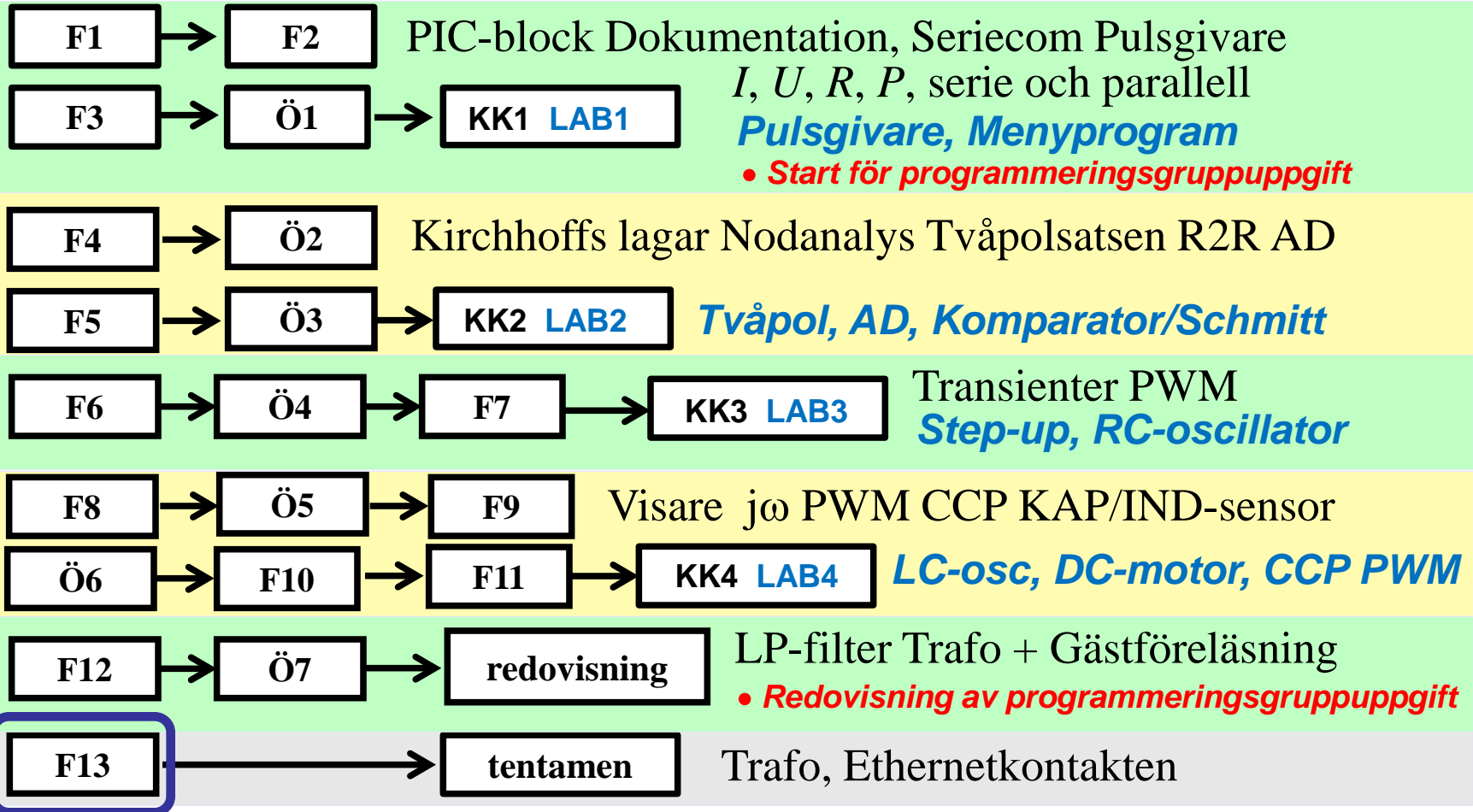
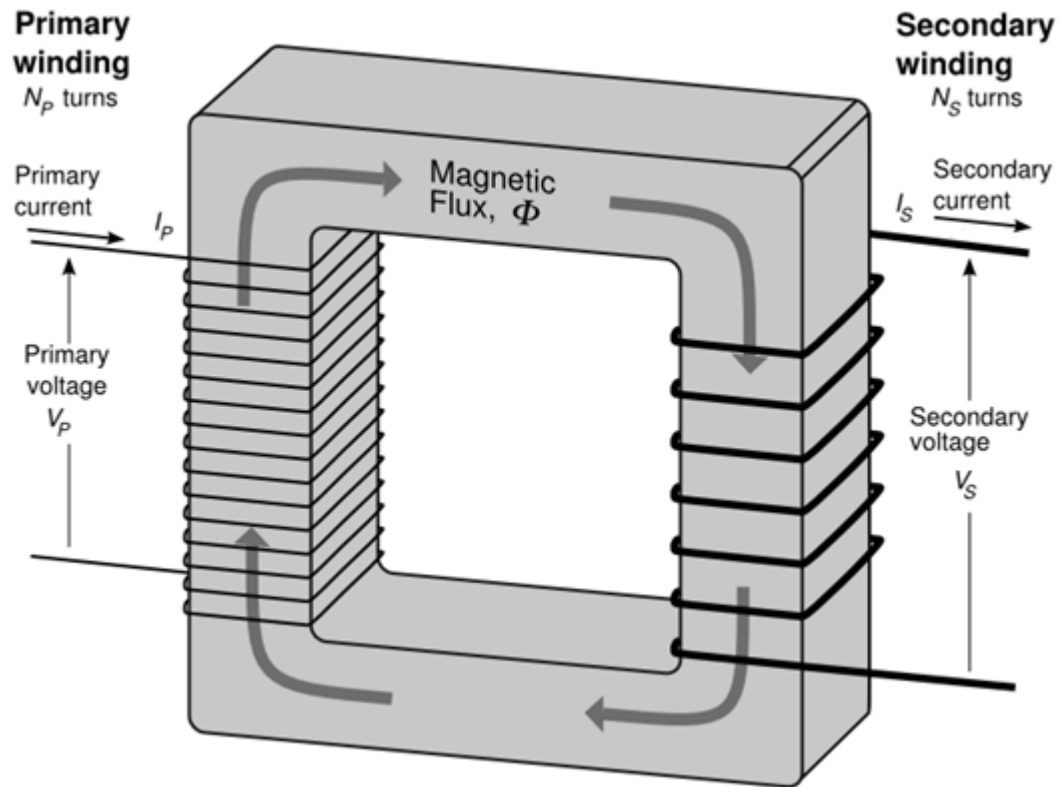


# IE1206 Inbyggd Elektronik



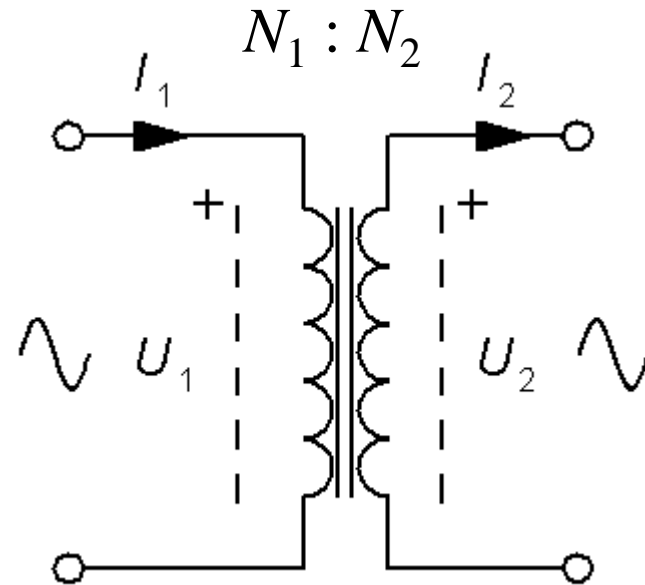
# Transformatorn



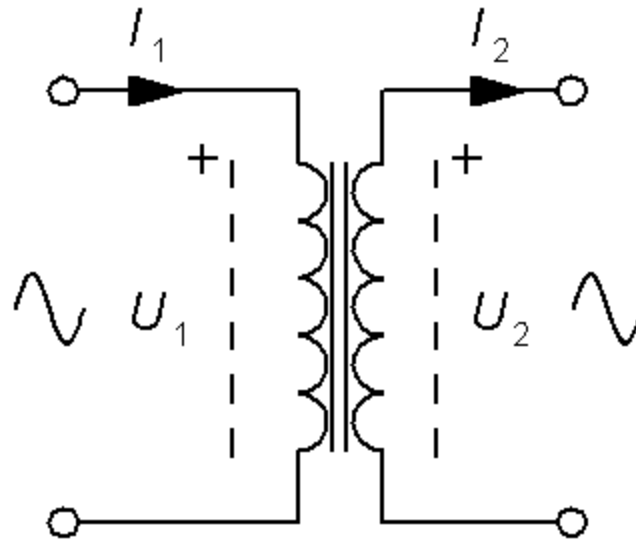
# Spänningsomsättning

$$U_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad U_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



# Ideal transformator $I_0 = 0$



$$N_1 \cdot I_0 = N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2$$

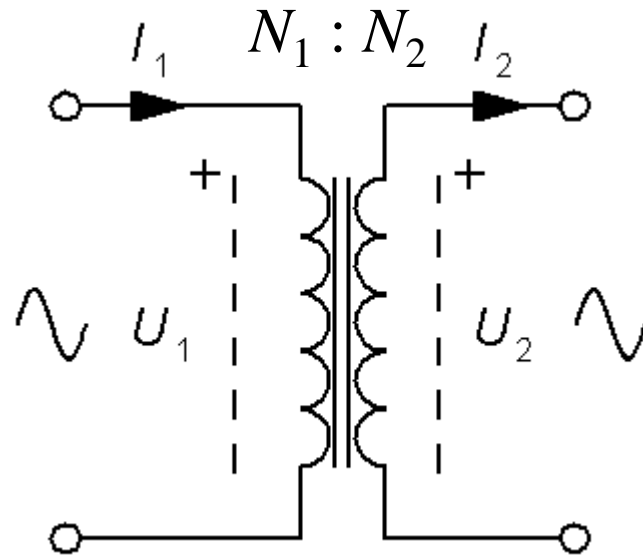
Magnetiseringströmmen  $I_0 \approx 0$  är *liten* i förhållande till arbetströmmarna  $I_1$  och  $I_2$ . Transformatorn har hög induktans.

