

# INF5490 RF MEMS

## **L1: Introduksjon. MEMS i RF**

V2008, Oddvar Søråsen  
Institutt for informatikk, UiO

# Dagens forelesning

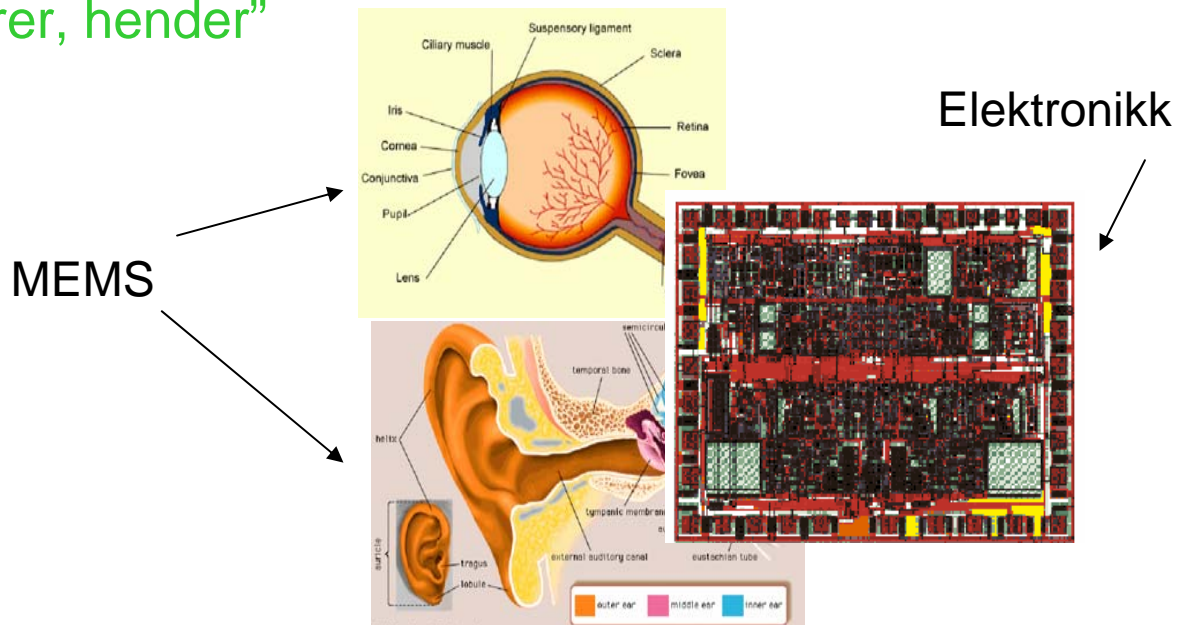
- Bakgrunn for emnet INF5490
- Opplegg våren 2008
- Introduksjon til temaet
  - MEMS generelt
  - RF-systemer
  - MEMS i RF-systemer

# INF5490 RF MEMS

- Nytt Master-emne ved Ifi V05
  - ca 10-15 kandidater/år
- **MEMS** (Mikro Elektro **Mekaniske** Systemer) er en forholdsvis ny aktivitet ved NANO-gruppen
  - (Ifi kompetanseområde MES, Mikroelektronikksystemer)
- Inspirert av:
  - **Nasjonal satsing** på mikro- og nano-teknologi (NFR)
  - **MiNaLab** (Mikro Nano Teknologi-lab) i nabobygg
    - SINTEF lab
    - UiO lab

# Hvorfor MEMS ved Nano-gruppen?

- En ny mulighet til å realisere **integreerte, miniatyriserte systemer**
  - Elektroniske systemer med MEMS gir en ny **frihetsgrad** for designeren
  - **A.** Kan inkludere mikro**mekaniske** komponenter i systemene:  
"øyne, ører, hender"



# Hvorfor MEMS ved Nano-gruppen?

- En ny mulighet til å realisere **integreerte, miniaturiserte systemer**
  - **B.** MEMS –komponenter trenger typisk et **rammeverk** i form av elektronikk!

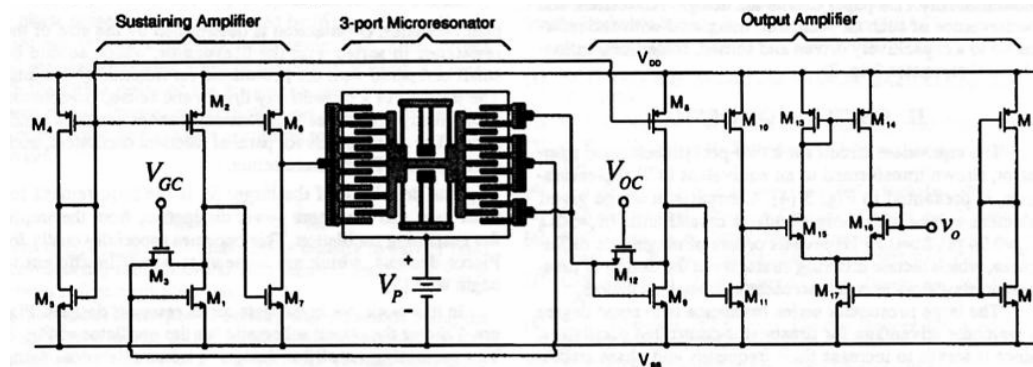


Fig. 4: Circuit schematic for the microresonator oscillator.

