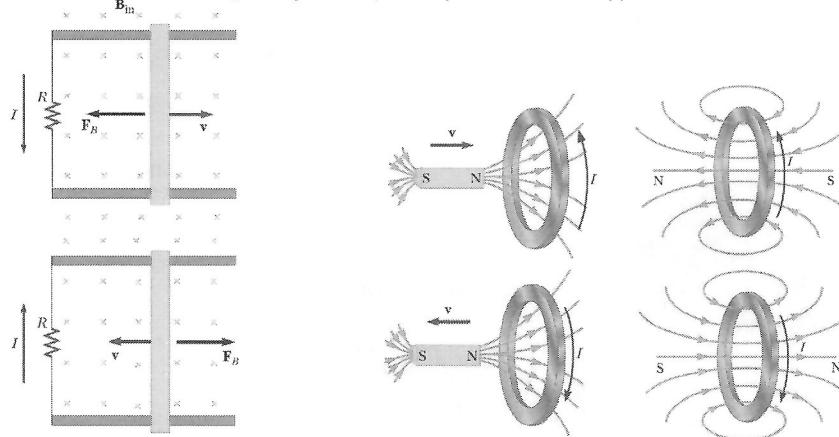
3

### De wet van Lenz

Teken van de emk ten gevolge van de fluxverandering?

de geïnduceerde stroom in een kring is in de richting die een magneetveld opwekt dat de verandering in magnetische flux doorheen het oppervlak tegenwerkt

Dus: de stroom is zodanig dat hij de oorspronkelijke flux door het oppervlak in stand wil houden



7

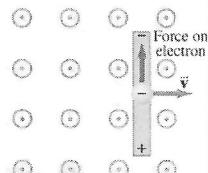
### 29.3 GEINDUCEERDE EMK IN EEN BEWEGENDE GELEIDER

emk t.g.v. veranderend magnetisch veld

bewegende geleider in homogeen magnetisch veld

bewegende lading  $\rightarrow$  magnetische kracht  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

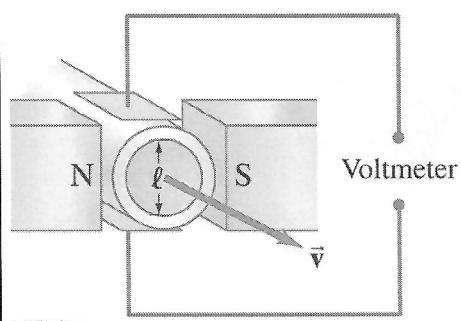
elektrisch veld wordt geïnduceerd!



evenwicht:  $qvB = qE \rightarrow vB = E \rightarrow$  geïnduceerd potentiaalverschil

$$\Delta V = E\ell = vB\ell$$

(als  $v=0$  dan is  $\Delta V=0$ )



Voorbeeld: meting van de snelheid van de bloedstroming in bloedvaten.  
Bloed bevat ionen, dus ladingen die bewegen in magneetveld induceren een emk.

8

## 29.4 GENERATOREN

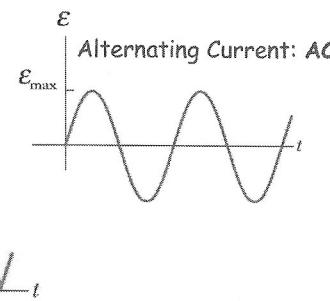
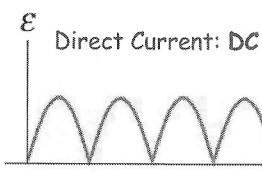
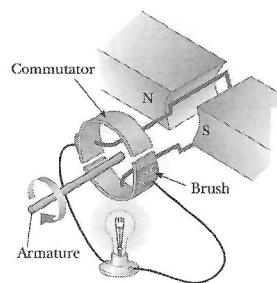
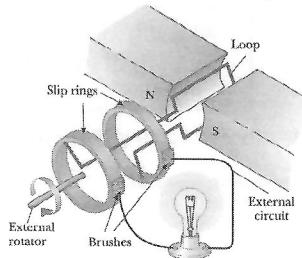
Doele: omzetting van mechanische energie naar elektrische energie

$$\Phi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$$

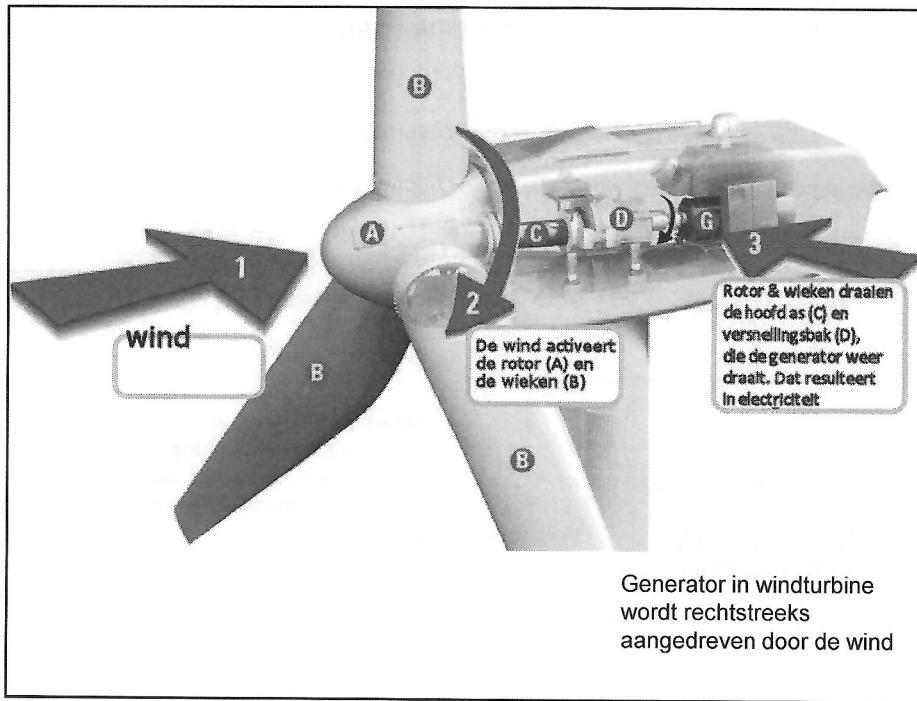
N windingen  $\rightarrow$

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} (\cos \omega t) = NAB\omega \sin \omega t$$