# Strömomsättning

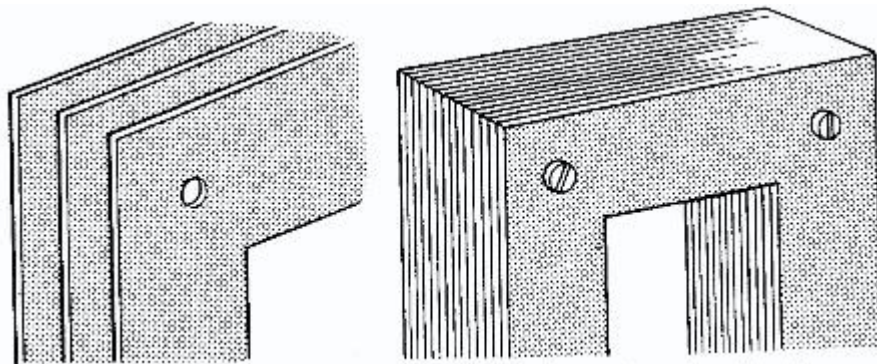
$$P_1 = P_2 \quad (P_0, I_0 = 0)$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

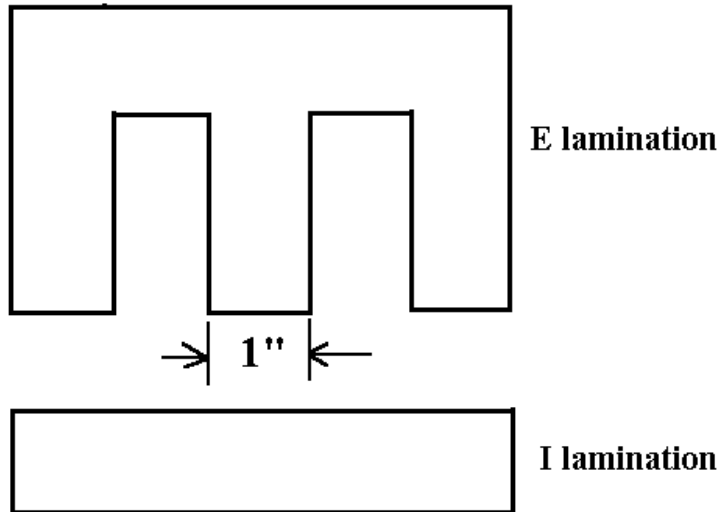


# Virvelströmsförluster



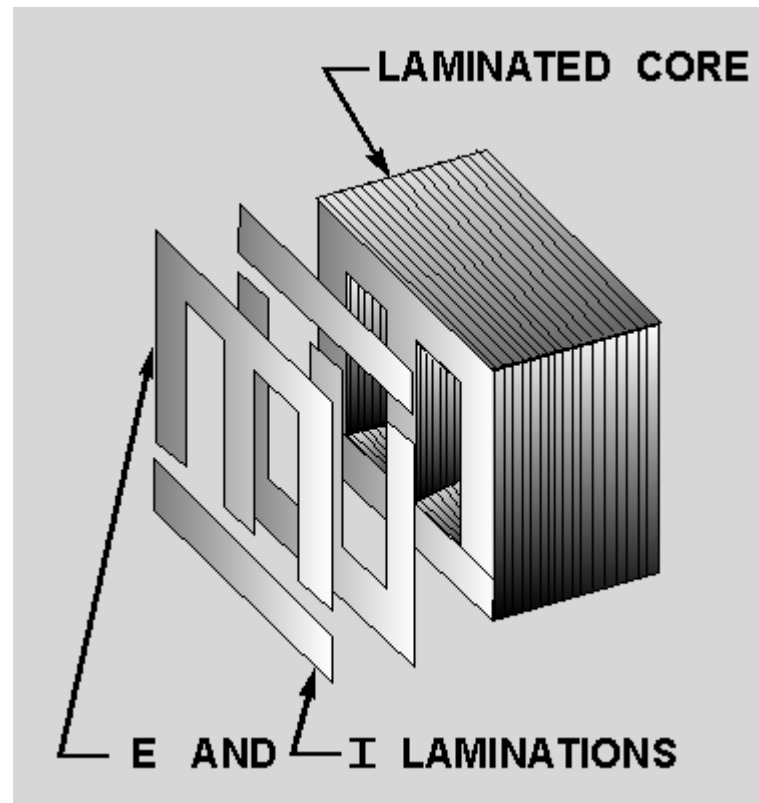
Virvelströmsförluster – strömmar i järnkärnan förhindras med lackerade ( = isolering ) plåtar.

# E I -kärna



EI-kärnan är materialsnål!

# E I -kärna





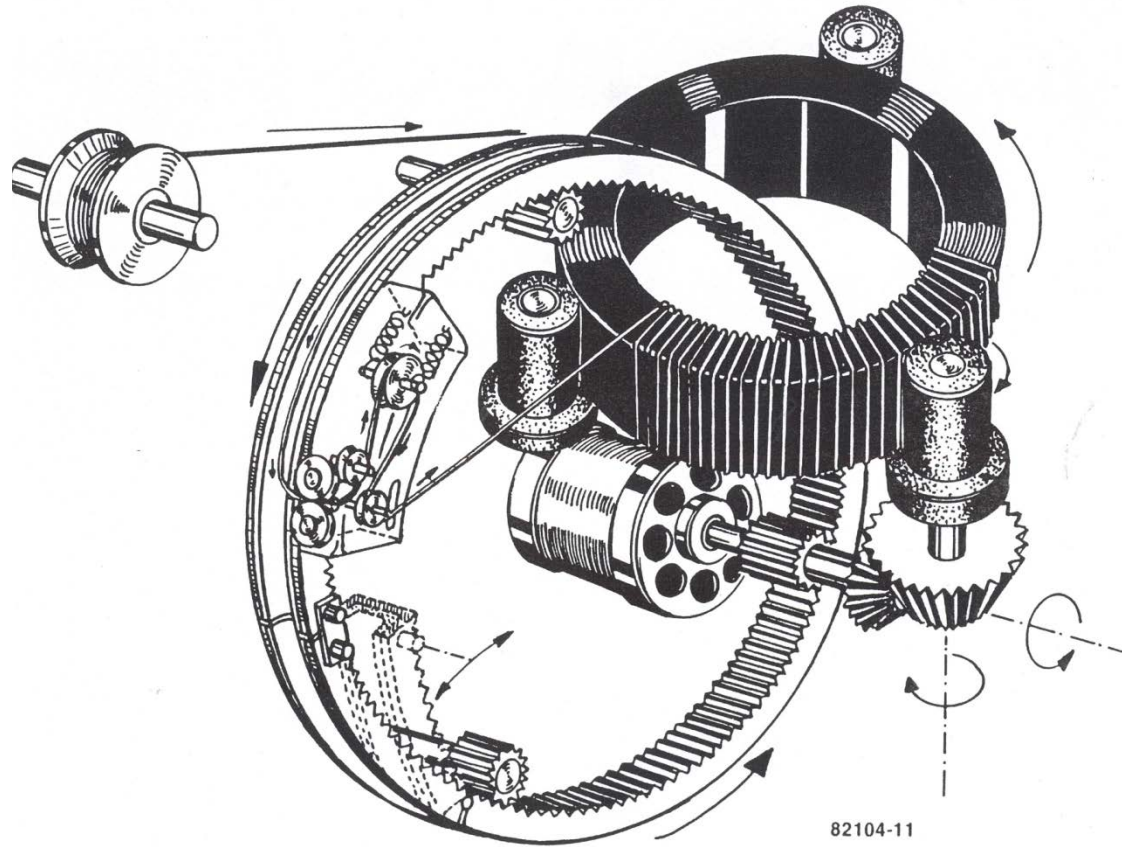
# Toroid



Toroidkärnan har lågt läckfält – stör ej närliggande elektronik!

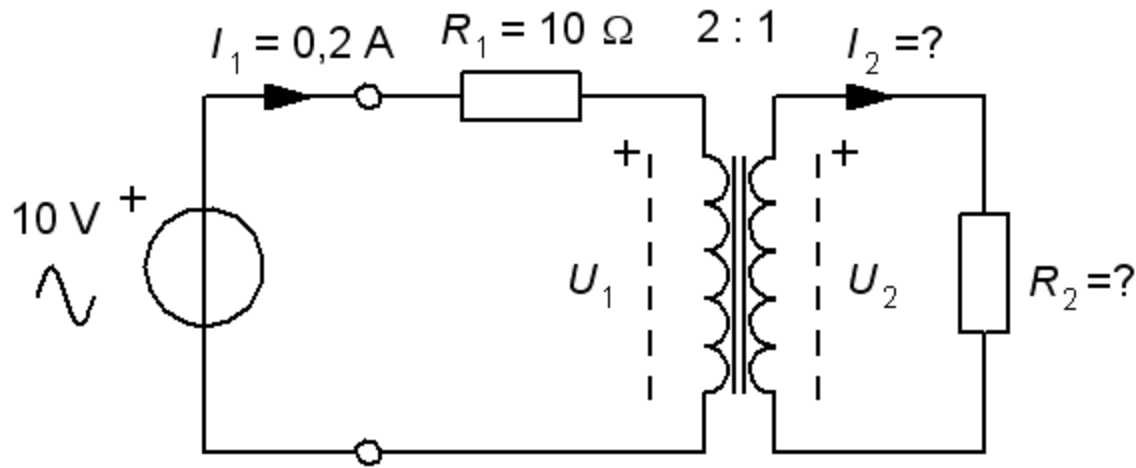
*Hur lindar man en sådan?*

# Automatlindning av toroidkärna

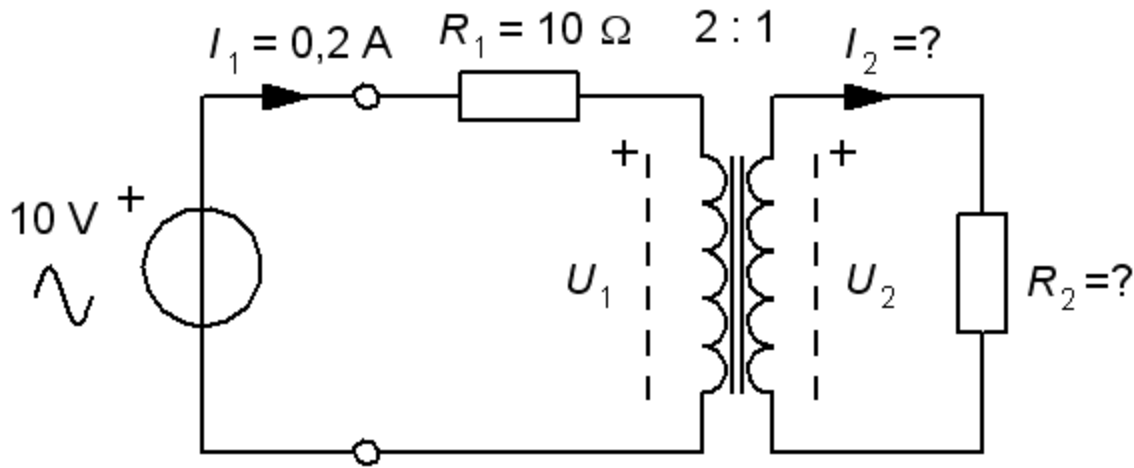


William Sandqvist [william@kth.se](mailto:william@kth.se)