- Egnert **kompetanse** ved MES
  - Kompetanse innen modellering, analyse og implementasjon av VLSI fra transistor til komplekse systemer

# Personlig kompetanse

- Fysikk → modellering og design av VLSI → system design → datamaskinarkitektur/multiprosessorer → **MEMS/mikroelektronikk**
- Utvidelse av kompetansefelt ved sabbatsår: MiNaLab 03/04
- Studier av bøker og artikler
- Seminarer
  - RF MEMS-seminar by M.A. Ionescu, EPFL, ved KTH H04
    - Arr: FSRM, Swiss Foundation for Research in Microtechnology
  - RF MEMS tutorial: G.M. Rebeiz, UCSD, i Tønsberg H05
    - Arr: IMAPS Nordic Conference
  - Workshop on MEMS, IMEC, Leuven, H07
    - Arr: Europractice/STIMESI
- Studietur til UC Berkeley og Carnegie Mellon University, H06
  - C.T.-C. Nguyen, G.K. Fedder +
- Bruk av simuleringsverktøy CoventorWare
- Veiledning av studenter i relevante oppgaver (Master, Ph.D.)
- Egen forskningsaktivitet

# Valg av fokus → RF MEMS

- MEMS er et bredt forskningsfelt
  - Fokusering er nødvendig → RF MEMS!
- ***”RF MEMS refers to the design and fabrication of dedicated MEMS for RF (integrated) circuits”***
  - 1a) Komponentene **opererer** mikromekanisk  
og/eller
  - 1b) Komponentene **fabrikeres** ved mikromaskinering
  - 2) Komponentene benyttes i **RF systemer**

# Noen argumenter for en aktivitet innen RF MEMS ved NANO-grp

- Utfordrende, lovende og spennende felt!
- Nær sammenheng med grunnkompetanse i kretsteknikk
- Emnet passer inn i MES-utdanningen
  
- Aktuelt tema
  - Økende interesse internasjonalt for å bruke MEMS i RF-systemer
  - **Wireless Sensor Networks (WSNs)**
- Stort marked: **trådløs kommunikasjon**
  - Telekommunikasjon, mobilbransjen
  - Distribuert intelligens (observasjon, aktivering)
  - Miljøovervåkning - sensornoder
  - "Ambient Intelligence": enheter overalt!
  - Pasientovervåkning - implantater
- Gryende kommersiell interesse
- Grunnlag for etablering av ny virksomhet



# Dagens forelesning

- Bakgrunn for emnet INF5490
- Opplegg våren 2008
- Introduksjon til temaet
  - MEMS generelt
  - RF-systemer
  - MEMS i RF-systemer

# Opplegg for emnet INF5490

- Emnets hjemmeside:
  - <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF5490/v08/>
  - Må følge med på BESKJEDER!
- Ukentlige **forelesninger**
  - Torsdager 10:15 – 12 i 3A
  - Detaljert undervisningsplan på web
    - Forelesnings-slides legges ut på forhånd (pdf)

# Gruppeøvelser

- **Fellesgruppe** enkelte uker (se web!)
  - Tirsdager 14:15 – 16 i 3B
    - Første gang 29/1
  - Presentere opplegg og tema for obliger
  - Gjennomgang av støttestoff
  - Øvingsoppgaver
    - Legges ut uken før
  - Praktiske aspekter ved emnet
  - Spørsmål, diskusjon

# Obliger

- **2 obliger** skal **godkjennes**
  - Betingelse for å få gå opp til eksamen
  - Levering av 2 rapporter innen gitte frister
    - Generelle retningslinjer ligger ute på web!
  - Samarbeid i grupper av 2 studenter
- Tema: studium av mikromekaniske svingekretser (resonator, filter)
  - Simuleringer med **CoventorWare**
    - 3-dim modellering, FEM-analyse (Finite-Element-Method)
    - Høynivå-modellering, ARCHITECT (nytt 2007)