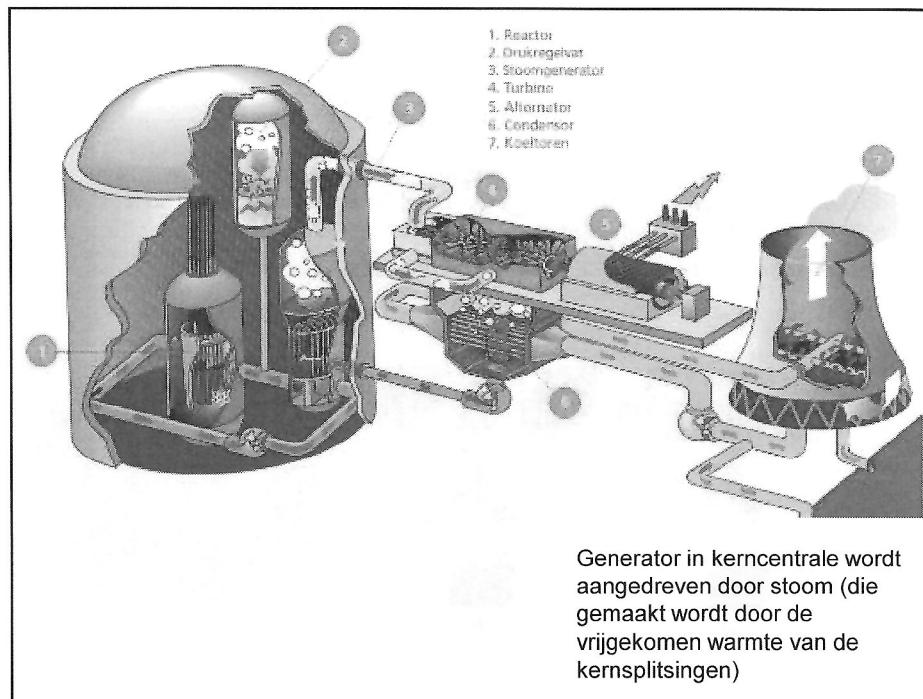
$\downarrow$   
 $\mathcal{E}_{\max}$



9



10



11



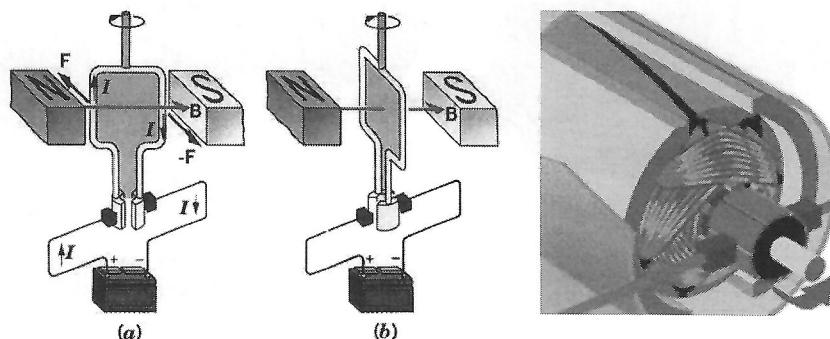
12

### *Omgekeerde principe: de gelijkstroommotor*

*Machine die elektrische energie in mechanische energie omzet.*

*Basisidee: een stroomvoerend kader (**anker**) draait in een magneetveld. Door op gepaste tijdstippen de stroomzin in de kader om te keren, blijft de kader steeds in dezelfde richting draaien.*

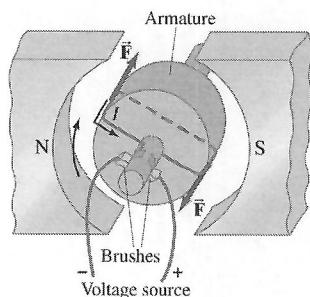
*Het omkeren van de stroomzin gebeurt via de **commutator**.*



*Copyright John Wiley & Sons*

13

### 29.5 TEGEN-EMK EN WERVELSTROMEN



dc-motor → stroom  $I \rightarrow$  rotatie

→  $\phi_B$  verandert

→ emk geïnduceerd: werkt tegen (wet van Lenz)!

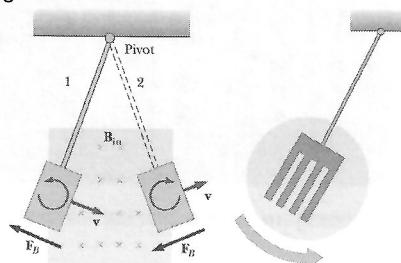
= "tegen-emk"

metalen voorwerpen die bewegen in een magneetveld:

→ interne stromen = "wervelstroomen"  
('eddy currents')

**Productie van Joulese warmte**

$$P = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2}{R}$$



14

Toepassing van wervelstromen

**HAND-HELD FULLY FEATURED EDDY CURRENT FLAW DETECTOR**

Niet-destructief testen van materialen ('cracks')

Metaaldetector: varierend magneetveld zorgt voor wervelstromen in metalen objecten. Het magneetveld opgewekt door de wervelstromen wordt gedetecteerd.

15

## 29.6 DE TRANSFORMATOR

minimaal vermogenverlies bij transport van elektrisch vermogen  $P = I \cdot V$  is bij hoge spanning (300-500 kV):  $P_{\text{verlies}} = I^2 R$

moet naar 220 V teruggebracht worden !