# Transformatorn (15.4)

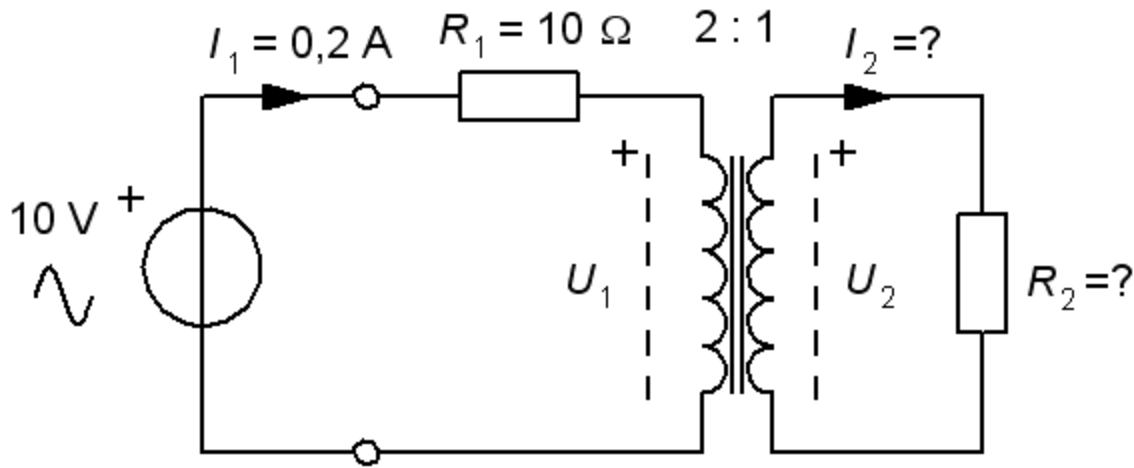


# Transformatorn (15.4)



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{1} \Rightarrow$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$$

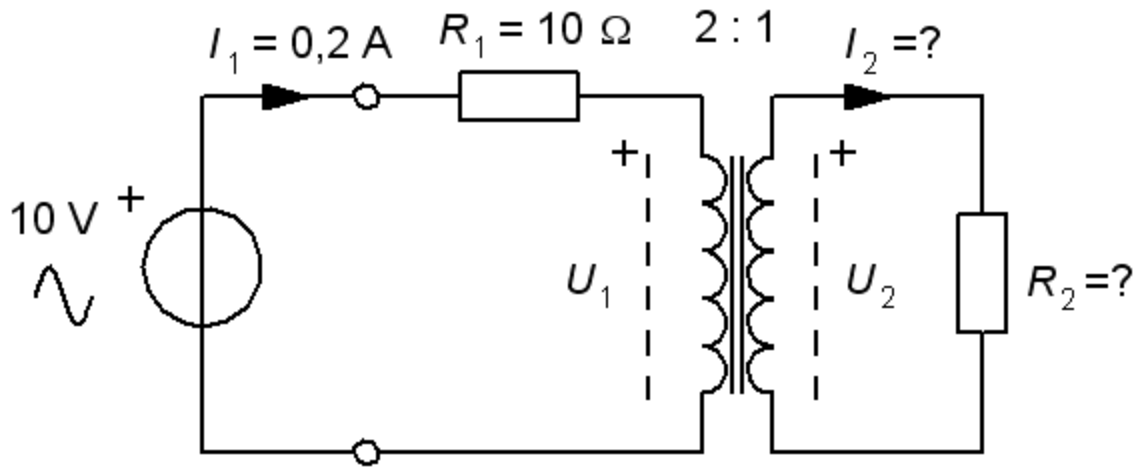
# Transformatorn (15.4)



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{1} \Rightarrow$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$$

$$10 - R_1 \cdot I_1 - U_1 = 0 \Rightarrow U_1 = 10 - 0,2 \cdot 10 = 8$$

# Transformatorn (15.4)

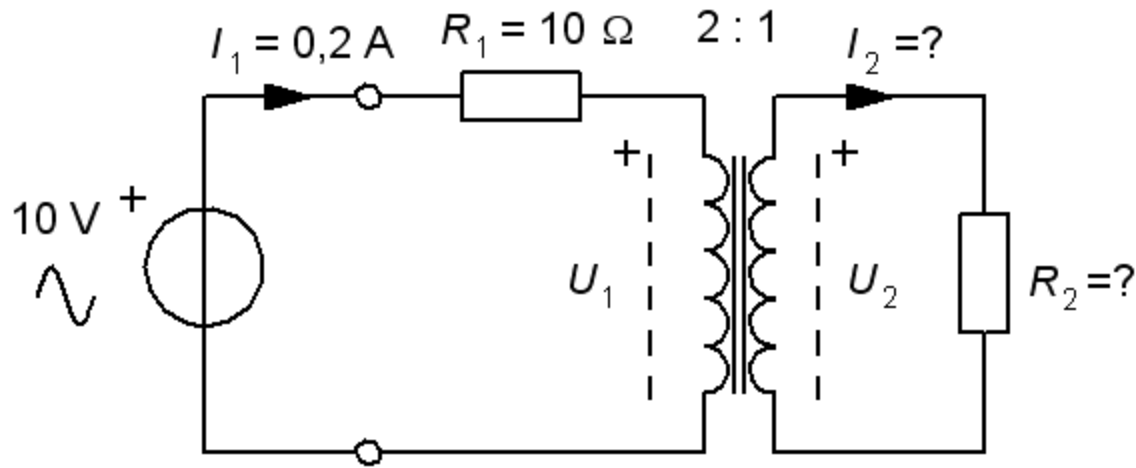


$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{1} \Rightarrow$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$$

$$10 - R_1 \cdot I_1 - U_1 = 0 \Rightarrow U_1 = 10 - 0,2 \cdot 10 = 8$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{8}{2} = 4$$

# Transformatorn (15.4)



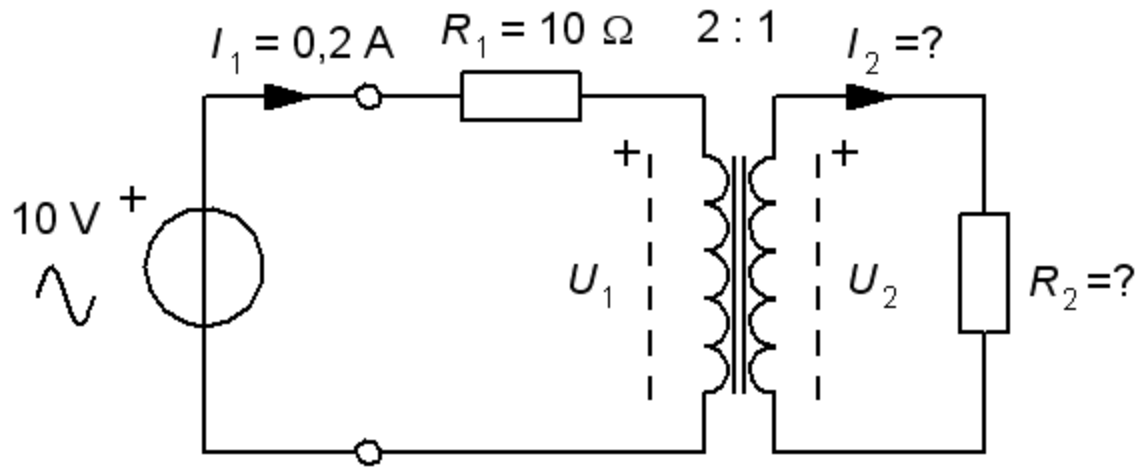
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{1} \Rightarrow$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$$

$$10 - R_1 \cdot I_1 - U_1 = 0 \Rightarrow U_1 = 10 - 0,2 \cdot 10 = 8$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{8}{2} = 4 \quad I_2 = I_1 \cdot \frac{2}{1} = 0,4$$



# Transformatorn (15.4)



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2}{1} \Rightarrow$$
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{2}$$

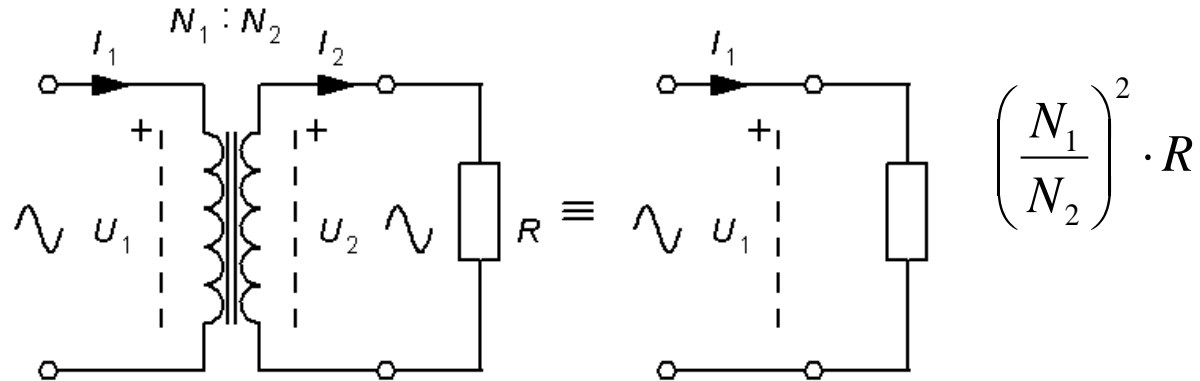
$$10 - R_1 \cdot I_1 - U_1 = 0 \Rightarrow U_1 = 10 - 0,2 \cdot 10 = 8$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{1}{2} = \frac{8}{2} = 4 \quad I_2 = I_1 \cdot \frac{2}{1} = 0,4$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{4}{0,4} = 10 \Omega$$

