

INF5490 RF MEMS

L3: Modelling, design og analyse

V2008, Oddvar Søråsen
Institutt for informatikk, UiO

Dagens forelesning

- MEMS - virkemåte
 - Transduser-prinsipper
 - Sensorprinsipper
- Metoder for å modellere RF MEMS
 - **1. Enkle matematiske modeller**
 - **2. Konvertering til elektriske ekvivalenter**
 - **(3. Analyse ved Finite Element Methods)**
 - → L4

Transdusere for (RF) MEMS

- **Elektromekaniske transdusere** benyttes
 - Transformasjon av **elektrisk energi** \leftrightarrow **mekanisk energi**
- Transduser-prinsipper
 - Elektrostatiske
 - Elektromagnetiske
 - Elektrotermiske
 - Piezoelektriske

Transduser-prinsipper

- **Elektrostatiske** transdusere
 - Prinsipp: Krefter mellom elektriske ladninger
 - "Coulombs lov"
 - Energi som lagres når mekanisk eller elektrisk arbeid utføres på enheten kan **konverteres** til den andre energi-formen
 - Den vanligste typen brukt ved elektromekanisk energi-konvertering
 - Enkel fabrikering
 - Ofte realisert ved en **kondensator** med bevegelige plater
 - **Vertikal** bevegelse: parallell plate
 - **Horisontal** bevegelse: Kamstrukturer

Elektrostatisk transduser

- + Fordelaktig pga. enkelheten
- + Operasjon kontrolleres ved spenning
 - spenning \rightarrow ladning \rightarrow tiltrekningskraft \rightarrow bevegelse
- + Bevegelse gir strøm
 - bevegelse \rightarrow variabel kondensator \rightarrow strøm når spenningen er konstant
- \div Krever beskyttelse mot omgivelsene (støv)
 - Krav til pakking (vakuum)
- \div Transduksjonsmekanismen er ulineær
 - Gir forvrengninger (kraft er ikke proporsjonal med spenning)
 - Botemiddel: små signalvariasjoner rundt en DC-spenning

Transduser-prinsipper, forts.

- **Elektromagnetiske** transdusere
 - Magnetisk spole trekker på elementet
- **Elektrotermiske** aktuatorer
 - Forskjellig termisk ekspansjon på ulike steder pga. temperaturforskjeller
 - Store utbøyninger kan oppnås
 - Langsomme

Transduser-prinsipper, forts.

- **Piezoelektriske** transdusere
 - I enkelte **anisotrope** krystallinske materialer forskyves ladningene når de utsettes for **stress** → elektrisk felt
 - stress = ”mekanisk spenning”
 - Tilsvarende oppstår **strain** når de utsettes for et elektrisk felt
 - strain = ”mekanisk tøyning”
 - Eks. PZT (lead zirconate titanates) – keramisk materiale
- *(Electrostrictive transdusere*
 - *Mekanisk deformasjon ved elektrisk felt*
- *Magnetostrictive transdusere*
 - *Deformasjon ved magnetfelt)*

Sammenligning av ulike prinsipper

Table 1.4 Comparison of electromechanical transducers

Actuator	Fractional stroke (%)	Maximum energy density (J cm^{-3})	Efficiency	Speed
Electrostatic	32	0.004	High	Fast
Electromagnetic	50	0.025	Low	Fast
Piezoelectric	0.2	0.035	High	Fast
Magnetostrictive	0.2	0.07	Low	Fast
Electrostrictive	4	0.032	High	Fast
Thermal	50	25.5	Low	Slow

Source: Wood, Burdess and Hariss, 1996.

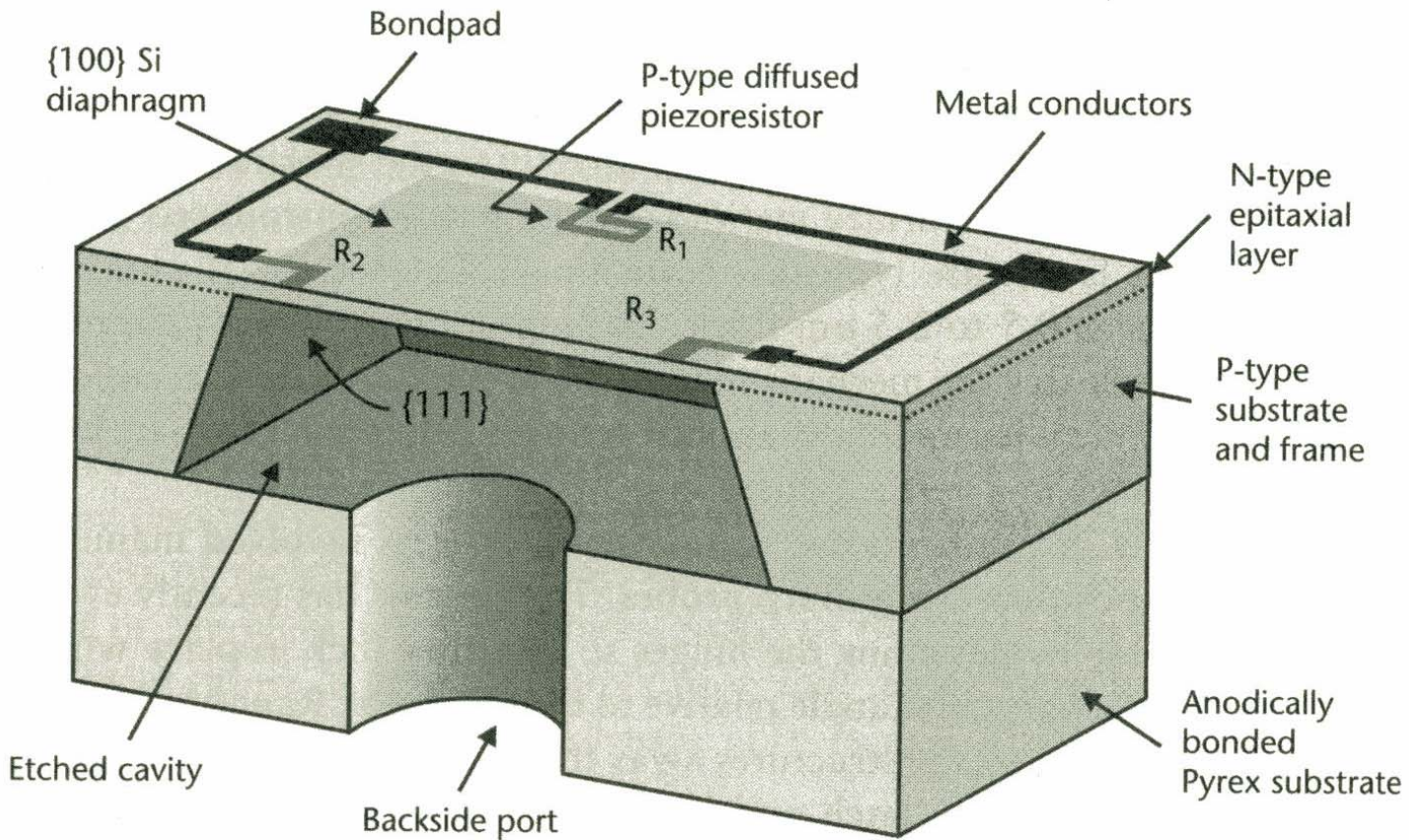
Sensor-prinsipper

- Piezoresistiv deteksjon
- Kapasitiv deteksjon
- Piezoelektrisk deteksjon
- Resonans deteksjon