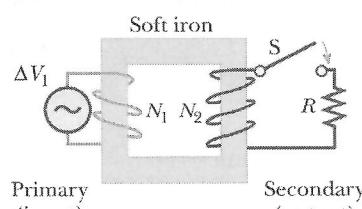
(ideale) AC-transformator:

weekijzer kern  $\rightarrow$  zuiver inductieve kring!

$$\phi \approx 90^\circ \text{ en } P_{\text{av}} \approx 0$$

$$\text{Faraday: } \Delta V_1 = -N_1 \frac{d\phi_B}{dt} \text{ en } \Delta V_2 = -N_2 \frac{d\phi_B}{dt}$$

als alle flux "gevangen" wordt in de ijzerkern:



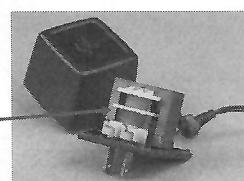
$$\frac{\Delta V_1}{N_1} = \frac{\Delta V_2}{N_2}$$

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1} \Delta V_1$$

$$N_2 > N_1 \rightarrow \Delta V_2 > \Delta V_1$$

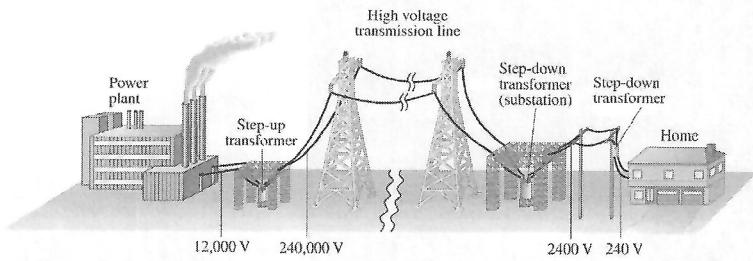
$$N_1 > N_2 \rightarrow \Delta V_1 > \Delta V_2$$

$$\frac{220 \text{ V}}{4.5 \text{ V}} = \frac{N_1}{N_2} \approx 50$$



16

## voorbeeld 29.13: transmissielijnen



Een vermogen van 120 kW moet over een afstand van 10 km getransporteerd worden ( $R = 0.4 \Omega$ ). Hoeveel verlies is er bij transport bij 240 V en bij 24.000 V?

$$P_{\text{verlies}} = I^2 R \quad \text{en} \quad I = \frac{P}{V}$$

$$240 \text{ V} : \quad I = 500 \text{ A} \quad \text{en} \quad P_{\text{verlies}} = 100 \text{ kW} \quad \sim 80\%$$

$$24.000 \text{ V} : \quad I = 5 \text{ A} \quad \text{en} \quad P_{\text{verlies}} = 10 \text{ W} \quad < 0.01\%$$

17

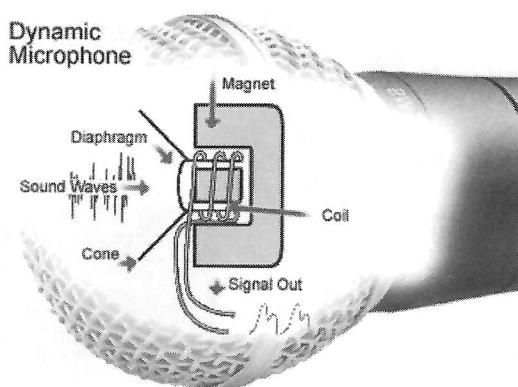
## 29.7 GEÏNDUCEERDE EMK EN ELEKTRISCHE VELDEN

$$\frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow \mathcal{E} \rightarrow I \rightarrow \text{elektrisch veld?}$$

algemeen geval :  $\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$   
 $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

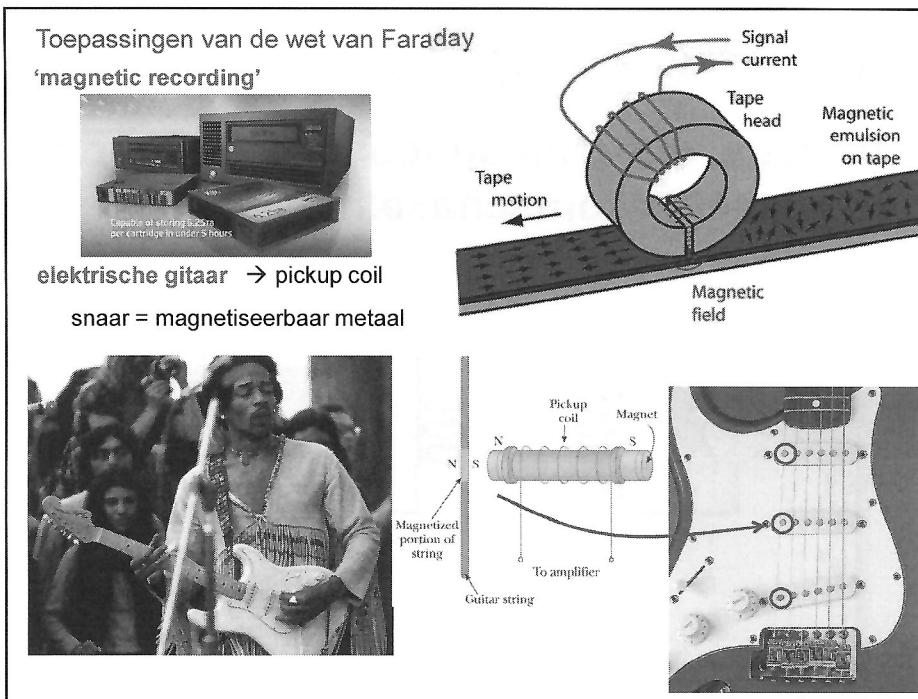
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

veralgemeende  
wet van Faraday



Spoel beweegt door luchtrillingen. Beweging van de spoel in het magneetveld veroorzaakt een emk; dit is het signaal dat naar de versterker en de luidsprekers gestuurd wordt.