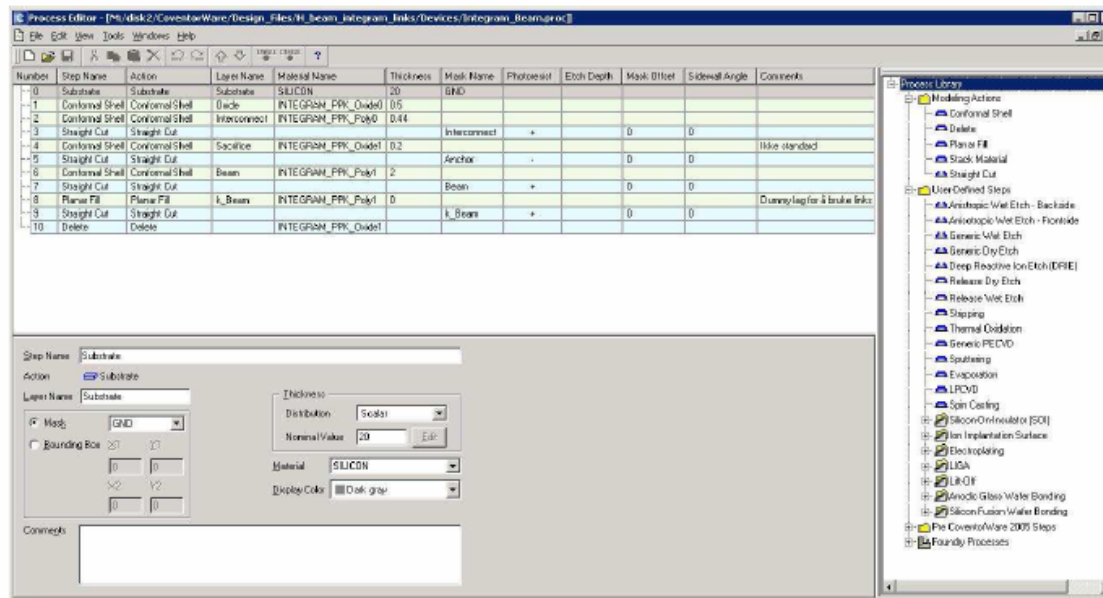
# CoventorWare

- “State-of-the-art” verktøy for FEM analyse
  - ”Finite-Element-Method”
- **“Bottom-up” prosedyre:**
  - 1) Bygg en 3D -modell
    - Stable lag: struktur- og offer-lag
    - Ets mønstre, fjern offerlag
  - 2) Partisjoner modellen (“meshing”)
    - Tetahedre, “Manhattan bricks”
  - 3) Aktiver “solvers”
    - Elektrisk/ mekanisk/ koblet
    - Iterer!