Sensor-prinsipper

- **Piezoresistiv** deteksjon
 - Resistans varierer pga. ytre trykk/stress
 - Brukes til trykk-måler
 - utbøyning av membran
 - Piezo-motstander plasseres på membran hvor "strain" har høyest verdi
 - Resistansverdien er proporsjonal med "strain"
 - Ytelsen av piezoresistive mikrosensorer er temperaturavhengig

Trykksensor



Sensor-prinsipper, forts.

- **Kapasitiv** deteksjon
 - Benytter kapasitans-endringer
 - Trykk → elektrisk signal
 - Detekteres ved endring i f.eks. oscillasjons-frekvens, ladning, spenning (V)
 - Har potensial for høyere ytelse enn ved piezoresistiv deteksjon
 - + Høy følsomhet
 - + Kan detektere små trykk-endringer
 - + Høy stabilitet

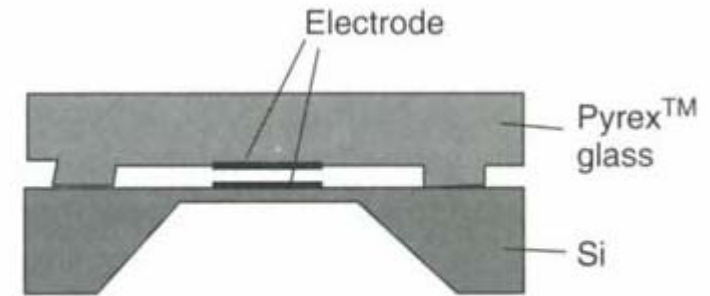


Figure 1.19 Capacitive sensing structure

Sensor-prinsipper, forts.

- **Piezoelektrisk** deteksjon
 - Elektrisk ladningsfordeling endres ved kraft-påtrykk → elektrisk felt → strøm
- **Resonans** deteksjon
 - Analogi: stressvariasjon på en streng fører til strain ("tøyning") og endring av den **naturlige svinge-frekvensen**

Metoder for å modellere RF MEMS

- **1. Enkle matematiske modeller**
 - Eks. parallell plate kondensator
- **2. Konvertering til elektriske ekvivalenter**
- **3. Analyse ved Finite Element Methods**

1. Enkle matematiske modeller

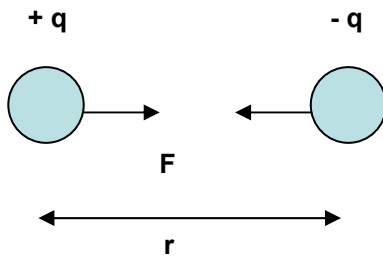
- Ligninger, formler beskriver fysiske fenomener
 - Forenkling, approksimasjon
 - Eksplisitte løsninger for enkle problemer
 - Evt. linearisering rundt et operasjonspunkt
 - Numerisk løsning av ligningssett
 - Typisk differensialligninger
- **+** Gir konstruktøren design-innsikt/ forståelse
 - Hvordan funksjonaliteten endres ved parametervariasjoner
 - Kan benyttes til innledende ”overslag”

Eks. på matematisk modellering

- Viktige ligninger for mange RF MEMS komponenter:
 - → **Parallell plate kondensator!**
 - **Elektrostatisk** aktivering av kondensator med bevegelig plate opphengt i fjær
 - Beregning av **”pull-in”**
 - Formler og figurer →

Elektrostatikk

Elektrisk kraft mellom ladninger: **Coulombs lov**



$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

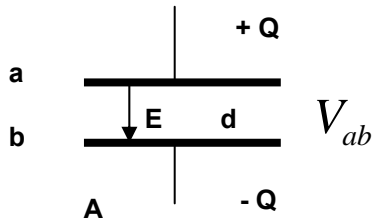
Elektrisk felt = kraft pr. enhetsladning $\bar{E} = \frac{\bar{F}}{q_0}$

Arbeid utført av en kraft = endring i potensial-energi $W_{a \rightarrow b} = \int_a^b \bar{F} \cdot d\bar{l} = U_a - U_b$

Potensial, V = potensial-energi pr. enhetsladning $V = \frac{U}{q_0}$

Spenning = potensial-differansen $V_a - V_b = \int_a^b \bar{E} \cdot d\bar{l}$

Kapasitans



Definisjon av kapasitans

$$C = \frac{Q}{V_{ab}}$$

Overflate ladningstetthet = σ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{A} \cdot \frac{1}{\epsilon_0}$$

Spenning

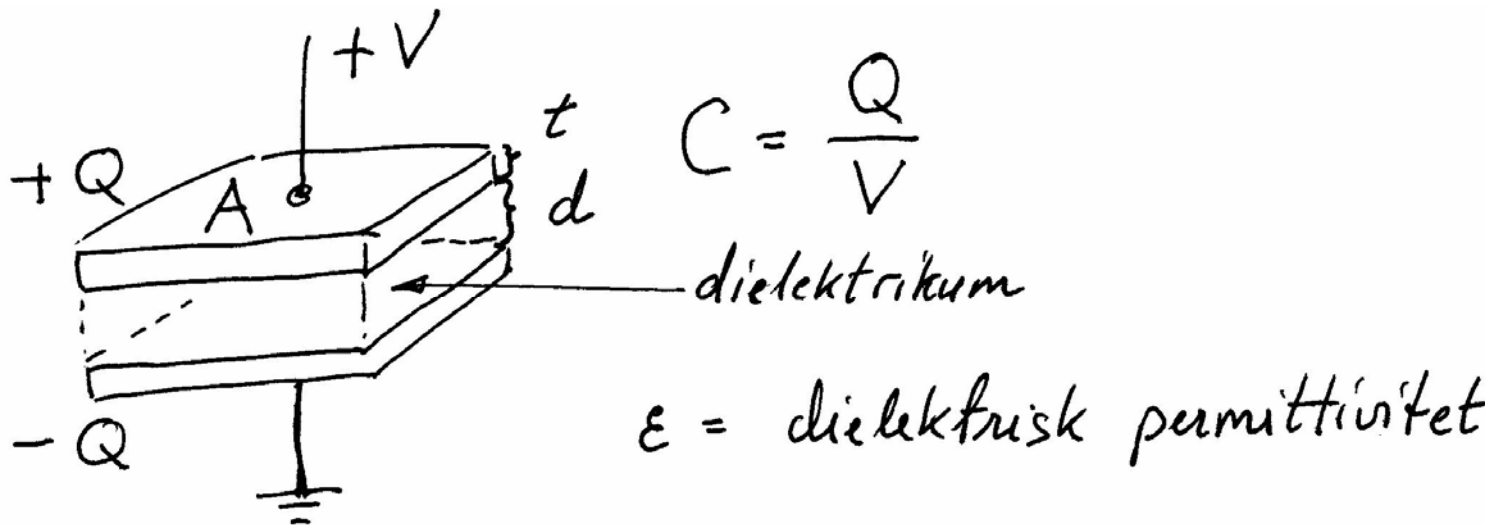
$$V_{ab} = E \cdot d = \frac{Q}{A\epsilon_0} \cdot d$$