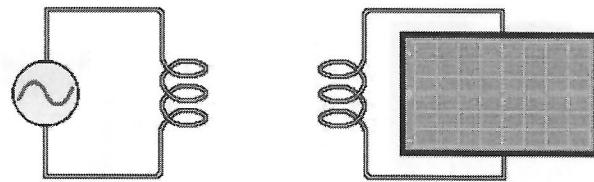
18



19

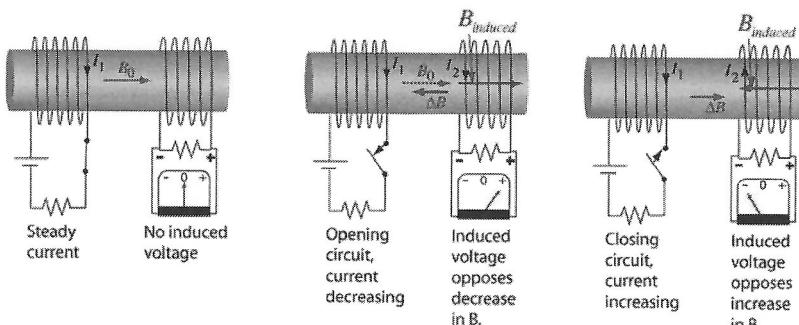
# HOOFDSTUK 30

## Inductie, elektromagnetische trillingen en wisselstroomschakelingen



1

### 30.1 WEDERZIJDSE INDUCTIE



$$M_{21} \equiv \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} \quad \text{wederzijdse inductie (coëfficiënt)}$$

met  $\Phi_{21}$  de magnetische flux doorheen  
spoel 2 tgv stroom  $I_1$  in spoel 1

als  $I_1$  tijdsafhankelijk is  $\rightarrow$  induceert emf in spoel 2

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -N_2 \frac{d}{dt} \left( \frac{M_{21} I_1}{N_2} \right) = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

2

1

analoog: tijdsafhankelijke stroom  $I_2$  in spoel 2 → induceert emf in spoel 1

$$\mathcal{E}_1 = -M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

wederzijdse inductie: emf geïnduceerd in een spoel is evenredig met snelheid van de stroomverandering in de andere spoel

algemeen:  $M_{12} = M_{21}$

$$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \quad \text{en} \quad \mathcal{E}_1 = -M \frac{dI_2}{dt}$$

eenheid:  $1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ H : Henry [H]}$



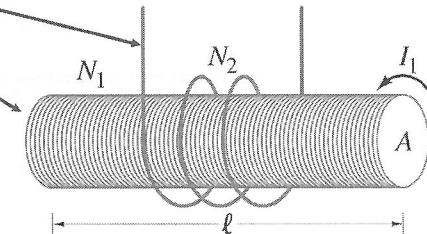
Joseph Henry, zie  
<http://siarchives.si.edu/history/exhibits/henry/career-scientist>

3

voorbeeld 30.1: solenoïde en spoel

wederzijdse inductie?

$$B = \mu_0 \frac{N_1}{\ell} I_1 \quad \text{met} \quad n = \frac{N_1}{\ell}$$



$$\text{flux in de spoel: } \phi_{21} = BA = \mu_0 \frac{N_1}{\ell} I_1 A$$

$$\text{of: } M = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} = \mu_0 \frac{N_1 N_2}{\ell} A$$

voorbeeld: transformator

enkel geometrie!

4

2

Toepassing: draadloos opladen van batterijen

spoel in handvat en basis  
lengte  $\ell$ ,  $N_B$  windingen, stroom  $I$

magneetveld  $B = \mu_0 \frac{N_B}{\ell} I$

veroorzaakt magnetische flux  $\Phi_{BH}$  in spoel in het handvat:  $\Phi_{BH} = BA$

$M = \frac{N_H \Phi_{BH}}{I} = \frac{N_H BA}{I} = \mu_0 \frac{N_H N_B A}{\ell}$

$\mathcal{E}_2 = -M \frac{dI}{dt} = -\mu_0 \frac{N_H N_B A}{\ell} \frac{dI}{dt}$

5

### 30.2 ZELFINDUCTIE

$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$  inductie van emk tgv veranderende flux

wat gebeurt er als de schakelaar gesloten wordt ?

stroom  $I \rightarrow B \rightarrow \frac{d\Phi_B}{dt} \rightarrow \mathcal{E}$  'back' emf = tegen-emk

de stroom gaat niet ogenblikkelijk naar  $I = \mathcal{E}/R$ , maar geleidelijk

= zelfinductie: veranderende flux en geïnduceerde spanning in zelfde spoel

**zelfinductie in een spoel :**

(a)

(b)

(c)

Lenz's law emf

Lenz's law emf

6

Zelfgeïnduceerde emk    flux  $\rightarrow$  magneetveld  $\rightarrow$  stroom

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}$$

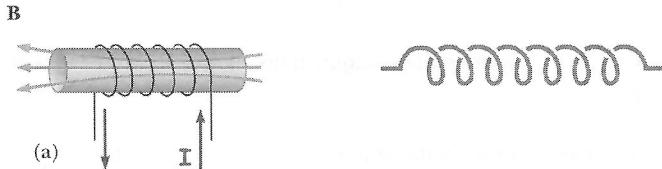
$L$  = zelfinductie van de spoel ('inductantie')

spoel met  $N$  wikkelingen     $\mathcal{E}_L = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$

dus     $L = \frac{N\Phi_B}{I}$     (als flux door elke wikkeling gaat)

$L = -\frac{\mathcal{E}_L}{\frac{dI}{dt}}$     eenheid :  $1 \text{ Vs/A} = 1 \text{ H}$  : Henry [H]

→ afhankelijk van de geometrie van de spoel

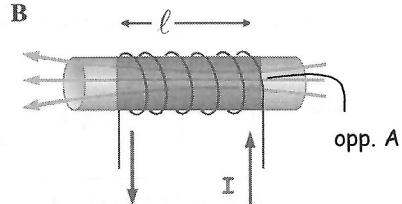


7

Zelfinductie in een spoel met  $N$  wikkelingen en lengte  $\ell$

magnetisch veld tgv stroom  $I$ :

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$



flux van het magnetisch veld:

$$\Phi_B = BA = \mu_0 \frac{NA}{\ell} I$$

zelfinductie van de spoel:     $L = \frac{N\Phi_B}{I} = \mu_0 \frac{N^2 A}{\ell} = \mu_0 n^2 \ell A = \mu_0 n^2 V$

$V = A\ell$  = volume binnen de spoel

= afhankelijk van de geometrie van de spoel  
= onafhankelijk van de stroom!