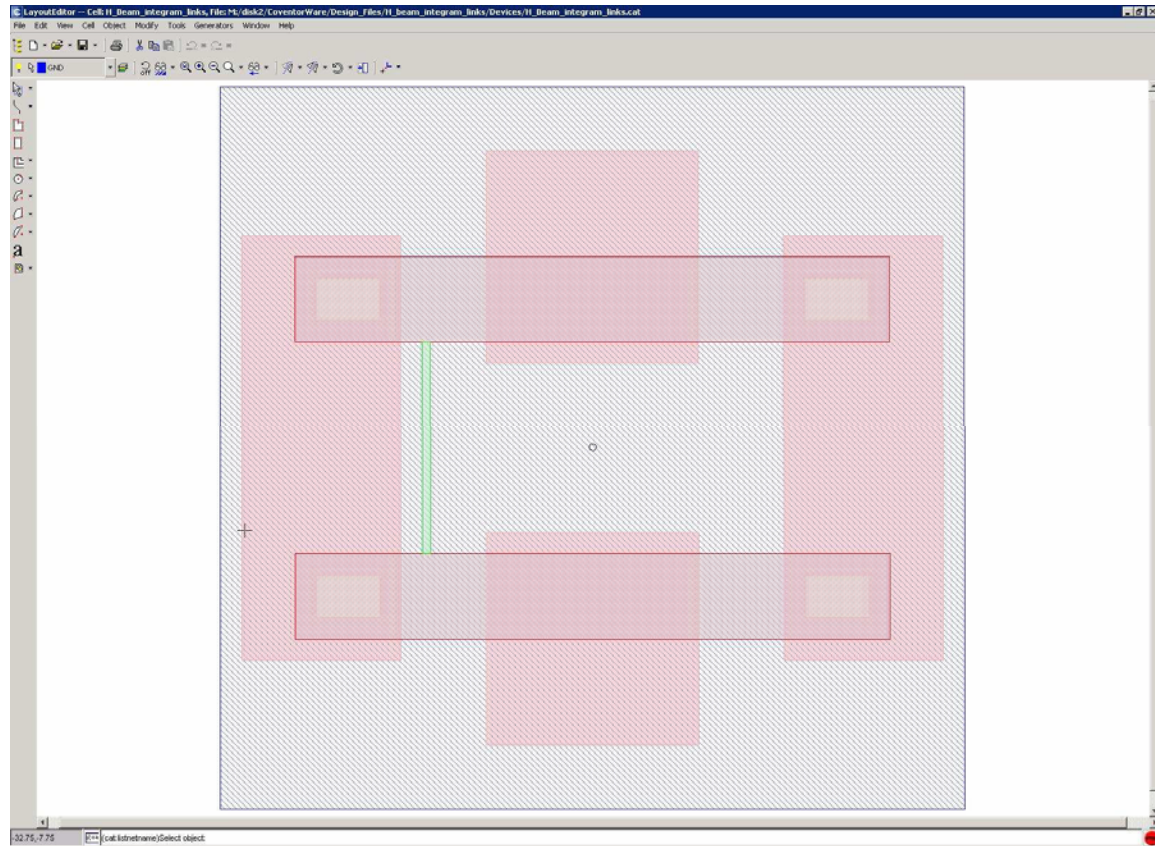


# Prosess-beskrivelse

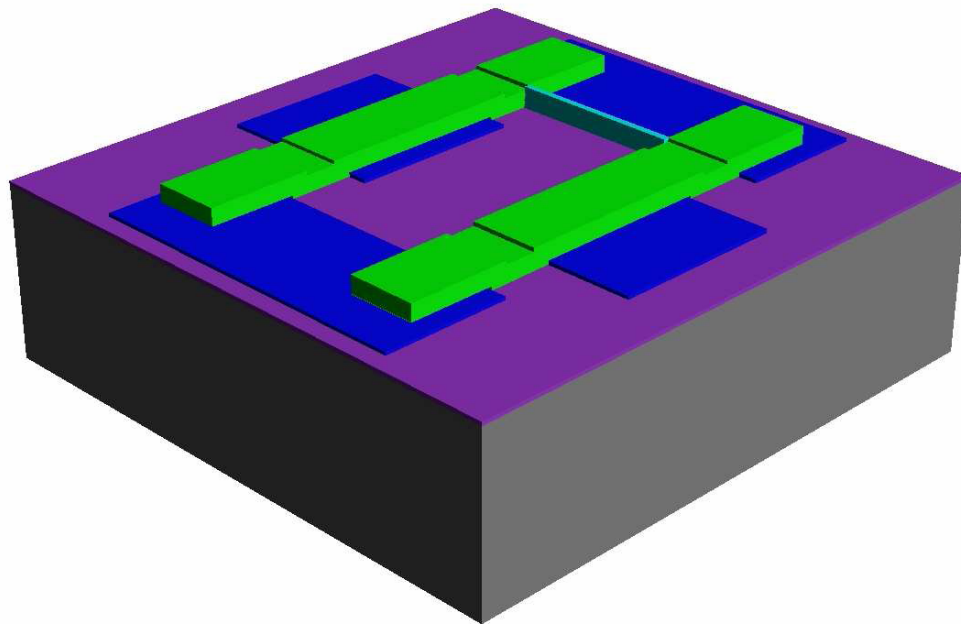
- Spesifiser en **prosess fil** som samsvarer med den aktuelle “foundry” -prosessen
  - Forenklinger, idealiseringer
  - Realistisk: karakteristiske trekk ved prosessen må være med