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Energi lagret i en kondensator, C ,
som lades opp til en spenning V_0 ved strøm $i = \dot{Q} = C \frac{dV}{dt}$

$$U = \int v \cdot i \cdot dt = \int v \cdot C \frac{dv}{dt} \cdot dt = C \int_0^{V_0} v \cdot dv = \frac{1}{2} C V_0^2 = \frac{\epsilon_0 A}{2d} V_0^2$$

Parallell plate kondensator



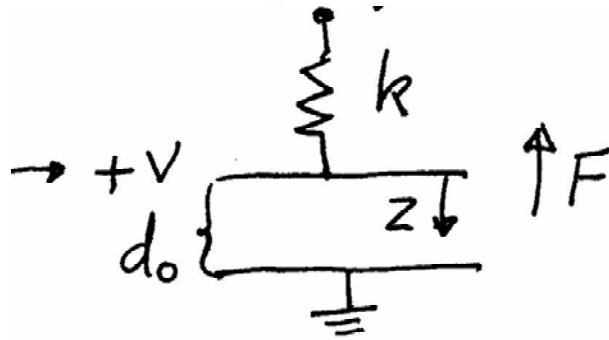
Tiltrekningskraft mellom platene

$$F = -\frac{\partial U}{\partial d} = -\frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{\epsilon A}{2d} V^2 \right) = \frac{\epsilon A V^2}{2d^2}$$

Bevegelig kondensator-plate

- Forutsetninger for beregninger:
 - Anta luft mellom platene
 - Fjær holder øvre plate
 - Fjærkonstant: k
 - Spenning settes på
 - Elektrostatisk tiltrekning
 - Ved likevekt
 - **Kreftene oppover og nedover balanserer →**

Kreftene balanserer



$k =$ fjærkonstant

$$F_{\text{spring}} = k \cdot x$$

tøyning utfra likevekt

$d_0 =$ gap ved 0V og null fjærutstrekning

$$d = d_0 - z$$

$$z = d_0 - d$$

Kraft på øvre plate ved V og d :

$$F_{\text{net}} = - \frac{\epsilon A V^2}{2 d^2} + k (d_0 - d) = 0 \text{ ved likevekt}$$

To likevekts-punkter

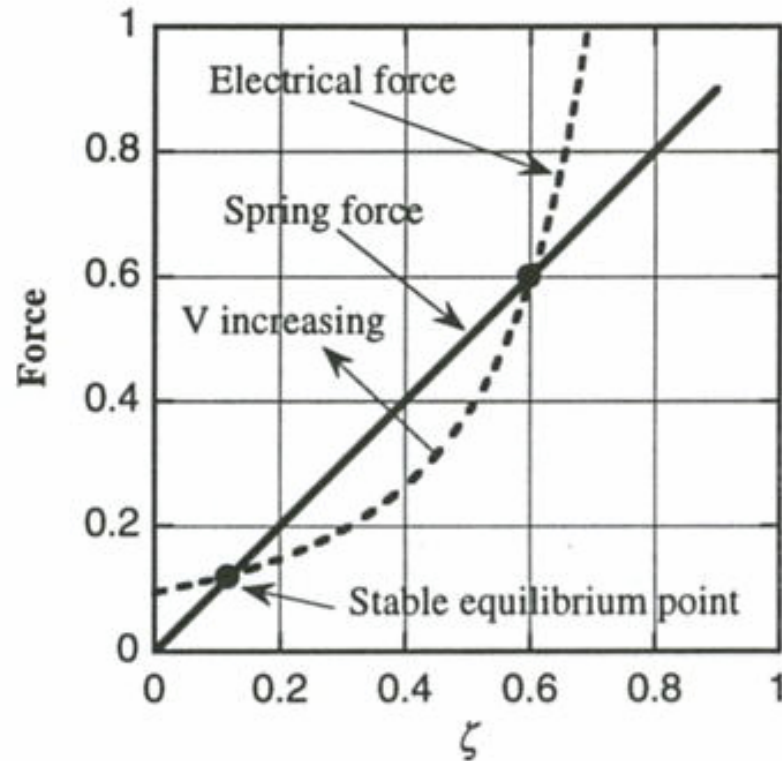


Figure 6.7. Electrical and spring forces for the voltage-controlled parallel-plate electrostatic actuator, plotted for $V/V_{PI} = 0.8$.

$$\zeta = 1 - d/d_0$$

Senturia

Stabilitet

- Hvordan kreftene utvikler seg når d minker
 - Anta en liten perturbasjon (endring) i gapet ved konstant spenning

$$\delta F_{net} = \frac{\partial F_{net}}{\partial d} \Big|_V \cdot \delta d$$

$$\delta F_{net} = \left(\frac{\epsilon A V^2}{d^3} - k \right) \delta d$$

Anta at gapet minker $\delta d < 0$

Hvis kraften oppover også minker, er systemet **USTABILT!**

$$\delta F_{net} < 0,$$

Stabilitet, forts.