William Sandqvist [william@kth.se](mailto:william@kth.se)

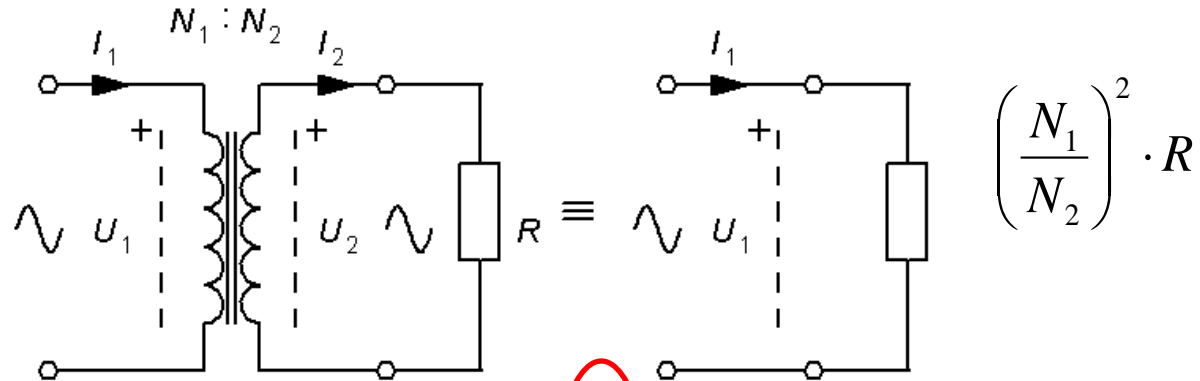
# Överräkning av impedanser



$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} U_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}$$

$$R_{1 \leftarrow 2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2$$

# Överräkning av impedanser



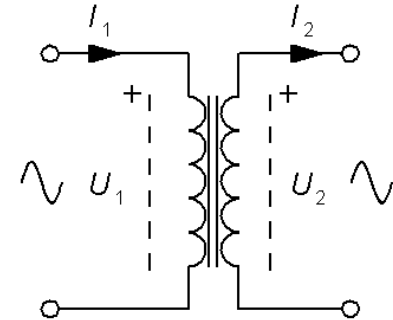
$$R_1 = \frac{U_1}{I_1} \quad R_2 = \frac{U_2}{I_2} \quad \frac{U_1}{I_1} = \frac{\frac{N_1}{N_2} U_2}{\frac{N_2}{N_1} I_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}$$

$$R_{1 \leftarrow 2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \cdot R_2$$

# Överräkning

Vi har en transformator med spänningsomsättningen 240V/120V.

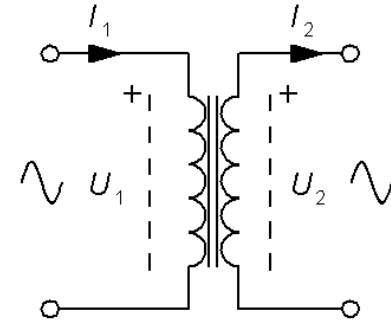
Man har två kondensatorer på  $1\mu\text{F}$  och  $16\mu\text{F}$ . Hur ska man koppla för att få  $5\mu\text{F}$  ?



# Överräkning

Vi har en transformator med spänningsomsättningen 240V/120V.

Man har två kondensatorer på  $1\mu\text{F}$  och  $16\mu\text{F}$ . Hur ska man koppla för att få  $5\mu\text{F}$  ?



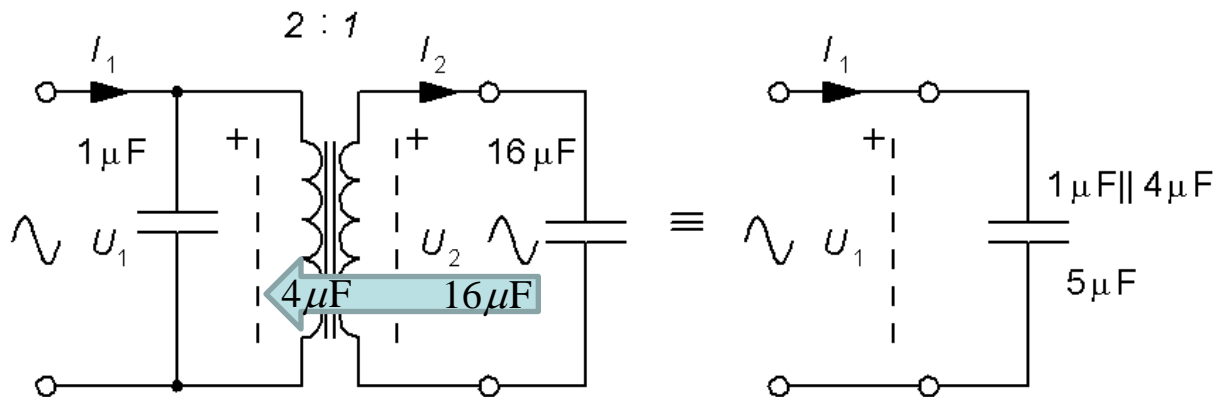
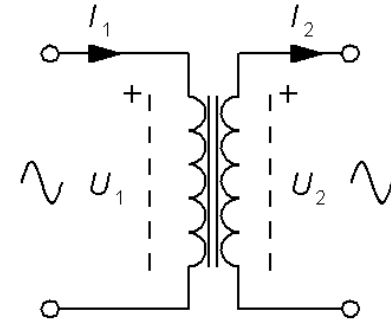
$$Z_2 = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow$$

$$Z_{1 \leftarrow 2} = \frac{1}{\omega C} \cdot 2^2 = \frac{1}{\omega(C/4)}$$

# Överräkning

Vi har en transformator med spänningsomsättningen 240V/120V.

Man har två kondensatorer på  $1\mu\text{F}$  och  $16\mu\text{F}$ . Hur ska man koppla för att få  $5\mu\text{F}$ ?



$$Z_2 = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow$$

$$Z_{1 \leftarrow 2} = \frac{1}{\omega C} \cdot 2^2 = \frac{1}{\omega(C/4)}$$

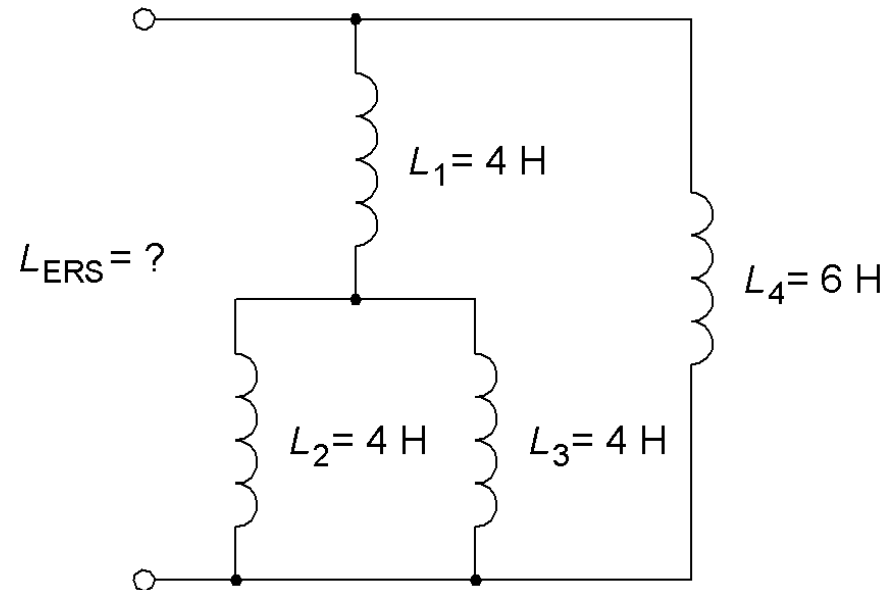
William Sandqvist [william@kth.se](mailto:william@kth.se)



# Serie och parallellkoppling av induktorer

(Ex. 15.6) Under förutsättningen att inga av spolarna delar magnetiska kraftlinjer med varandra, utan är helt av varandra **oberoende komponenter**, kan man behandla serie- och parallellkopplade induktanser **precis som om de vore resistorer**.

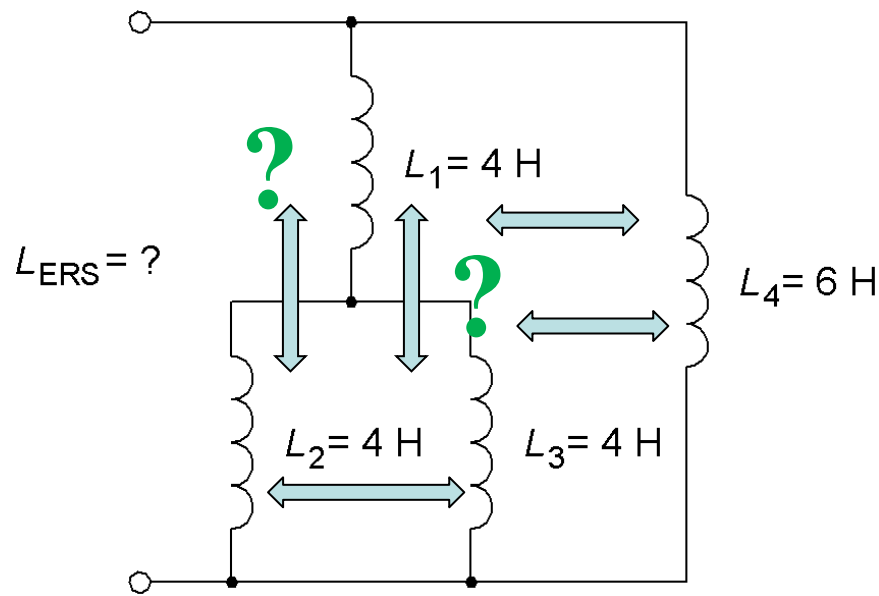
$$L_{\text{ERS}} = \frac{\left(4 + \frac{4 \cdot 4}{4 + 4}\right) \cdot 6}{4 + \frac{4 \cdot 4}{4 + 4} + 6} = 3 \text{ H}$$



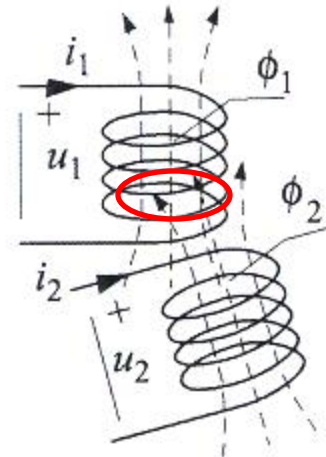
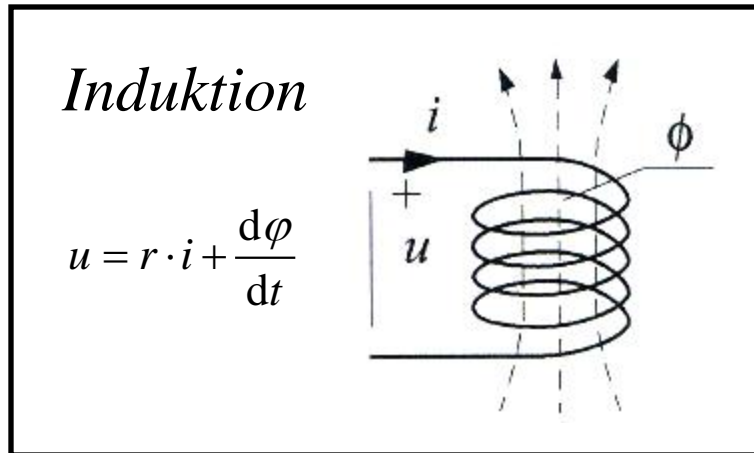
# Serie och parallellkoppling av induktorer?