# Utlegg (layout)



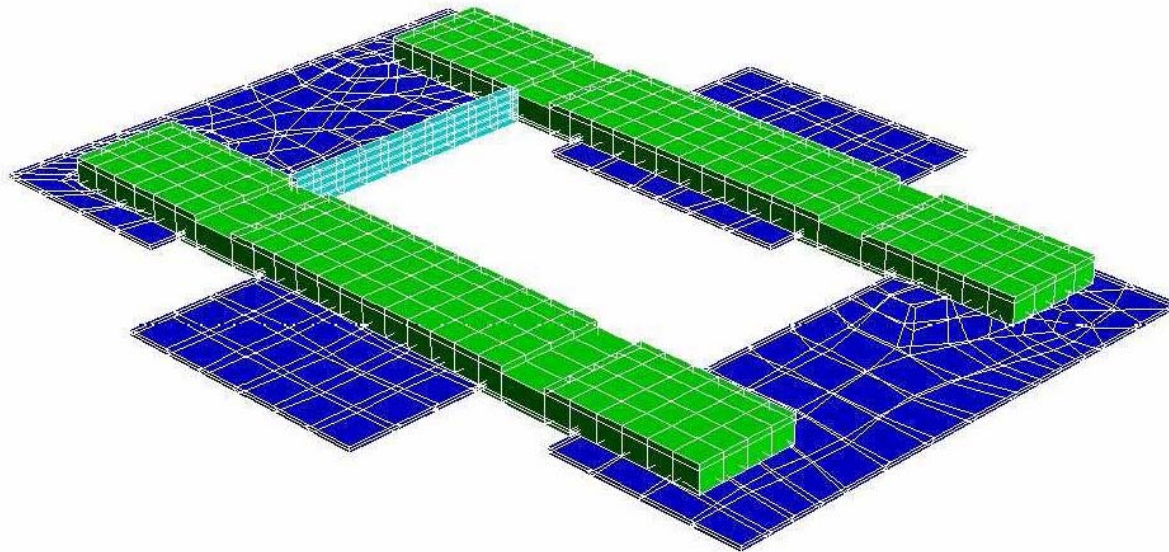
# Bygging av 3-D modell



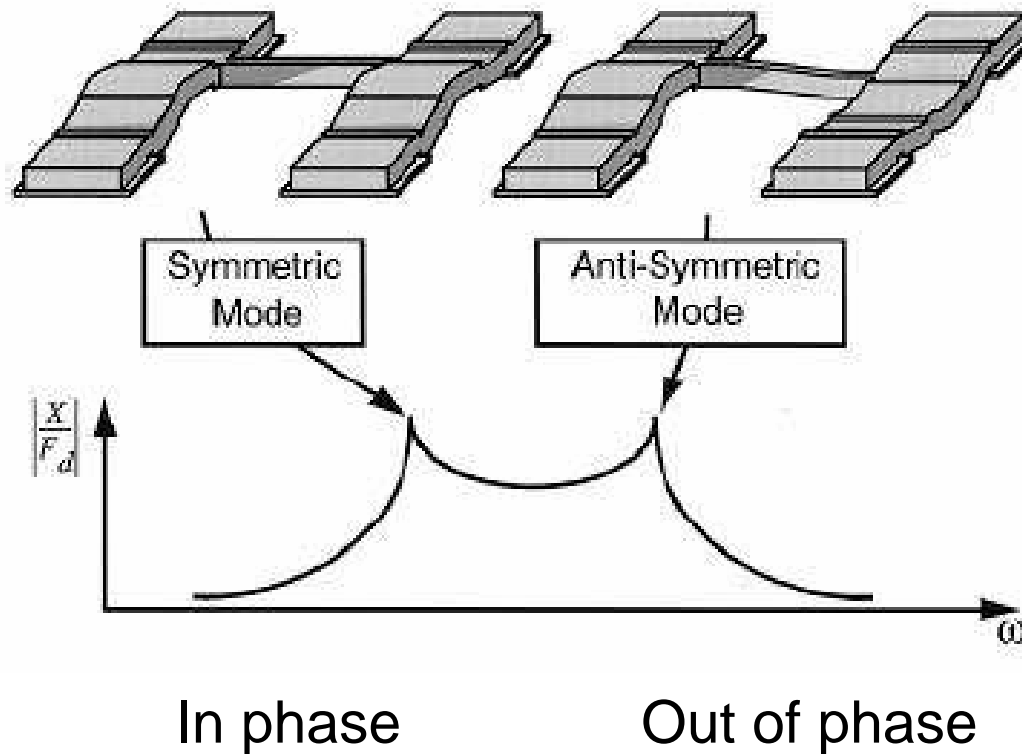
O-P Arhaug

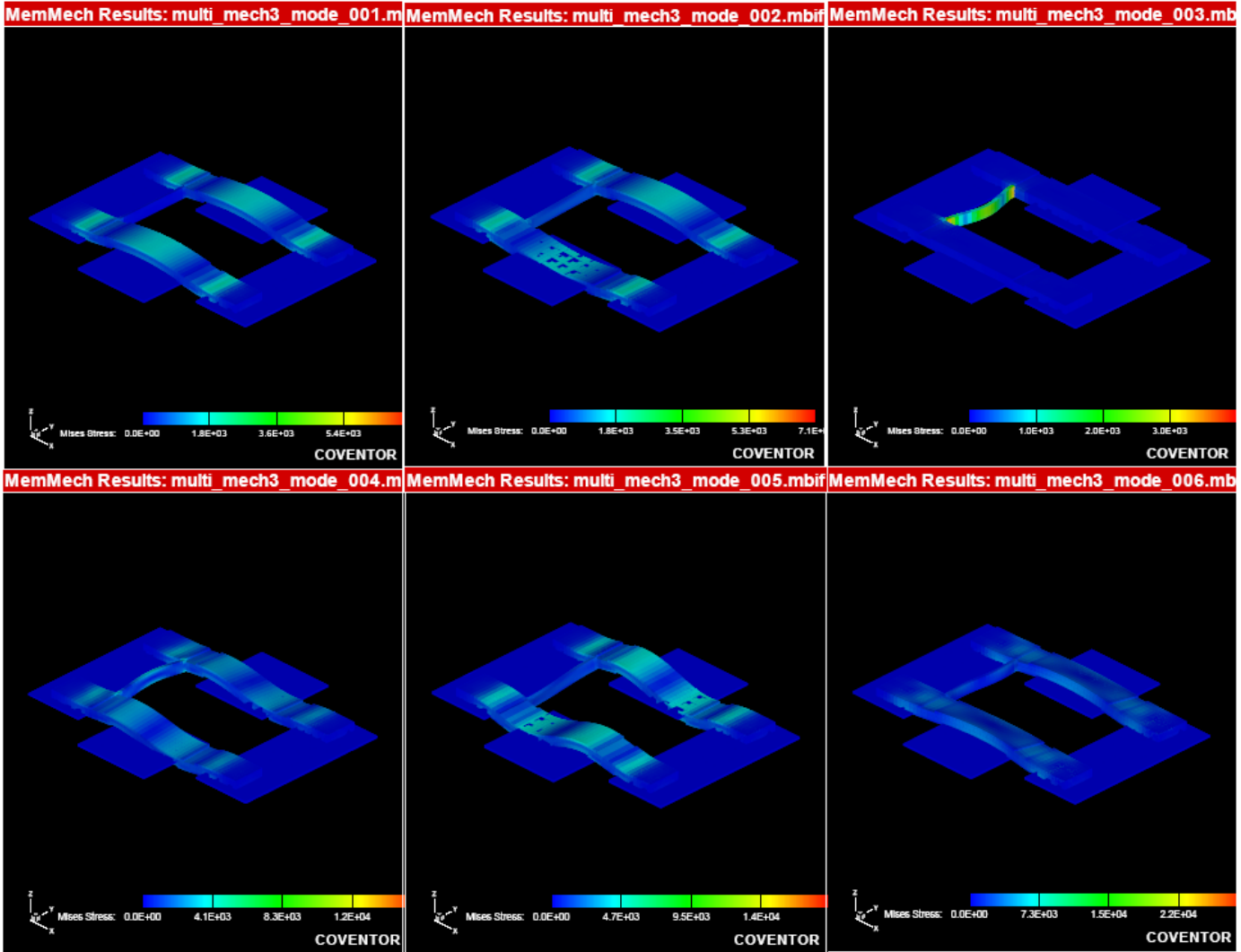


# "Meshed" 3D -modell for FEM analyse



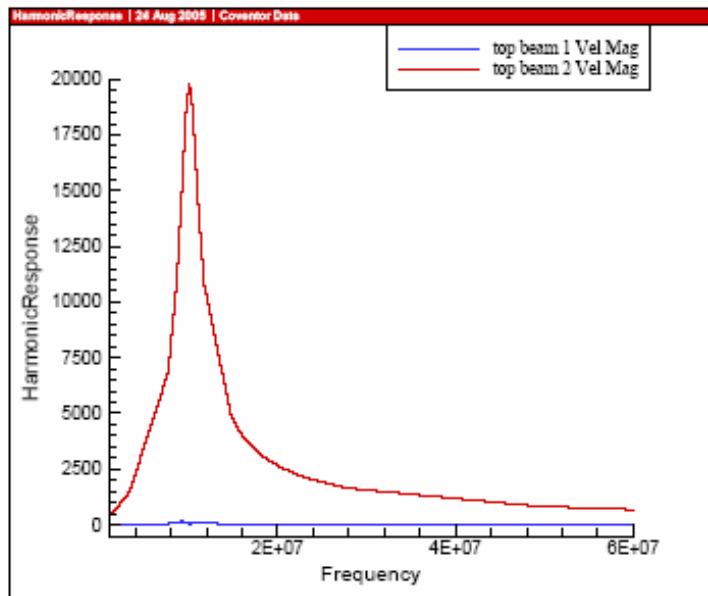
# Filter-funksjon: 2 identiske resonatorer



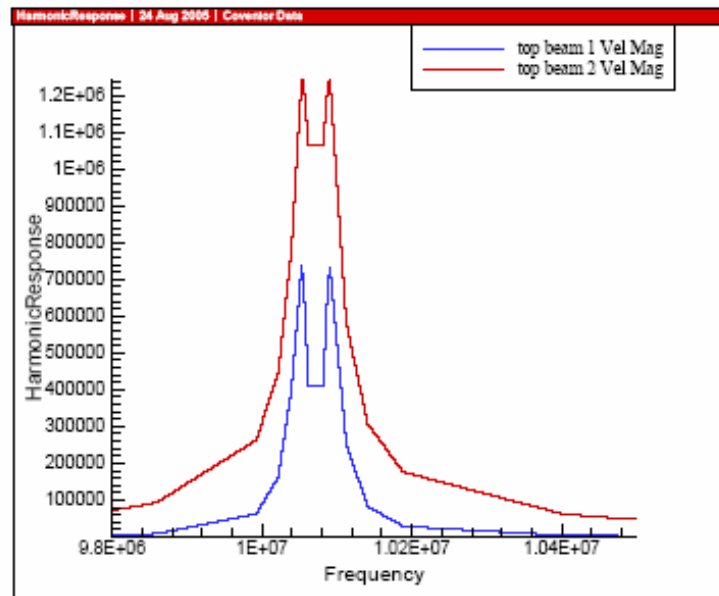


CoventorWare simulations for 6 resonating modes (O-P Arhaug)

# Harmonisk respons ved gitte dempinger



(a) 0,1



(b) 0,001

# Eksamen

- Avsluttende muntlig **eksamen** (45 min)
  - Evnt. 3 timers skriftlig eksamen
    - Avhengig av antall kandidater
- Typiske eksamens-spørsmål legges ut på web senere i vår
  - Listen fra 2007 ligger ute!

# Tematisk inndeling av emnet

- RF MEMS er et **tverrfaglig** felt
- **Hovedinndeling av stoffet**
  - Mikromaskinering (1 uke)
  - Modellering (1 uke)
  - RF kretsdesign (1 uke)
  - Gjesteforelesninger om MOEMS (2 uker)
    - ***Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems***
    - Professor Olav Solgaard, Stanford University
  - Forskjellige RF MEMS kretselementer (8 uker)
    - Prinsipper for operasjon, modeller/analyse og eksempler
    - Svitsjer, faseskiftere, resonatorer, filtre, kapasitanser og spoler
  - Pakking (1 uke)
  - Systemdesign (1 uke)
  - Repetisjon (1 uke)

# Litteratur

- Pensumbok
  - Vijay K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose, "RF MEMS and their applications". John Wiley, 2003. ISBN 0-470-84308-X