Stabilitetsbetingelse:

$$\frac{\partial F_{net}}{\partial d} \Big|_V < 0$$

$$k > \frac{\epsilon A V^2}{d^3}$$

Pull-in når:

$$k = \frac{\epsilon A V_{PI}^2}{d_{PI}^3}$$

Pull-in

$$F_{net} = 0$$

$$\frac{\epsilon A V_{PI}^2}{2 d_{PI}^2} = k (d_0 - d_{PI})$$

↑
= $\frac{\epsilon A V_{PI}^2}{d_{PI}^3}$

Pull-in oppstår når:

$$d_{PI} = \frac{2}{3} d_0$$

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8 k d_0^3}{27 \epsilon A}}$$

Pull-in

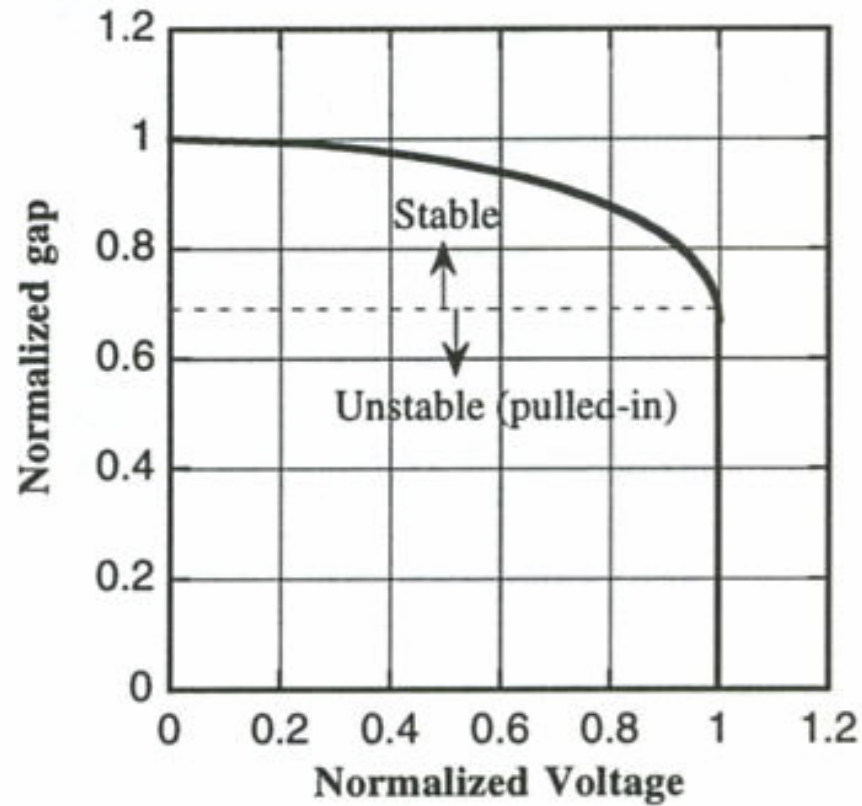


Figure 6.8. Normalized gap as a function of normalized voltage for the electrostatic actuator.

2. Konvertering til elektriske ekvivalenter

- Mekanisk oppførsel kan modelleres ved **elektriske kretselementer**
 - Mekanisk struktur → forenklinger → ekvivalent elektrisk krets
 - eks. fjær/masse → R, C, L
 - Gir mulighet for å "binde sammen" elektriske og mekaniske energi-domer
 - Forenklet modellering og sam-simulering av elektroniske og mekaniske deler av systemet
 - Et rikt utvalg av **analyse-verktøy** kan brukes
 - Eks. SPICE

Konvertering til elektriske ekvivalenter, forts.

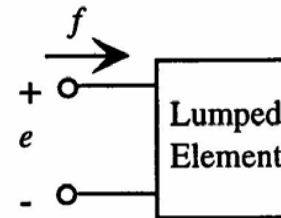
- I det følgende gjennomgås:
 - Litt bakgrunn fra kretsteori
 - Konverteringsprinsipper
 - **effort - flow**
 - Eksempel på en konvertering
 - Mekanisk resonator
 - I en senere forelesning:
 - Kobling og samvirke mellom ulike energi-domener

Kretsteori

- Grunnleggende kretselementer: R, C, L
- Strøm og spennings-ligninger for grunnelementene (ved lave frekvenser)
 - Ohms lov, C og L-ligninger
 - $V = RI$, $I = C \, dV/dt$, $V = L \, dl/dt$
 - Laplace transformasjon
 - Fra differensial-ligninger til algebraiske (s-polynomer)
 - → Komplekse impedanser: R , $1/sC$, sL
- Kirchhoffs ligninger
 - Σ strøm inn i noder = 0, Σ spenning rundt løkker = 0

Effort - flow

- Elektriske kretser beskrives av et **variabelsett**: *konjugerte power-variable*
 - Spenning V : **across** eller **effort**-variabel
 - Strøm I : **through** eller **flow**-variabel
 - *En effort ("innsats") -variabel driver en flow-variabel gjennom en impedans, Z*
- Kretselement modelleres som **1-port** med terminaler
 - Samme strøm ($f = \text{flow}$) inn og ut og gjennom (through) elementet
 - **Positiv flow** inn i terminal der samme terminal definerer **positiv effort**



Energi-domener, analogier

- Det eksisterer ulike energi-domener
 - Elektrisk, elastisk, termisk, for væsker etc.
- ***For hvert energidomene er det mulig å definere et sett **konjugerte power-variable** som kan brukes som basis for en diskret-komponent modellering (lumped modelling) med krets-elementer som er ekvivalente***
- Tabell 5.1 Senturia ->

Eks. på konjugerte power variable

Energy Domain	Effort	Flow	Momentum	Displacement
Mechanical translation	Force F	Velocity \dot{x}, v	Momentum p	Position x
Fixed-axis rotation	Torque τ	Angular velocity ω	Angular momentum J	Angle θ
Electric circuits	Voltage V, v	Current I, i	...	Charge Q
Magnetic circuits	Magnetomotive force MMF	Flux rate $\dot{\phi}$...	Flux ϕ
Incompressible fluid flow	Pressure P	Volumetric flow Q	Pressure momentum Γ	Volume V
Thermal	Temperature T	Entropy flow rate \dot{S}	...	Entropy S

Konjugerte power-variable: e,f

- Anta konverteringer mellom energidomener der **energien bevarer!**
- Egenskaper
 - **e * f = effekt (power)**
 - **e / f = impedans**
- Generalisert **displacement** representerer tilstanden (state), f. eks. posisjon eller ladning

$$f(t) = \dot{q}(t)$$

$$q(t) = \int_{t_0}^t f(t)dt + q(t_0)$$

- **e * q = energi**

Generalisert momentum

$$p(t) = \int_{t_0}^t e(t) dt + p(t_0)$$

- Mekanikk: "kraftstøt", impuls
 - $F \cdot dt = mv - mv_0$
- Generelt: **$p * f = energi$**