Vi har tidigare studerat serie och parallellkopplade spolar som om de vore helt **oberoende komponenter** som *inte* delat magnetiska kraftlinjer med varandra.

*Här behandlas nu spolar med sammanlänkat flöde*



# Induktiv koppling



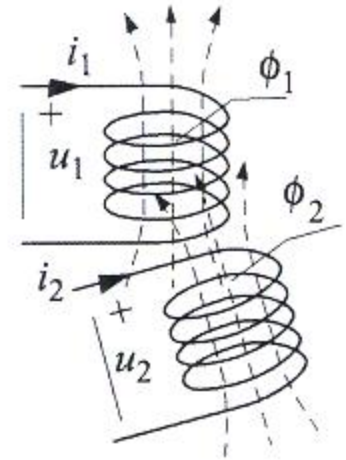
En del av flödet i spole 1 är **sammanlänkat** med flöde från spole 2.

$$u_1 = r_1 \cdot i_1 + \frac{d\phi_1}{dt} \quad \phi_1 = i_1 \cdot L_1 + i_2 \cdot M$$

På samma sätt:

$$u_2 = r_2 \cdot i_2 + \frac{d\phi_2}{dt} \quad \phi_2 = i_2 \cdot L_2 + i_1 \cdot M$$

# Induktiv koppling



$\pm M$  kallas för ömsinduktansen

$$u_1 = r_1 \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = r_2 \cdot i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

$j\omega$ -metoden:

$$U_1 = r_1 \cdot I_1 + j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2$$

$$U_2 = r_2 \cdot I_2 + j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1$$

En ideal transformator har  
kopplingsfaktorn  $k = 1$  (100%)

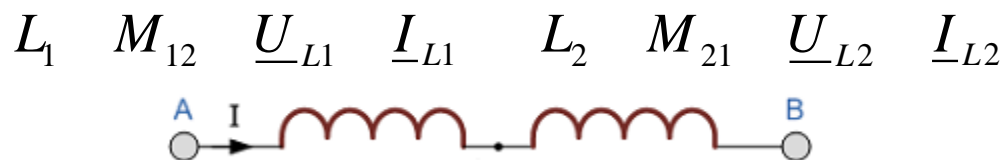
Kopplingsfaktorn:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

*Kopplingsfaktorn anger hur stor del av flödet en spole har gemensamt med en annan spole*

# Seriekopplade med ömsesidig induktans

*Härledning:*



$$\underline{U}_{L1} = j\omega L_1 \underline{I}_{L1} \pm j\omega M_{12} \underline{I}_{L2} \quad \underline{U}_{L2} = j\omega L_2 \underline{I}_{L2} \pm j\omega M_{21} \underline{I}_{L1}$$

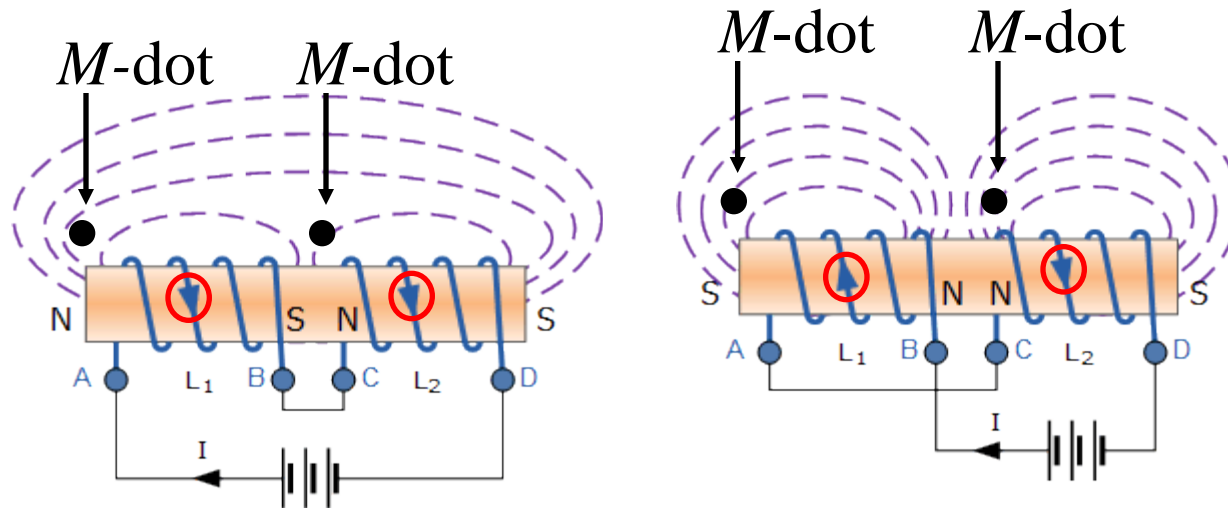
Seriekoppling innebär *samma* ström

$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{L2} = \underline{I} \quad \underline{U} = \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L2} \quad M_{12} = M_{21} = M \quad \Rightarrow$$

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot j\omega(L_1 \pm M + L_2 \pm M)$$

$$\frac{\underline{U}}{\underline{I}} = j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)$$

# Seriekopplade med ömsesidig induktans



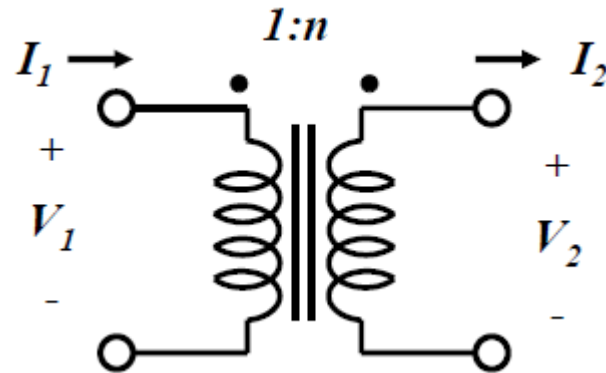
Seriekoppling innebär samma ström  $I_1 = I_2 = I$

$$L_{TOT} = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_{TOT} = L_1 + L_2 - 2M$$

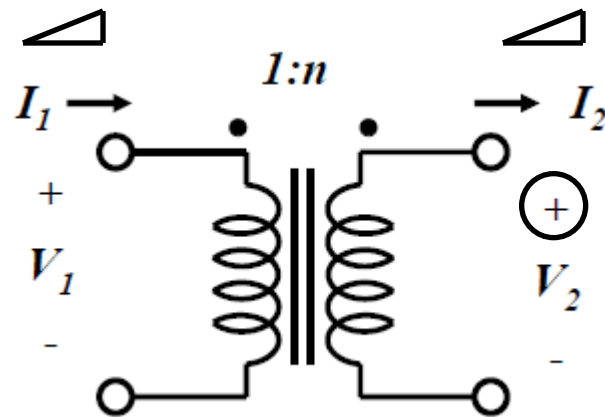
$M$  kan bidra eller motverka till flödet, detta ger  $\pm$  tecken. Därför brukar spolars lindningspolaritet anges med ”punkt konvention” (dot convention) i schemor.

# ”Dot” convention



En växande ström *in* i en punkt (dot) leder till inducerade spänningar riktade så att de skulle ge växande strömmar *ut* ur andra punkter

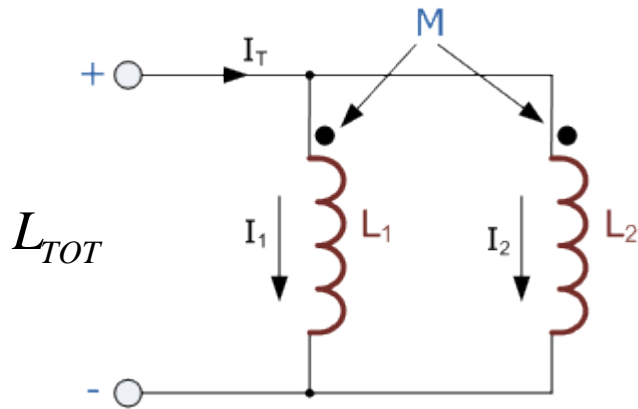
# ”Dot” convention



En växande ström ***in*** i en punkt (dot) leder till inducerade spänningar riktade så att de skulle ge växande strömmar ***ut*** ur andra punkter