  - Ingen enkelt lærebok er spesielt velegnet
- Forelesningsfoiler **(VIKTIGE!)**
  - → Mye av pensum som foiler (ca. 1000)
  - Legges ut på web før aktuell forelesning
- Annen litteratur?
  - Oversikt lagt ut på emne-siden i web

# Praktisk

- Kontaktinfo emneansvarlig
  - Oddvar Søråsen, rom 3411, tlf.: 22 85 24 56
  - [oddvar@ifi.uio.no](mailto:oddvar@ifi.uio.no)
- Kontaktinfo grupper/obliger/CoventorWare: bruk
  - Jan Erik Ramstad
  - [janera@student.matnat.uio.no](mailto:janera@student.matnat.uio.no)
- Kontaktperson CoventorWare: drift
  - Yngve Hafting, rom 3408, tlf.: 22 85 0447
  - [yngveha@ifi.uio.no](mailto:yngveha@ifi.uio.no)
- web-sider
  - <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF5490/v08/>



# Kvalitetssikring

- Tilsynssensor
  - Geir Uri Jensen, SINTEF IKT, MiNaLab
- **Underveisevaluering**

*“Institutt for informatikk ønsker en kontinuerlig evaluering av både form og innhold i undervisningen.*

*Evalueringen skal gi studentene ved et emne mulighet til å komme med tilbakemeldinger underveis, slik at eventuelle forbedringer kan gjøres umiddelbart.*

*I tillegg skal underveisevalueringen hjelpe faglærer og instituttet til å fange opp god og mindre god undervisningspraksis og heve kvaliteten på emnet/undervisningen.*

*Emneansvarlig lærer utformer evalueringsopplegget i samråd med studentene som følger emnet og er ansvarlig for kunngjøring av tidspunkt og gjennomføring. Omfang og evalueringsmetode tilpasses hvert enkelt emne og avgjøres av faglærer.*