Eks.: Mekanisk energidomene

$$e = F \quad (\text{kraft})$$

$$f = v, \dot{x} \quad (\text{hastighet})$$

$$q = x \quad (\text{posisjon}) = \int \dot{x} dt$$

$$p = p \quad (\text{momentum}) = \int F dt$$

(kraft x tid)

$$e \cdot f \rightarrow F \cdot \dot{x} = \frac{F \Delta x}{\Delta t} = \frac{\text{arbeid}}{\text{tid}} = \text{effekt}$$

$$e \cdot q \rightarrow F \cdot x = \text{kraft} \times \text{vei} = \text{arbeid} = \text{energi}$$

$$p \cdot f \rightarrow p \cdot \dot{x} = m v \cdot v = m v^2 = \text{energi}$$

Eks.: Elektrisk energidomene

$$e = V \quad (\text{spenning})$$

$$f = I \quad (\text{strøm})$$

$$q = \int I dt = Q \quad (\text{ladning})$$

$$p = n.a.$$

$$e \cdot f \rightarrow V \cdot I = \text{effekt}$$

$$e \cdot q \rightarrow V \cdot Q = V \int I dt = \text{energi}$$

$e \rightarrow V$ - konvensjonen

- **Senturia og Tilmans** holder seg til **$e \rightarrow V$ –konvensjonen**
- Eks. elektriske og mekaniske kretser
 - $e \rightarrow V$ (spenning) tilsvarende F (kraft)
 - $f \rightarrow I$ (strøm) tilsvarende v (hastighet)
 - $q \rightarrow Q$ (posisjon) tilsvarende x (posisjon)
 - $e * f =$ "power" som tilføres elementet

H. Tilmans, Equivalent circuit representation of electromagnetical transducers:
I. Lumped-parameter systems, J. Micromech. Microeng., Vol. 6, pp 157-176, 1996

Andre konvensjoner

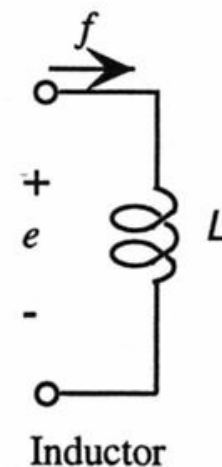
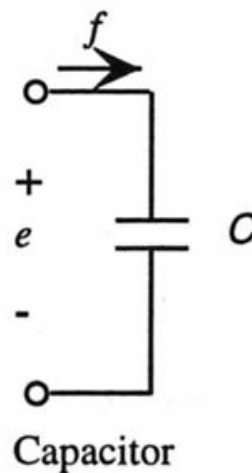
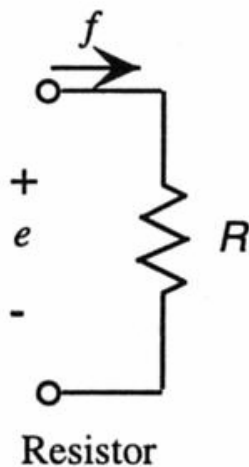
- Det finnes ulike konvensjoner for å definere **through-** eller **across-variable**

Table 5.2. Different conventions for assigning circuit variables.

Convention		Across Variable	Through Variable	Product	Principal Use
$e \rightarrow V$	*	e	f	power	electric circuit elements
$f \rightarrow V$	alternativt	f	e	power	mechanical circuit elements
Thermal		T	\dot{Q}	Watt-Kelvin	thermal circuits
HDL		q	e	energy	HDL circuit representation of mechanical elements

Generaliserte krets-elementer

- **En-port** krets-elementer
 - R dissiperende element
 - C, L energi-lagrings elementer
 - Elementene kan ha en **generell funksjon!**
 - Kan brukes i **forskjellige energi-domener**



Generalisert kapasitans

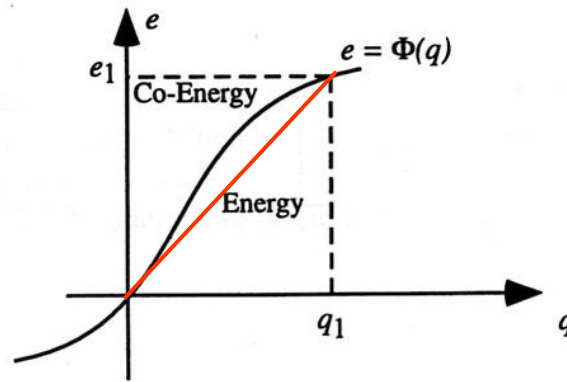


Figure 5.5. Illustrating energy and co-energy for a generalized capacitor.

Sammenlign med et **forenklet tilfelle**:

- en **lineær** kondensator

$$Q = V \cdot C$$

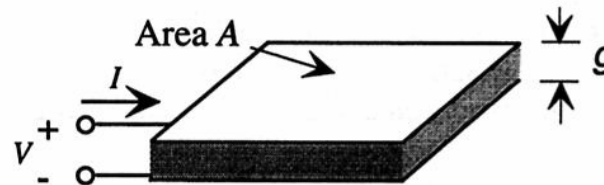
$$V = \frac{1}{C} \cdot Q$$

\Downarrow

$$e = \frac{1}{C} \cdot q$$

$$C = \frac{\epsilon A}{g}$$

definisjon av C



Generalisert kapasitans, forts.

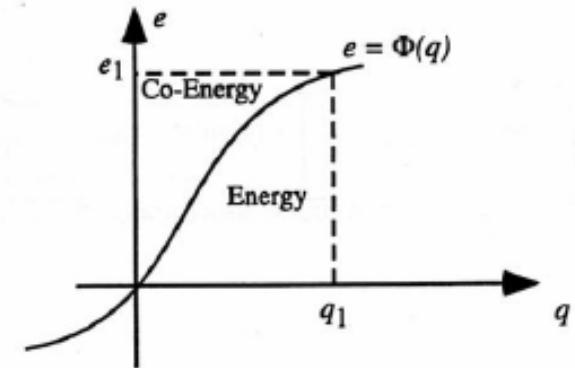
Kapasitans assosieres med lagret **potensiell energi**

$$\mathcal{W}(q_1) = \int_0^{q_1} e \, dq = \int_0^{q_1} \Phi(q) \, dq \quad (5.10)$$

Co-energy:

$$\mathcal{W}^*(e) = eq - \mathcal{W}(q) \quad (5.11)$$

$$\mathcal{W}^*(e_1) = \int_0^{e_1} q \, de = \int_0^{e_1} \Phi^{-1}(e) \, de \quad (5.12)$$



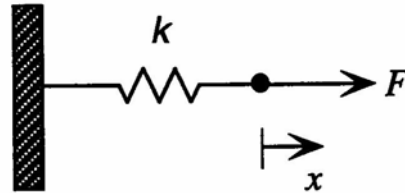
Energi lagret i parallell-plate kondensator