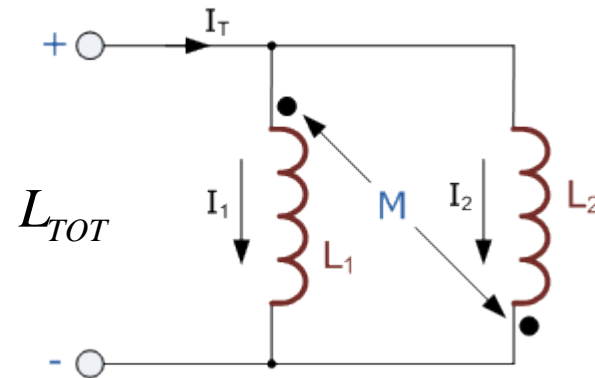


# Parallellkopplade med ömsesidig induktans



Parallellkopplade spolar

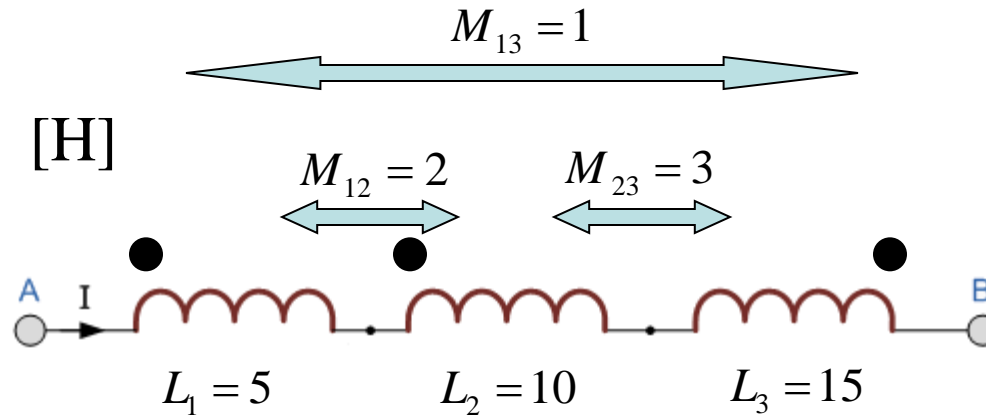
$$L_{TOT} = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$



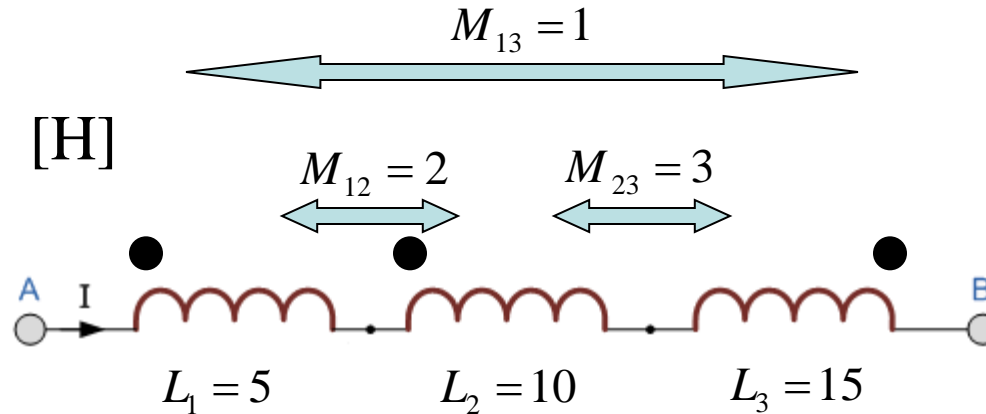
**Antiparallellkopplade spolar**

$$L_{TOT} = \frac{L_1 \cdot L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$

# Ex. 15.7 Seriekoppling



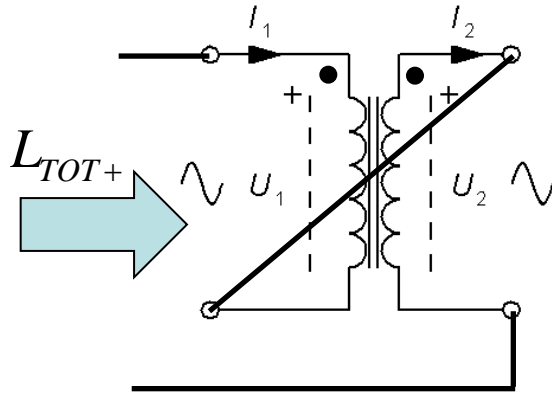
# Ex. 15.7 Seriekoppling



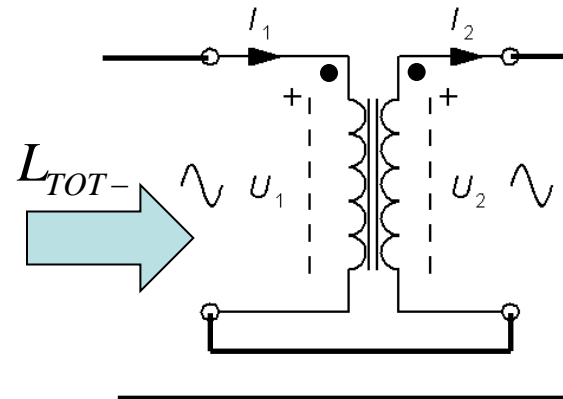
$$\begin{aligned}
 L_{\text{TOT}} &= \\
 &L_1 + M_{12} - M_{13} + \\
 &L_2 + M_{12} - M_{23} + \\
 &L_3 - M_{23} - M_{13} = \\
 &= 5 + 2 - 1 + 10 + 2 - 3 + 15 - 3 - 1 = 26 \text{ [H]}
 \end{aligned}$$

William Sandqvist [william@kth.se](mailto:william@kth.se)

# Att mäta ömsinduktansen?

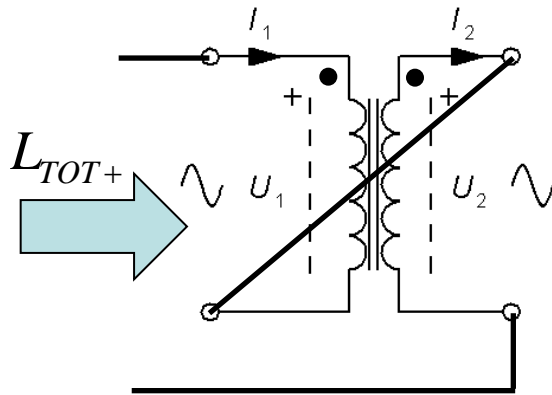


$$L_{TOT+} = L_1 + L_2 + 2M$$

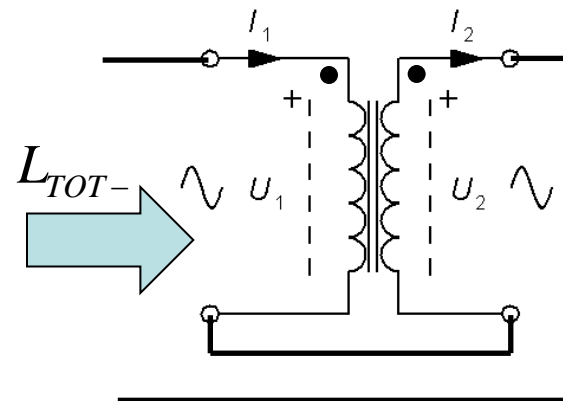


$$L_{TOT-} = L_1 + L_2 - 2M$$

# Att mäta ömsinduktansen?



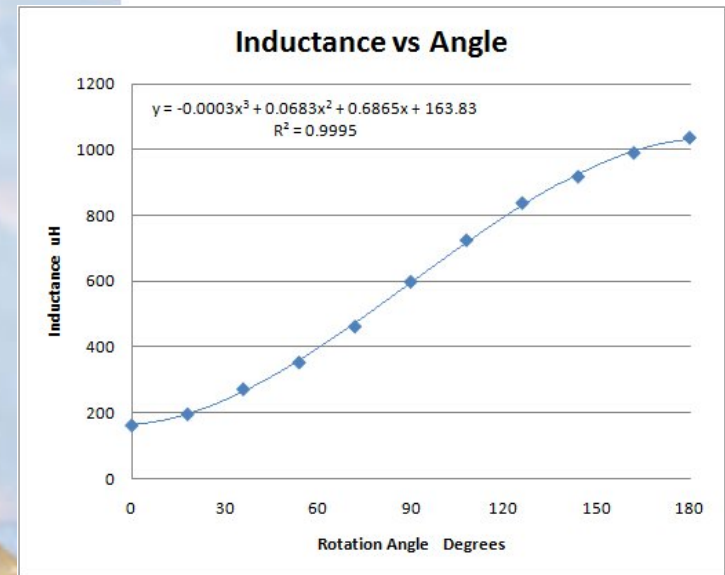
$$L_{TOT+} = L_1 + L_2 + 2M$$



$$L_{TOT-} = L_1 + L_2 - 2M$$

$$M = \frac{L_{TOT+} - L_{TOT-}}{4}$$

# Variometer (till en antik radio)



$$L_{TOT} = L_1 + L_2 \pm 2M$$

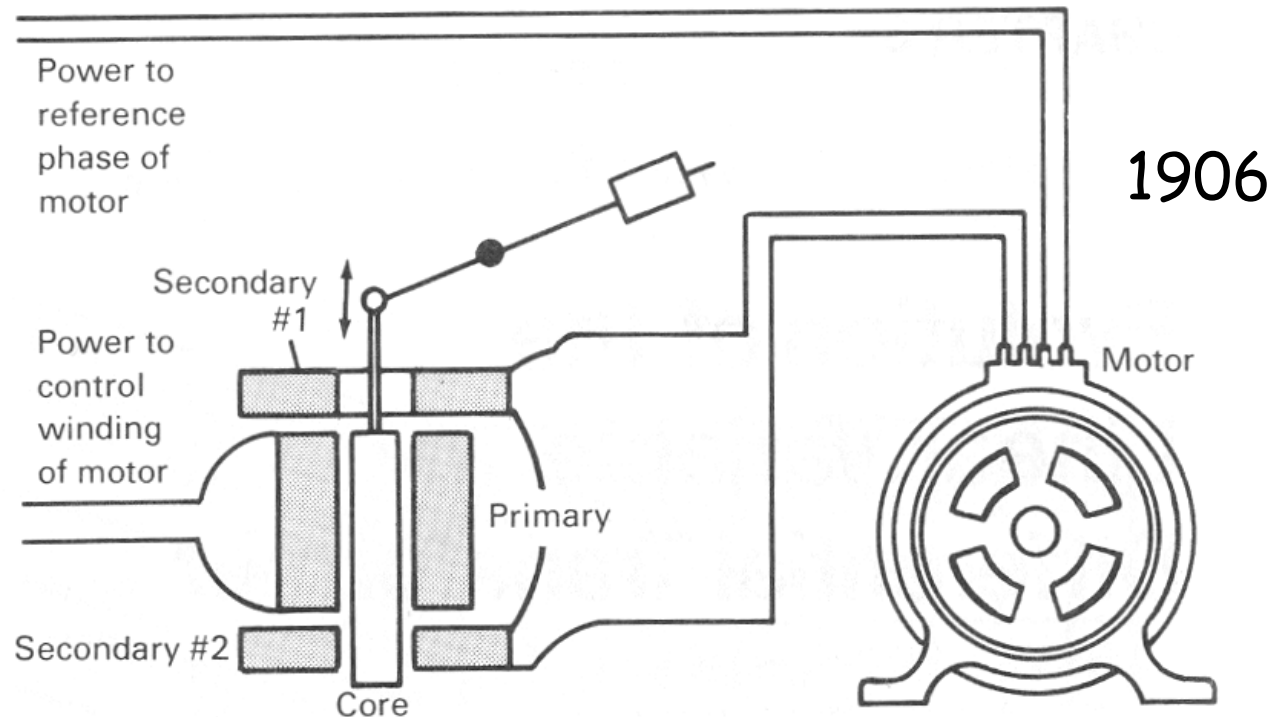
$$M = f(\alpha)$$



William Sandqvist [william@kth.se](mailto:william@kth.se)