*Faglærer utfører eventuelle forbedringer og kommuniserer resultatet til studentene.”*

# Dagens forelesning

- Bakgrunn for emnet INF5490
- Opplegg våren 2008
- Introduksjon til temaet
  - MEMS generelt
  - RF-systemer
  - MEMS i RF-systemer

# Introduksjon til temaet

- 2 bestanddeler: RF og MEMS
- **RF** – "Radio frequency"
  - Høye frekvenser MHz, GHz
  - Typisk i trådløs overføring
  - Det er mange særtrekk og karakteristiske egenskaper ved **høyfrekvens design**
    - Eget kurs, høstsemesteret (Tor Fjeldly), anbefalt!
      - **INF5480 RF-kretser, teori og design**
    - Sentrale/nødvendige punkter tas i INF5490

# Teknologien er: MEMS

- MEMS – Micro Electro Mechanical Systems (Microsystems, MST – Micro System Technology etc.)
- **Mikromaskinering er sentralt!**
  - Vokste ut av IC fabrikasjons-prosesser (Silisium)
  - I dag finnes en rekke ulike fremstillingsprosesser
    - Ofte proprietære, spesialtilpassede
    - Forskjell fra CMOS ("second source")
- MEMS er en lovende teknologi også for RF-anvendelser
  - Eget kurs innen MEMS ved Fys inst. i høstsemesteret (Liv Furuberg), anbefalt
    - [FYS4230 Mikro- og nanosystem modellering og design](#)
  - Noen sentrale punkter tas i INF5490

# Litt om MEMS, generelt

- 2 typer: sensorer og aktuatorer kan realiseres
  - **Sensor:** (input)
    - Kan ”føle”/påvirkes av omgivelsene
    - Bevegelse omformes til elektriske signaler
    - Mange eksempler (trykk, aksellerasjon)
      - De tidligste anvendelsene (1980-årene)
  - **Aktuator:** (output)
    - Bevegelig struktur kontrollert ved elektrisk mikrokrets
    - Eks. mikromotor
    - Eks. kondensator med bevegelige plater