8

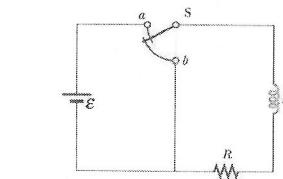
### 30.3 ENERGIE IN EEN MAGNETISCH VELD

kring sluiten  $\rightarrow$  niet alle energie van de batterij in de weerstand ( $I = \text{klein}$ )

een deel van de energie wordt in de spoel "opgeslagen"

$$\mathcal{E} - IR - L \frac{dI}{dt} = 0 \quad \rightarrow \quad I\mathcal{E} = I^2R + LI \frac{dI}{dt}$$

vermogen geleverd door de batterij



moet dus vermogen van de spoel zijn

vermogen verbruikt door de weerstand

$$U(t) = \text{energie in de spoel} \quad P = \frac{dU}{dt} = LI \frac{dI}{dt} \quad \rightarrow \quad U = \int dU = L \int_{I_0}^I IdI$$

$$U = \frac{1}{2} LI^2$$

energie opgeslagen in het magnetisch veld van de spoel

vergelijk: energie opgeslagen in elektrisch veld van een condensator:  $U = \frac{1}{2} C(\Delta V)^2$

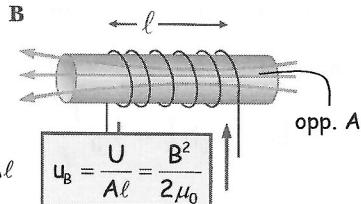
9

Energiedichtheid in een magnetisch veld

spoel met  $N$  wikkelingen, lengte  $\ell$ , oppervlakte  $A$

$$L = \mu_0 n^2 \ell A$$

$$B = \mu_0 \frac{NI}{\ell} \quad U_B = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 A \ell \left( \frac{B}{\mu_0} \right)^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} A \ell$$

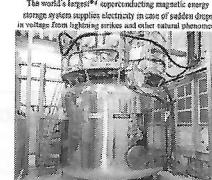
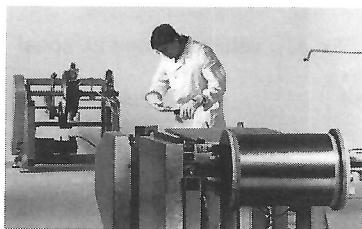


energiedichtheid opgeslagen in het elektrisch veld

$$U_E = \frac{\epsilon_0 E^2}{2}$$

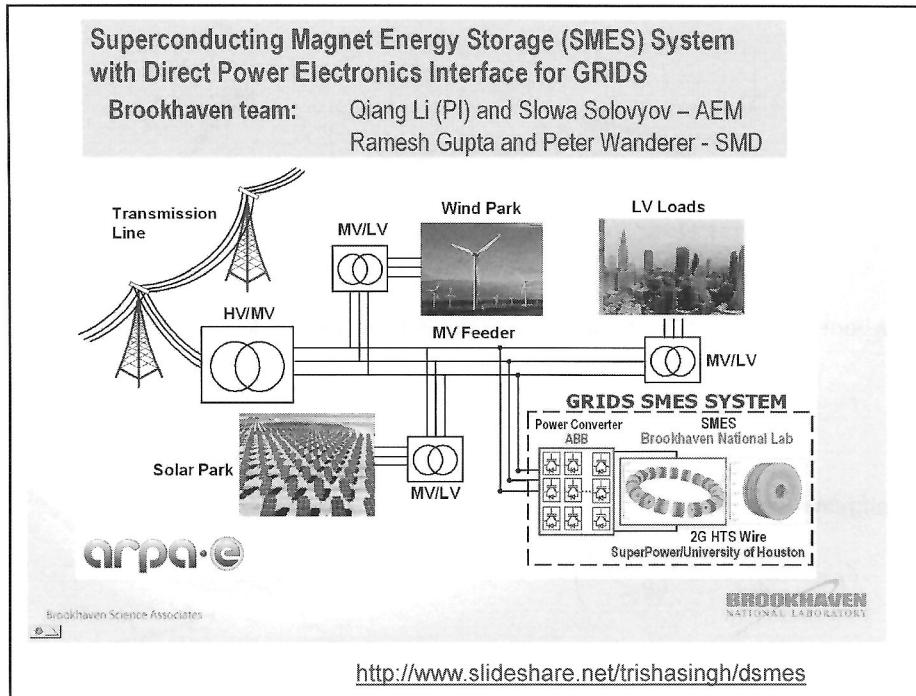
energiedichtheid opgeslagen in het magnetisch veld