# Ett dåligt ställdon kan bli en bra givare



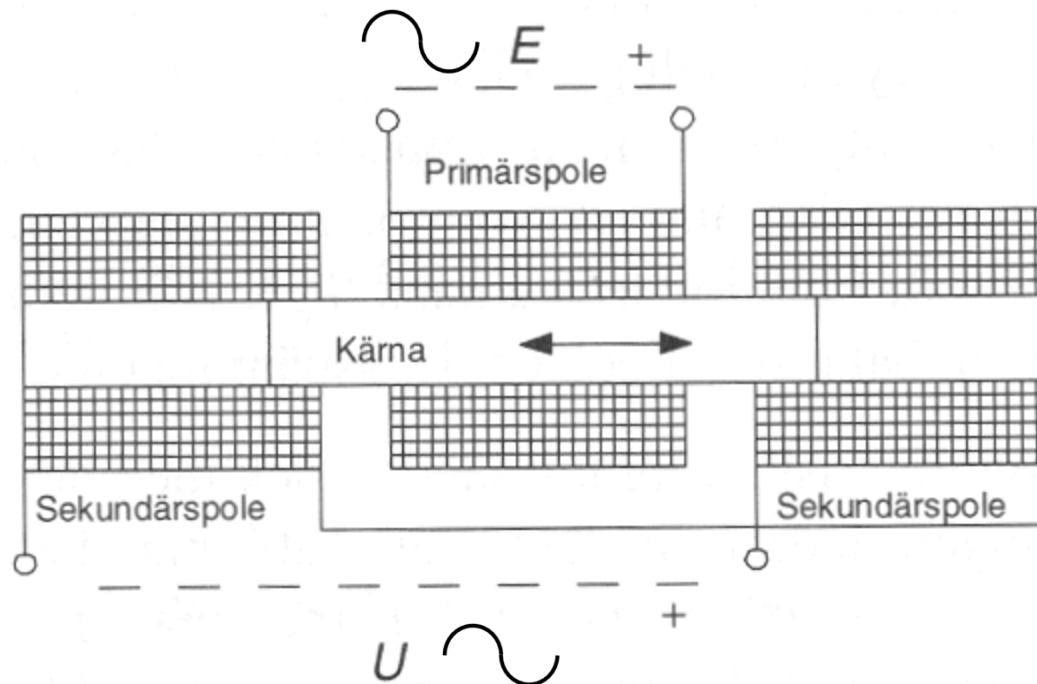
*Porter & Currier patent (simplified), the earliest variable differential transformer.*

# Industrins "stryktåliga" positions-sensor



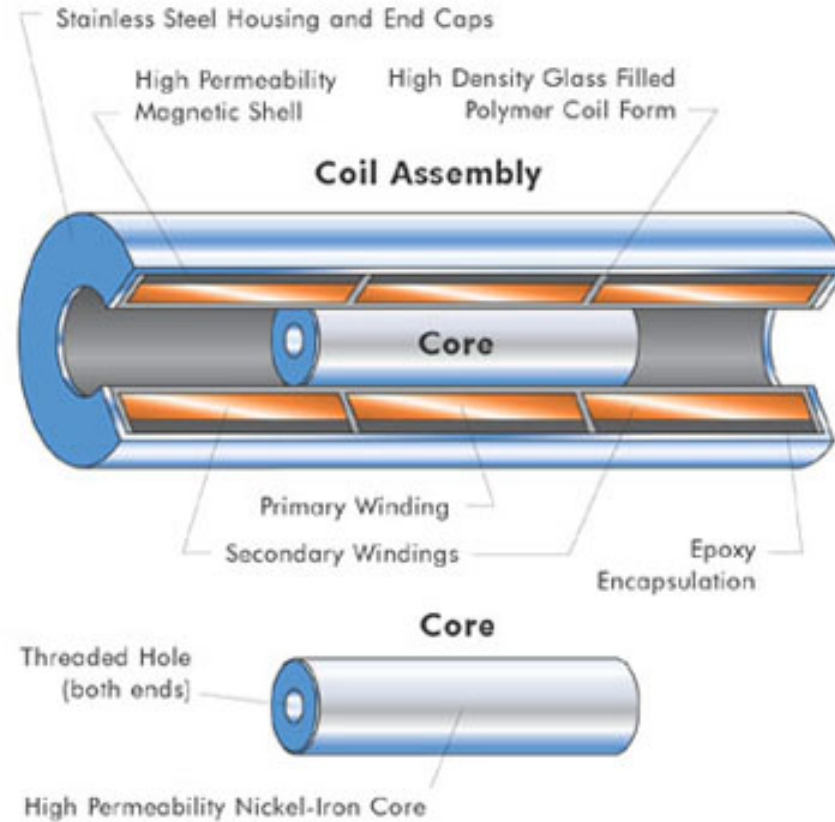
# Differentialtransformatorn

LVDT Linear Variable Differential Transformer

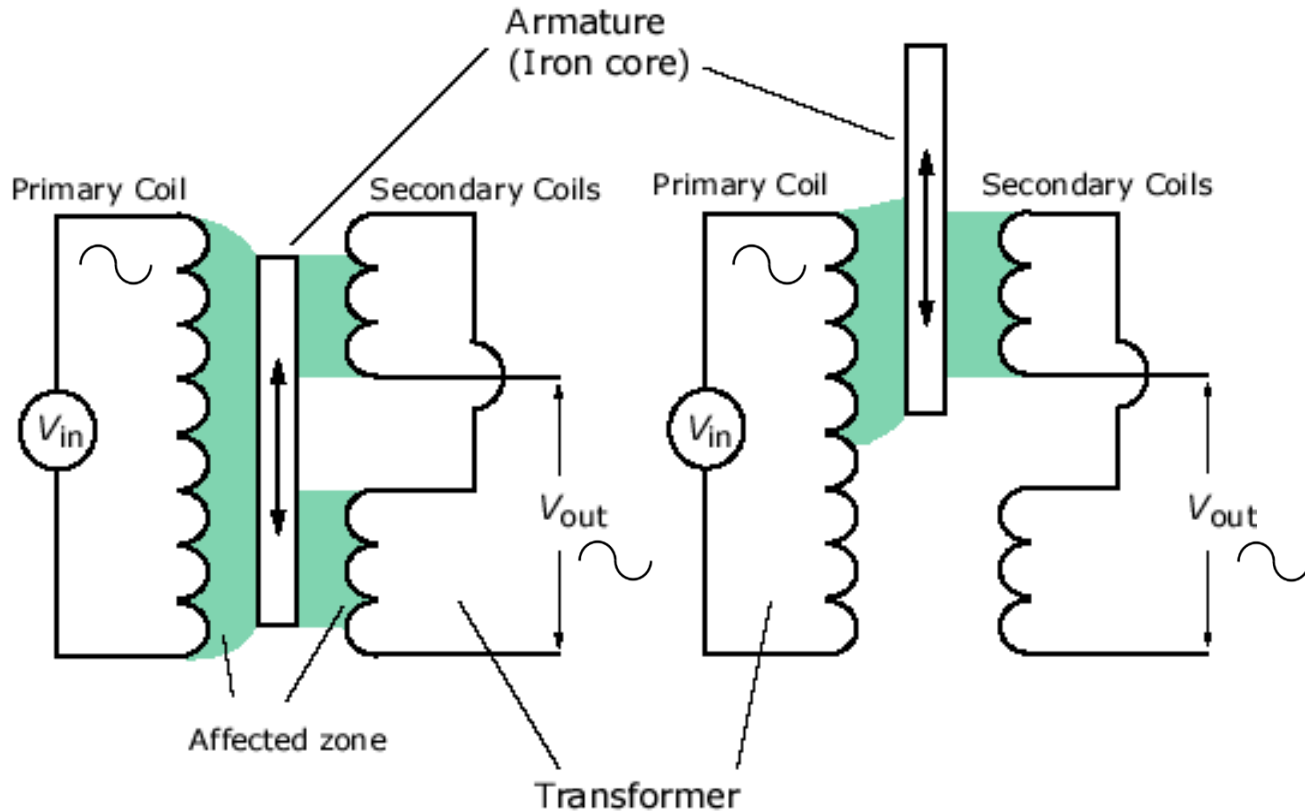


Sekundärspolarna är seriekopplade men med motsatt spänningsriktning – när kärnan är i mitten blir  $U = 0$ .

# LVDT Utförande

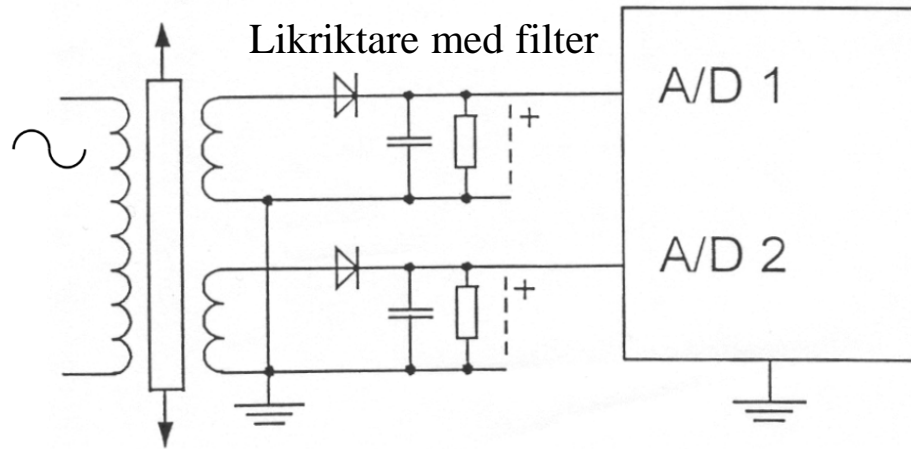


# LVDT princip



Utspänningen är relativt hög – det gör detta till en populär givare ...