Energy:
$$W(Q) = \int_0^Q e \cdot dq = \int_0^Q \frac{q}{C} \cdot dq = \frac{Q^2}{2C}$$

Co-energy:
$$W^*(V) = \int_0^V q \cdot de = \int_0^V C \cdot v \cdot dv = \frac{CV^2}{2}$$

$$W^*(V) = W(Q) \quad \text{for lineær kapasitans}$$

Mekanisk fjær



Hook's lov: $F = k \cdot x$

Lagret energi: $W(x_1) = \int_0^{x_1} F(x)dx = \frac{1}{2}kx_1^2$ (5.18)

Sammenlign med kondensator $W(Q) = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot Q^2$

Q displacement
 x_1 displacement

→ 1/C tilsvarer k

”Compliance”

- ”Compliance” = ”ettergivenhet”

$$C_{spring} = \frac{1}{k}$$

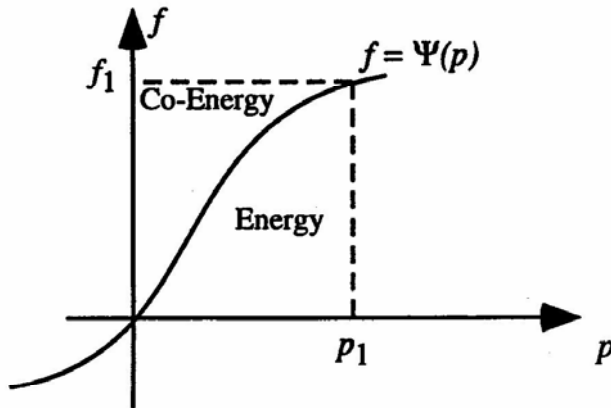
- Stiv fjær → liten kondensator
- Myk fjær → stor kondensator

Generalisert induktans

Energi er også definert som:

$$\int e dt = \text{flow} \times \text{momentum}$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 v v $m \cdot v$

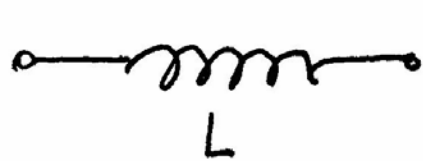


Energi = lagret kinetisk energi

$$W(p_1) = \int_0^{p_1} f(p) dp$$

Eks.: Elektrisk spole

Co-energy: $W^*(f) = \int_0^{f_1} p(f) df$



$$V = L \frac{dI}{dt}$$

$$p = \int e dt = \int V dt = \int L \frac{dI}{dt} dt = \int L dI$$

$$p(f) = p(I) = LI$$

$$W^*(f_1) = W^*(I_1) = \int_0^{I_1} L \cdot I \cdot dI = \frac{1}{2} L I_1^2$$

Analogien mellom masse (mekanisk "inertance") og induktans L

Et mekanisk system har **lineært momentum**: $p = mv$

Flow: $\phi = v = \frac{p}{m}$

$$W(p_1) = \int_0^{p_1} f(p) dp = \int_0^{p_1} \frac{p}{m} dp = \frac{p_1^2}{2m}$$

Co-energy:

$$W^*(v_1) = \int_0^{v_1} p(v) dv = \int_0^{v_1} (mv) dv = \frac{1}{2} m v_1^2$$

Analogi mellom m og L

$$W^*(f_1) = W^*(I_1) = \int_0^{I_1} L \cdot I \cdot dI = \frac{1}{2} L I_1^2$$

Sammenlign med: $W^*(v_1) = \frac{1}{2} m v_1^2$

$$I_1 = \text{flow}$$

$$v_1 = \text{---}$$

L tilsvarer m

m = L "inertance"

Mekanisk "inertance" (treghet) = masse m
har analogi til induktans L

Sammenkobling av elementer

- $e \rightarrow V$ har to grunnleggende prinsipper
 - Elementer som deler en felles *flow* og derved en felles variasjon i *displacement* er koblet i **serie**
 - Elementer som deler en felles *effort* er koblet i **parallell**

Eks. på sammenkobling:

”Direkte omforming”

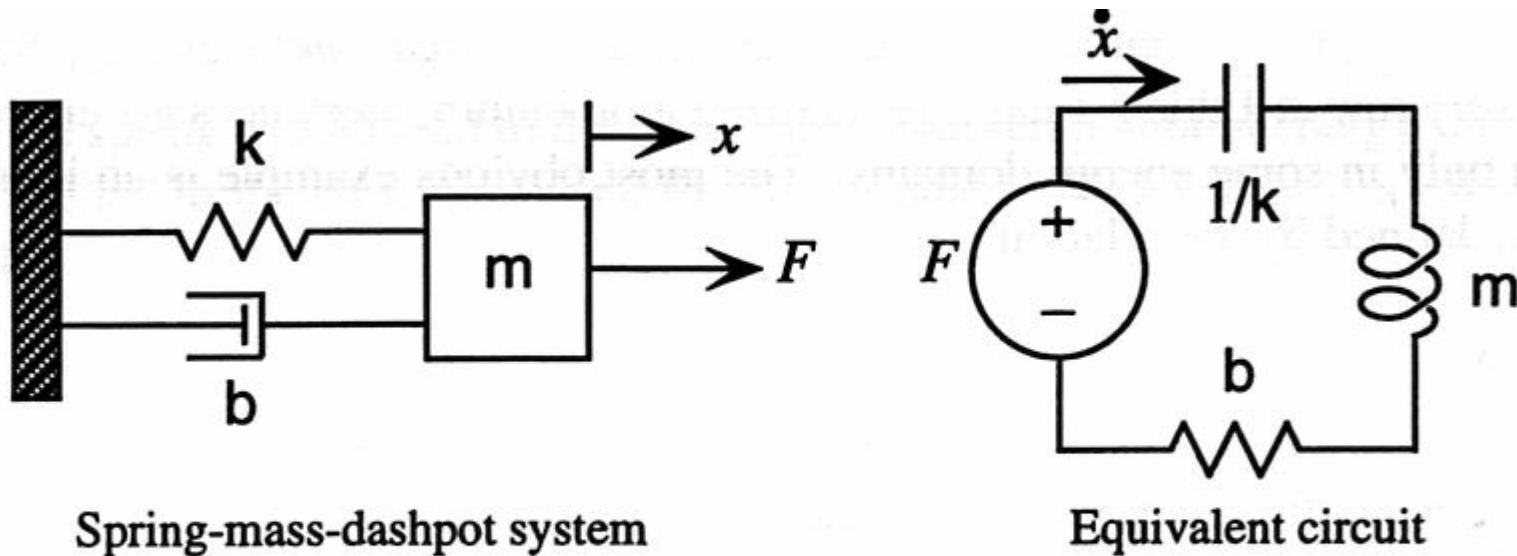
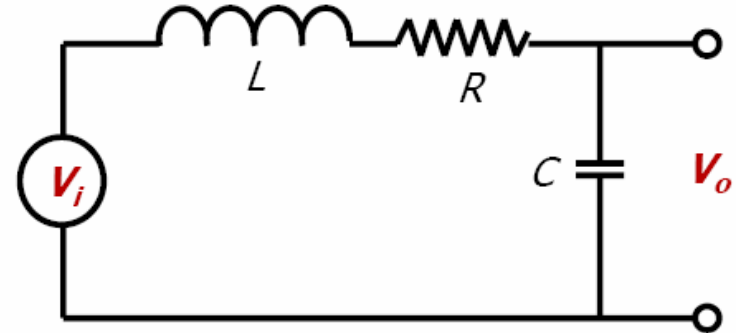
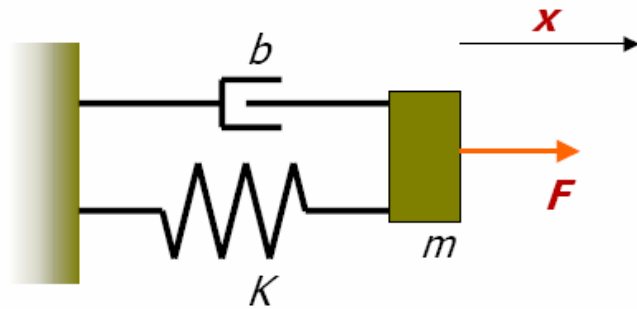