$$U_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

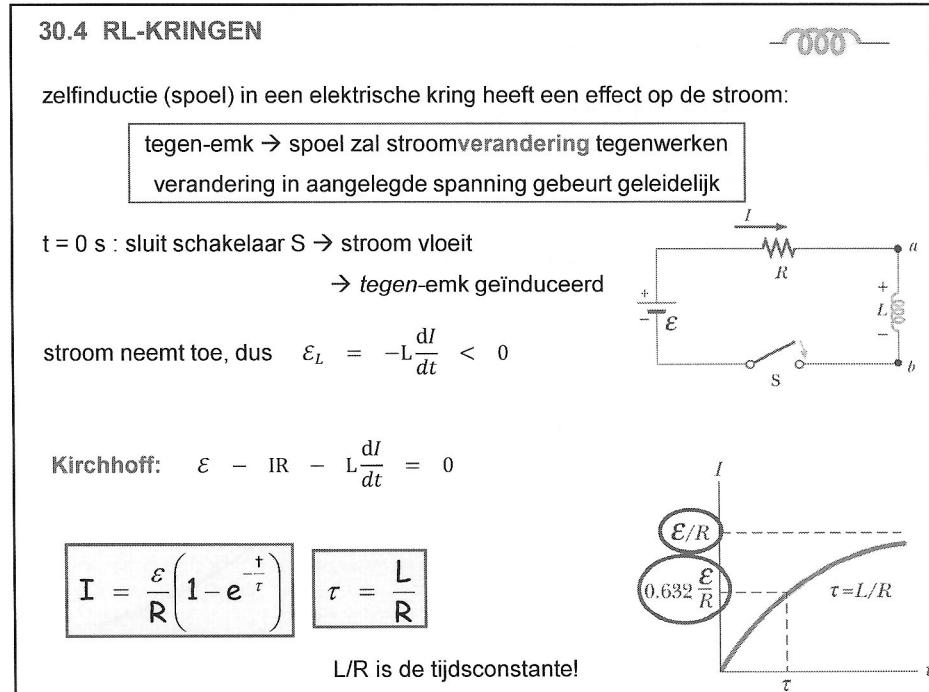


Toepassing: 'Superconducting Magnetic Energy Storage' (SMES) system

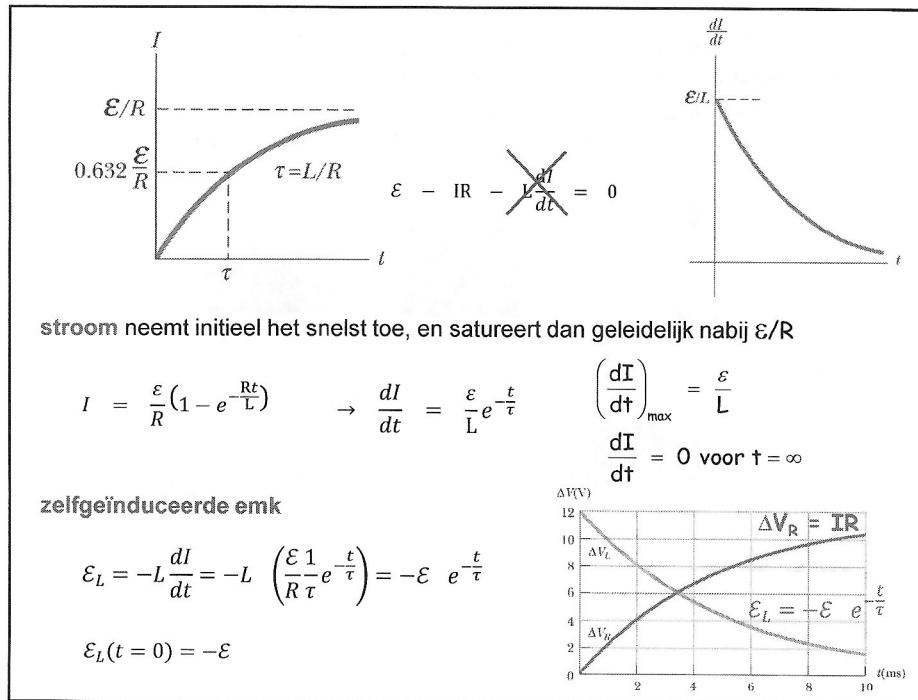
10



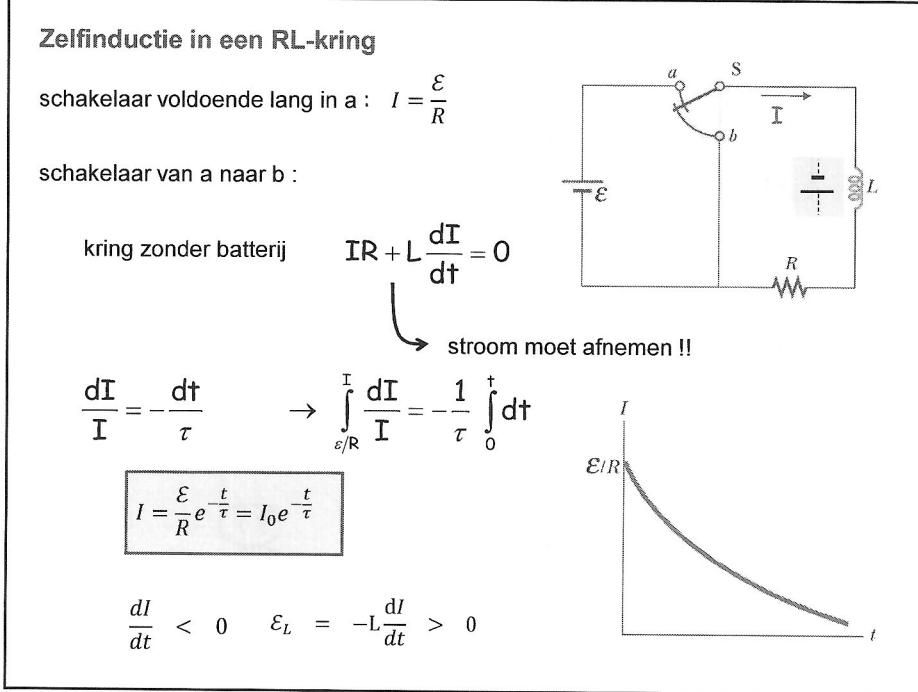
11



12



13



14

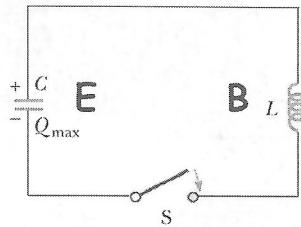
### 30.5 OSCILLATIES IN EEN LC-KRING

opgeladen condensator:  $Q_{\max}$   
sluit de schakelaar op  $t = 0$ :

condensator ontladt – stroom in kring door L

stel: geen weerstand in draden (geen dissipatie)  
geen straling van energie

voortdurende oscillatie van energie



15

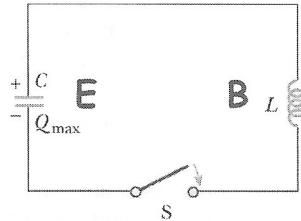
### 30.5 OSCILLATIES IN EEN LC-KRING

opgeladen condensator:  $Q_{\max}$   
sluit de schakelaar op  $t = 0$ :