# LVDT Mätutrustning

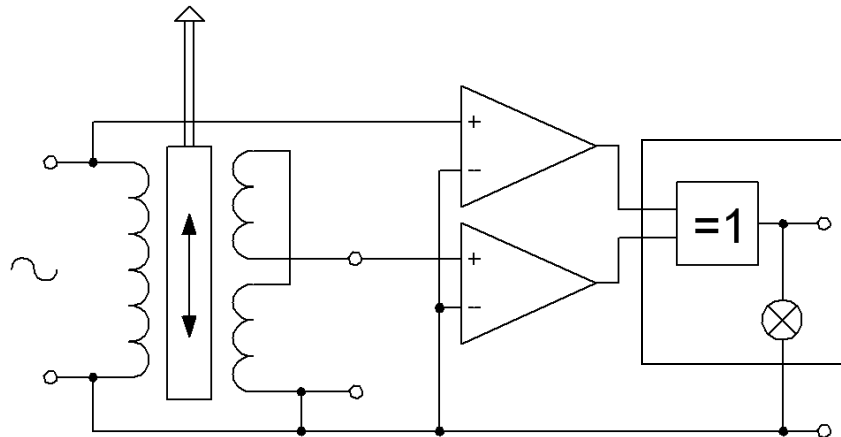
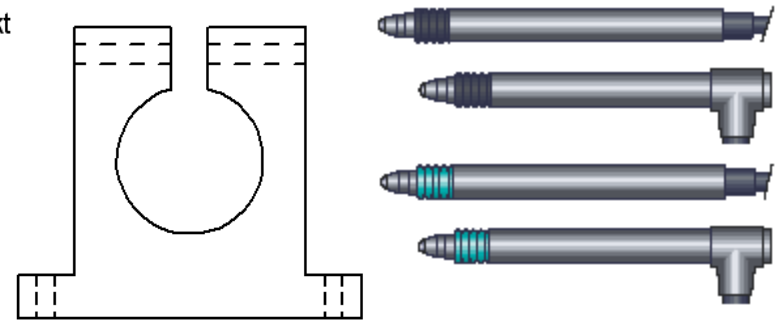
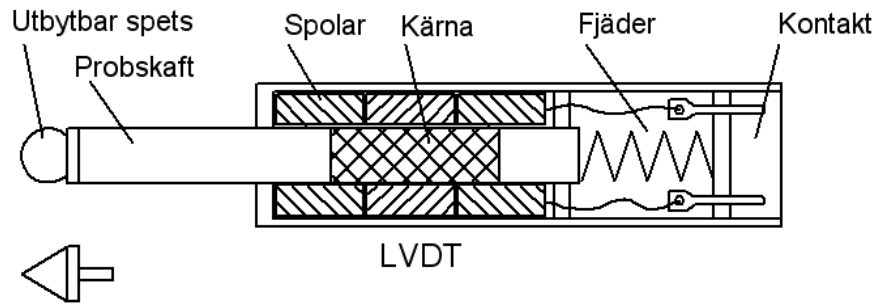


Processorn beräknar skillnaden mellan spänningarna.

Detta är en sensor som direkt ger en hög utspänning, Volt istället för mV.

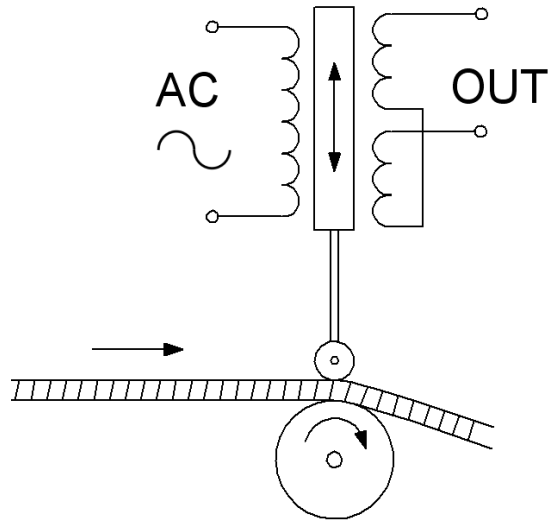
- En inbyggnadsprocessor kan AD-omvandla ”likriktade” utspänningar.
- ( • Eller så AD-omvandlar den växelspanningarna direkt ).

# LVDT probe



Utsignalens **fas** ändras **180°** precis när kärnan passerar mitt-punkten.

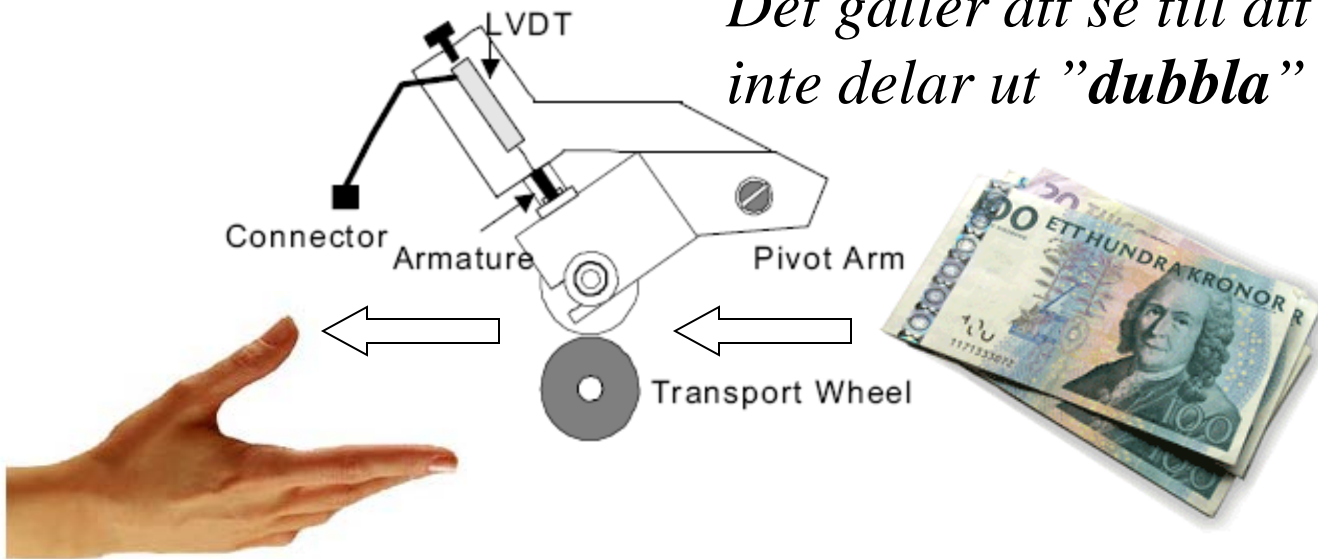
En **XOR-grind** kan **indikera** denna förändring.



En LVDT probe kan hålla ordningen på att tjockleken är den rätta.

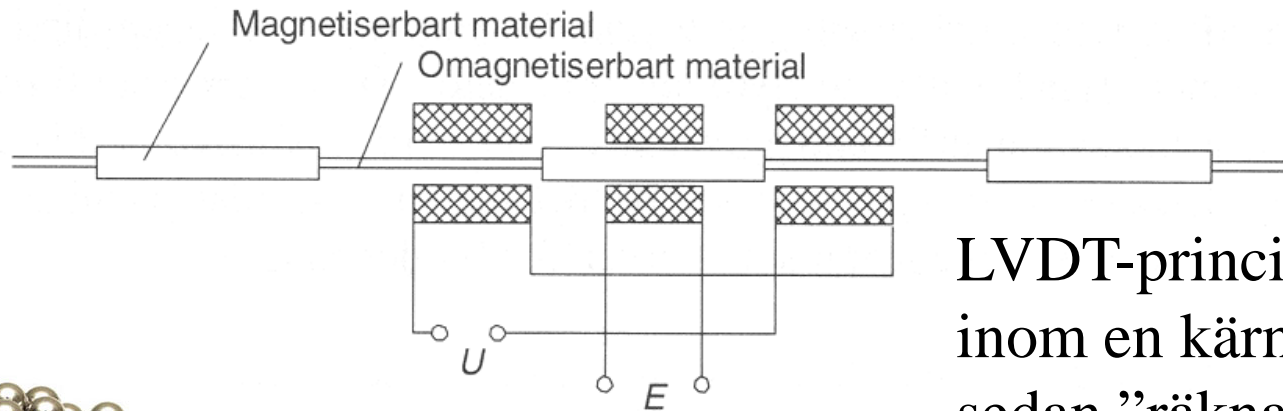
*Användningsområde?*

*Det gäller att se till att bankomaten inte delar ut "dubbla" sedlar ...*



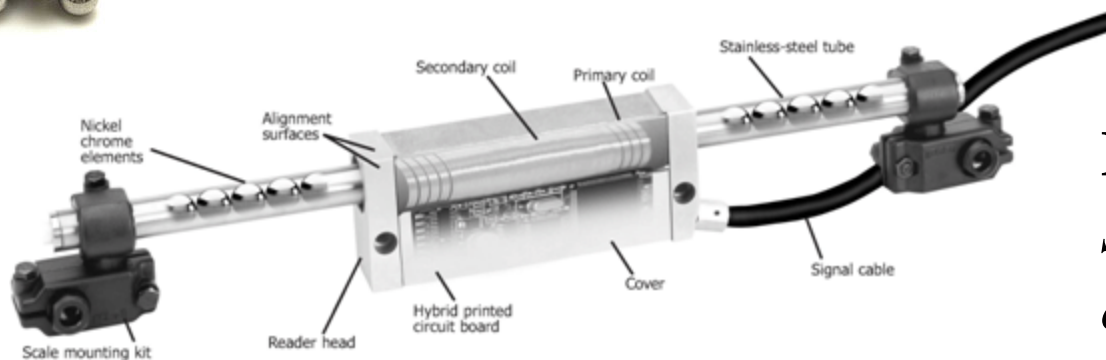


# Periodisk differentialtransformator



LVDT-principen inom en kärna, och sedan "räkna" passerade kärnor.

En liknande givare?



**Renywell**  
*Spherical*  
*encoder*

William Sandqvist [william@kth.se](mailto:william@kth.se)