Figure 5.9. Translating mechanical to electrical representations.

Mechanical / Electrical Systems



Input : external force F

Output : displacement x

$$m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + Kx(t) = F$$

m mass, b damping, K stiffness

Transfer function :

$$H(s) = \frac{x}{F} = \frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{K}{m}}$$

Input : voltage V_i

Output : voltage V_o

$$L\ddot{q}(t) + R\dot{q}(t) + \frac{1}{C}q(t) = V_i$$

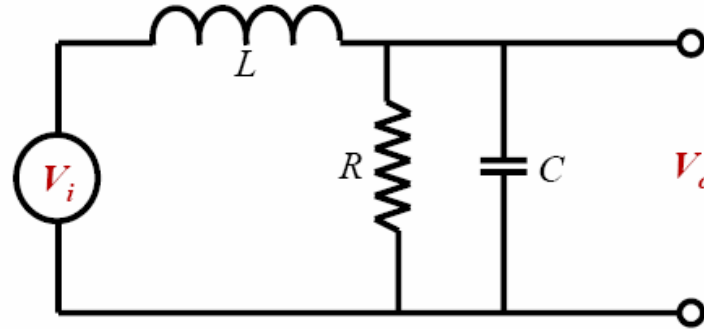
L induct., R resist., C capacit.

Transfer function :

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

Mechanical / Electrical Systems

Alternative circuit:



Input : voltage V_i

Output : voltage V_o

$$L\ddot{q}(t) + \frac{L}{RC}\dot{q}(t) + \frac{1}{C}q(t) = V_i$$

L inductance, R resistance, C capacitance

Transfer function :

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{RC}s + \frac{1}{LC}}$$

Resonators

- Analogy between mechanical and electrical system:
 - Mass m - inductivity L
 - Spring K - capacitance C
 - Damping b - resistance R (depending where R is placed in circuit)
- Solution to 2nd order differential equation:

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

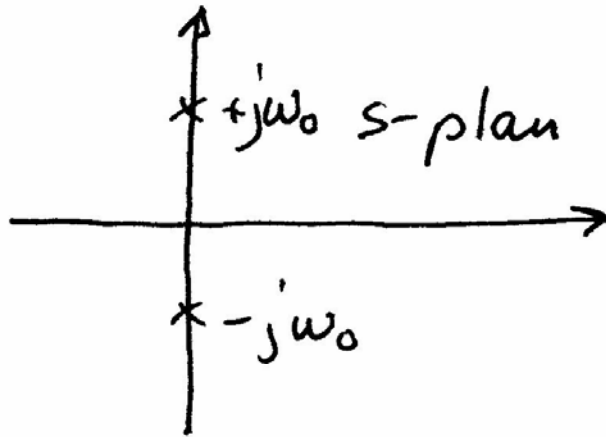
$$\omega_0 = 2\pi f_0 \text{ natural frequency}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \text{ mechanical system, } \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ electrical system}$$

$$Q \text{ quality factor}$$

Udempet system (b=0, R=0)

$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \omega_0^2} = \frac{\omega_0^2}{(s + j\omega_0)(s - j\omega_0)}$$



$$|H(j\omega_0)| = \infty$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

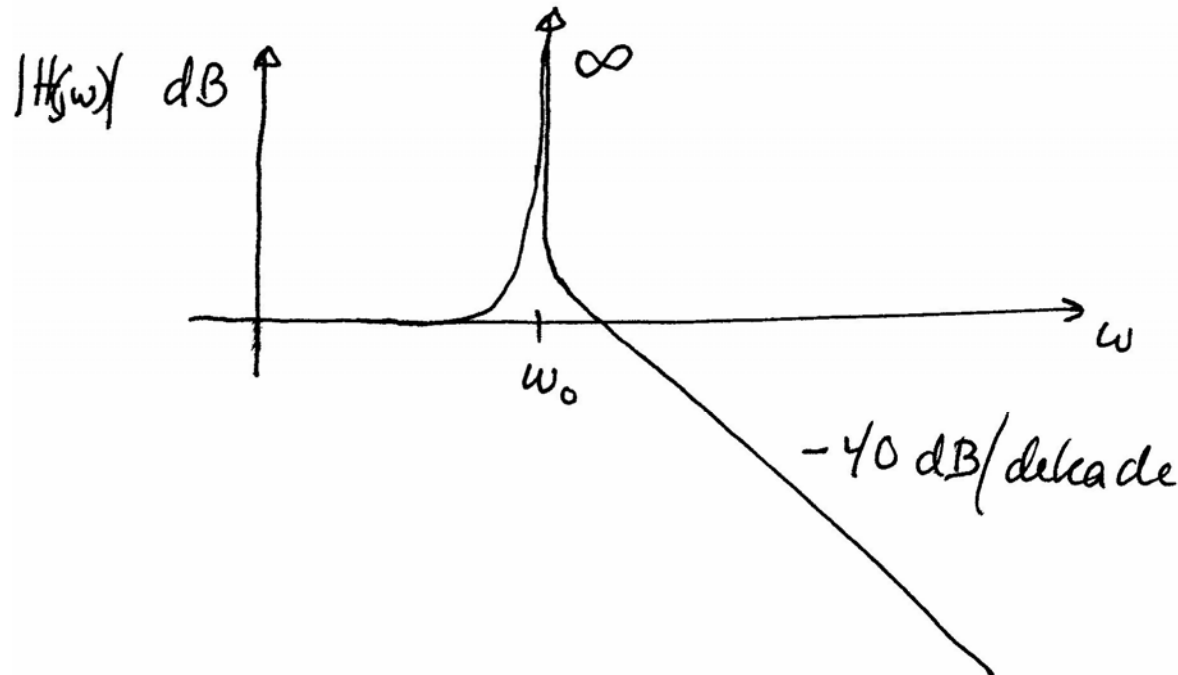
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}, \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Udempet system, forts.