condensator ontladt – stroom in kring door L

stel: geen weerstand in draden (geen dissipatie)  
geen straling van energie

voortdurende oscillatie van energie



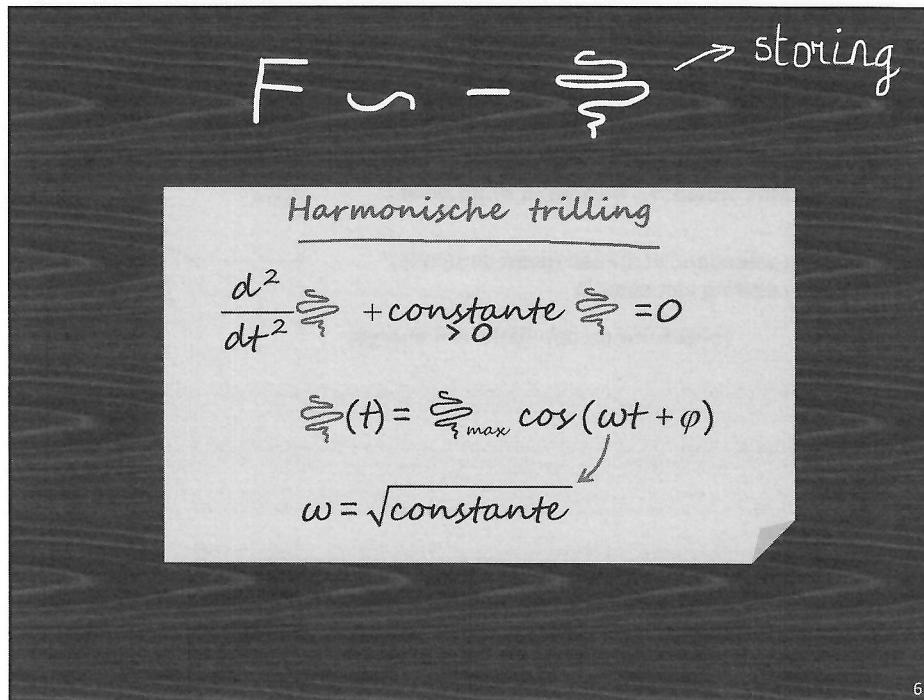
behoud van energie op willekeurig tijdstip  $t$ :  $U = U_C + U_L = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$

en totale energie blijft constant:  $\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(U_C + U_L) = \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = 0$

en  $I = \frac{dQ}{dt} \rightarrow \frac{Q}{C} + L \frac{d^2Q}{dt^2} = 0$

$\rightarrow \frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{Q}{LC}$

16



6

17

### 30.5 OSCILLATIES IN EEN LC-KRING

opgeladen condensator:  $Q_{\max}$   
sluit de schakelaar op  $t = 0$ :

condensator ontladt – stroom in kring door L

stel: geen weerstand in draden (geen dissipatie)  
geen straling van energie

voortdurende oscillatie van energie

behoud van energie op willekeurig tijdstip  $t$ :  $U = U_C + U_L = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}$

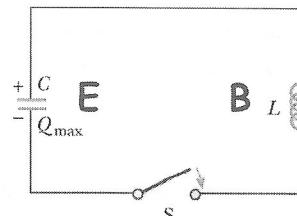
en totale energie blijft constant:  $\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt}(U_C + U_L) = \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = 0$

en  $I = \frac{dQ}{dt} \rightarrow \frac{Q}{C} + L \frac{d^2Q}{dt^2} = 0$

$\rightarrow \frac{d^2Q}{dt^2} = -\frac{Q}{LC}$

$Q = Q_{\max} \cos(\omega t + \phi) \quad \text{met} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega Q_{\max} \sin(\omega t + \phi)$



18

**Harmonische oscillatie tussen energie in condensator en inductie**

$$Q = Q_{\max} \cos(\omega t + \phi) \quad \left( \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \right)$$

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega Q_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad \boxed{\phi = 0}$$

op  $t = 0$  moet:  $I = 0$  en  $Q = Q_{\max}$

$\cos(\phi) = 1$  en  $\sin(\phi) = 0$

$$Q(t) = Q_{\max} \cos(\omega t) \quad I(t) \text{ is } 90^\circ \text{ uit fase met } Q(t)$$

$$I(t) = -\omega Q_{\max} \sin(\omega t)$$

19

**Energie ?**

$$U = \frac{Q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \frac{Q_{\max}^2}{2C} \cos^2 \omega t + \frac{LI_{\max}^2}{2} \sin^2 \omega t$$

oscillatie tussen energie in C en L, dus:  $\frac{Q_{\max}^2}{2C} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$

$$U = \frac{Q_{\max}^2}{2C} (\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) = \frac{Q_{\max}^2}{2C}$$

20

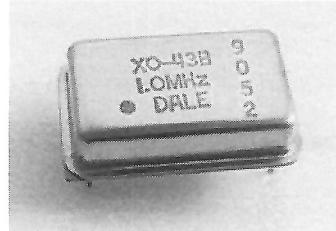
**Voorbeeld: oscillaties in een LC-kring**

eerst:  $S_2$  dicht en  $S_1$  open – condensator laadt op

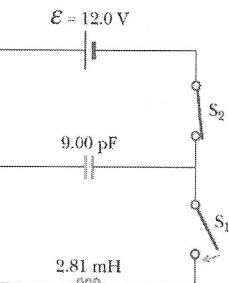
vervolgens:  $S_2$  open en  $S_1$  dicht

oscillatiefrequentie?

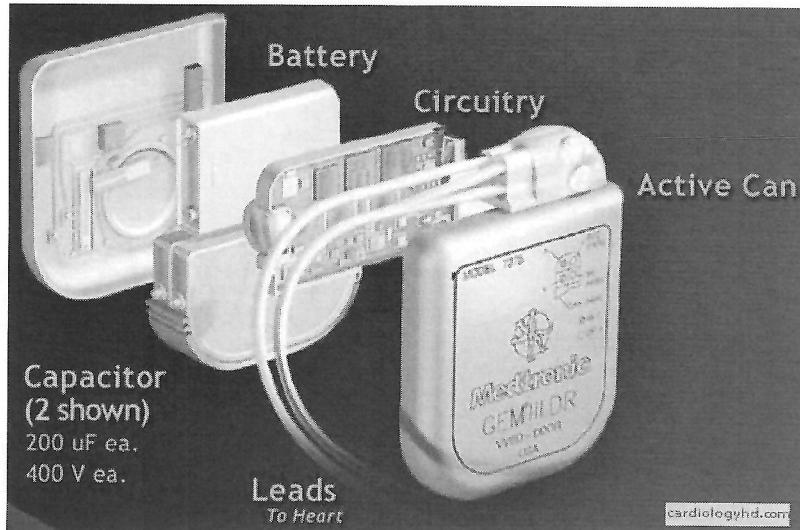
$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(2.81 \times 10^{-3})(9 \times 10^{-12})}} = 1.00 \times 10^6 \text{ Hz}$$



Oscillator voor gebruik in een elektronische schakeling

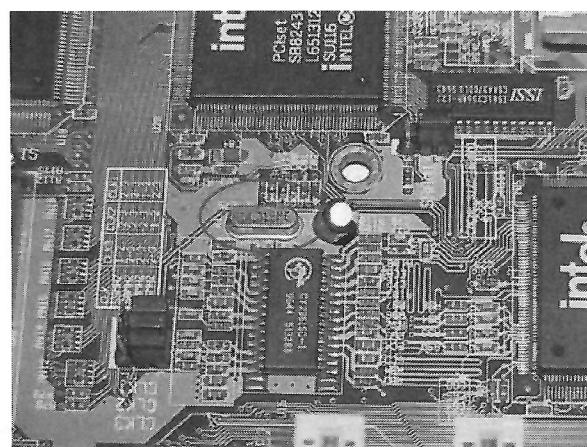


21

**Toepassing: timer van een pacemaker**

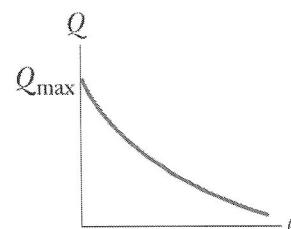
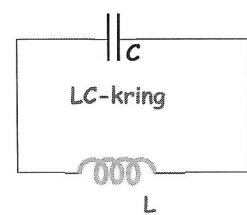
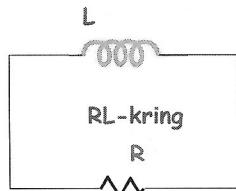
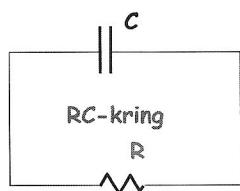
22

Toepassing: 'clock timer' van een computer CPU



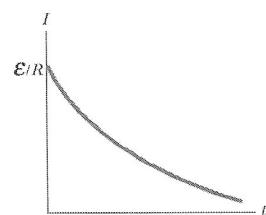
23

Verloop van stroom (lading) in verschillende kringen



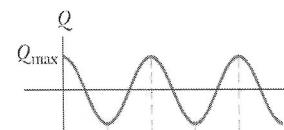
$$Q = Q_{\max} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = RC$$



$$I = I_{\max} e^{-t/\tau}$$

$$\tau = L/R$$



$$Q = Q_{\max} \cos(\omega t + \phi)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

24

### 30.6 De RLC-kring

eerst:  $S_1$  dicht en  $S_2$  open – condensator laadt op

vervolgens:  $S_1$  open en  $S_2$  dicht

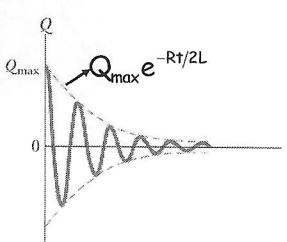
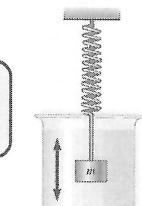
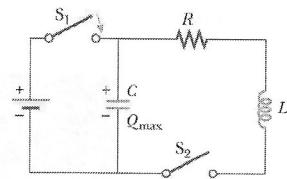
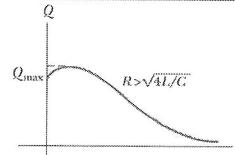
LC-oscillatie, maar met energieverlies in de weerstand!

$$L \frac{dI}{dt} + \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} = -I^2 R \xrightarrow{\text{delen door } I} L \frac{d^2Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0$$

kleine R gedempte harmonische oscillatie

$$Q = Q_{\max} e^{-Rt/2L} \cos \omega_d t \quad \text{met} \quad \omega_d = \left[ \frac{1}{LC} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2 \right]^{1/2}$$

grote R overdemping



25

### 30.9 Resonantie in een serie RLC-kring

Kwadratisch-gemiddelde stroomsterkte: maximum = resonantie

$$I_{\text{rms}}(\omega) = \frac{V_{\text{rms}}}{Z} = \frac{V_{\text{rms}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

$$\begin{aligned} L &= 5.0 \mu\text{H} \\ C &= 2.0 \text{ nF} \\ \Delta V_{\text{rms}} &= 5.0 \text{ mV} \\ \omega_0 &= 1.0 \times 10^7 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

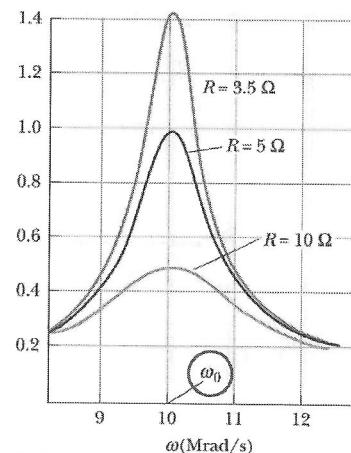
resonantiehoeksgenheid

= eigenpulsatie ongedempte kring:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

resonantiefrequentie:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



26