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

$$|H(j\omega)| = 1 \quad \text{når} \quad \omega \ll \omega_0 \quad 0 \text{ dB}$$

$$|H(j\omega)| = -\left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 \quad \text{når} \quad \omega \gg \omega_0 \quad -40 \text{ dB/dekade}$$

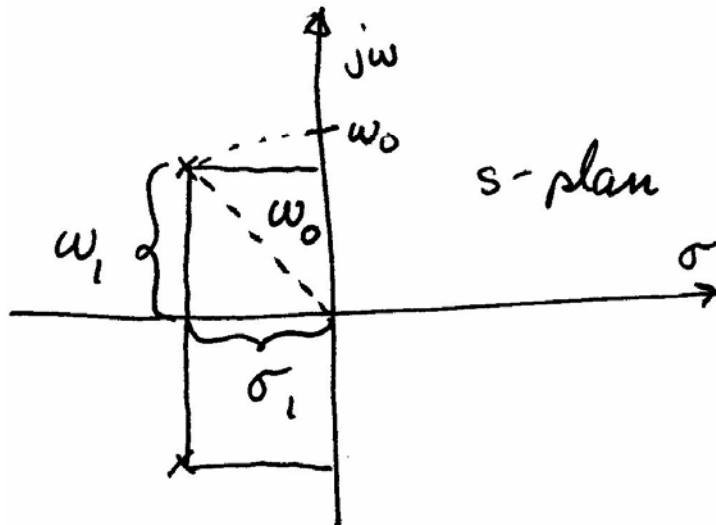


Ved demping

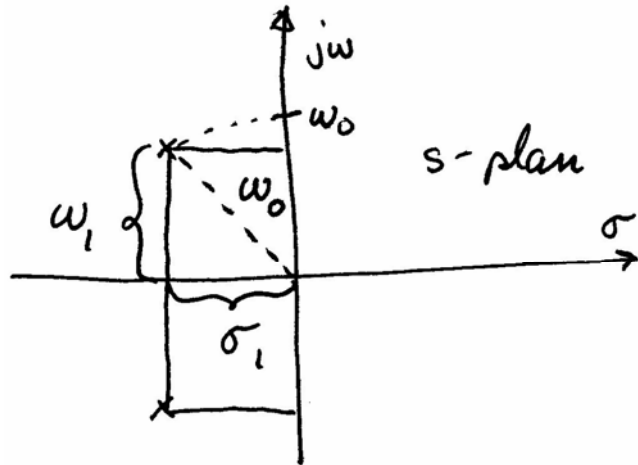
$$s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2 = 0$$

$$s = -\frac{\omega_0}{2Q} \pm j \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

$$= -\sigma_1 \pm j \omega_1$$



Dempet system, forts.



$$\frac{\omega_0}{Q} = \frac{b}{m} = \frac{1}{\tau}$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\sigma_1 = \frac{1}{2\tau} = \frac{b}{2m}$$

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4\omega_0^2 \tau^2}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{b^2}{4km}}$$

$$\omega_1^2 + \sigma_1^2 = \omega_0^2$$

Mechanical Resonator

- Frequency and phase shift under damping:

$$x(t) = Ae^{-t/2\tau} \cos(\omega_1 t + \varphi)$$

$$\tau = m/b \text{ damping time}$$

$$\omega_1 = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4\omega_0^2 \tau^2}} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{b^2}{4Km}}$$

φ phase shift

- Energy dissipation:

$$E(t) = E_0 e^{-t/\tau}$$

Hva betyr "damping time"?

τ = damping time

$$e^{-t/2\tau} \Big|_{t=\tau} = e^{-1/2} = \frac{1}{\sqrt{e}}$$

Effekten

$$|x(t)|^2 \Big|_{t=\tau} = \frac{1}{e}$$

$$x(t) = A e^{-t/2\tau} \cos(\omega_1 t + \varphi)$$

$$x(0) = A \cdot \cos \varphi \quad \text{initialbetingelser}$$

Q-faktor og dempetid

Generell ligning

$$s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2 = 0$$

$$\Rightarrow s^2 + \frac{1}{\tau} s + \omega_0^2 = 0$$

$$Q = \omega_0 \tau$$

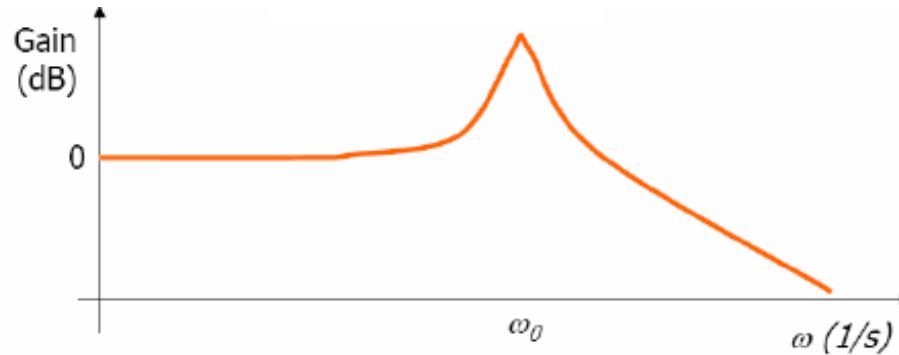
$$\tau = \frac{m}{b} \text{ mekanisk}$$

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ elektrisk}$$

$$Q_{\text{mek}} = \frac{\omega_0 m}{b}$$

$$Q_{\text{el}} = \frac{\omega_0 L}{R}$$

Amplituden ved resonans



$$H(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$$

$$H(j\omega) = \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2) + j \frac{\omega \omega_0}{Q}}$$

$$|H(j\omega_0)| = \left| \frac{\omega_0^2}{0 + j \frac{\omega_0^2}{Q}} \right| = Q$$