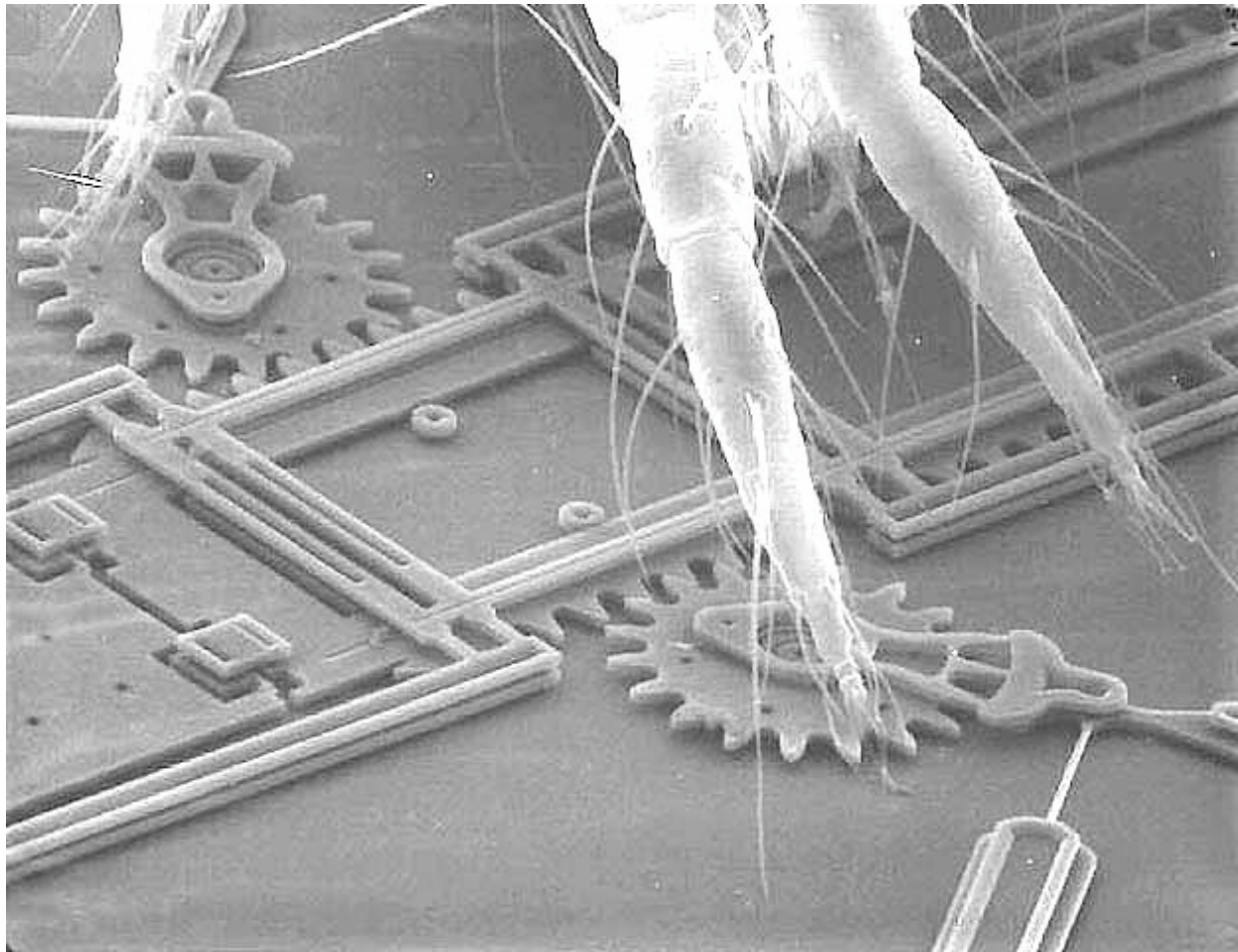
# Aktiveringsmekanismer

- MEMS strukturer kan beveges **horisontalt** ("lateralt") eller **vertikalt**
- Aktiveringsmekanismer (mer i senere forelesning)
  - **Elektrostatisk**
    - Kapasitans-strukturer: +/- ladning tiltrekkes
    - Enkelt, gir lite energi, nok for RF-anvendelser
  - **Termisk**
  - **Magnetisk**
  - **Piezoelektrisk**
    - Mekanisk tøyning ("strain") produserer et elektrisk felt, - og motsatt!

# Noen anvendelser av MEMS

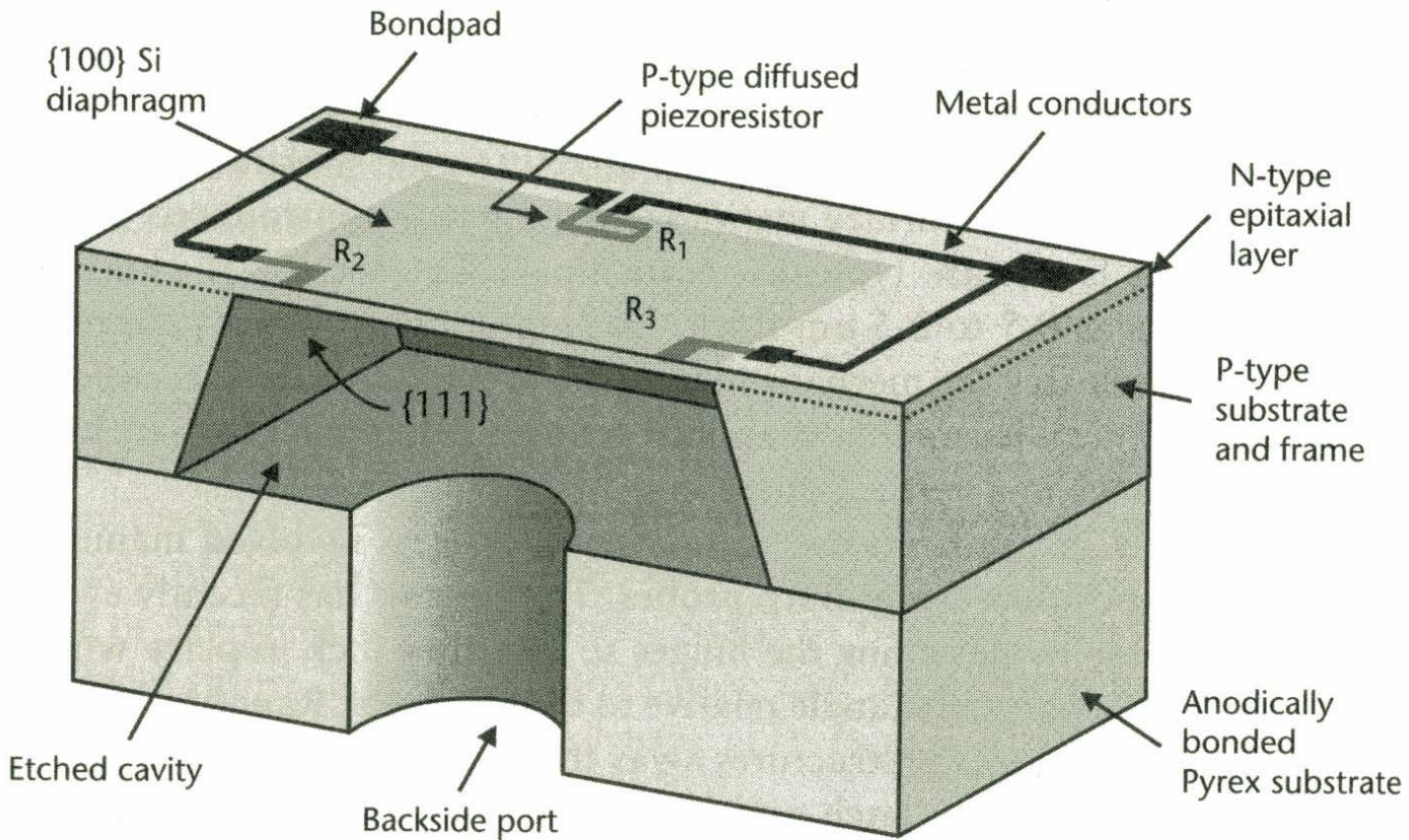
- Bilindustri
  - Mikroaksellerometer
    - Airbag-utløser (InfineonSensoNor)
  - Trykkfølere i bildekk
- Oljeindustri
  - Trykkfølere i oljerør
- Navigasjon
  - Gyroskop
- Biomedisin
  - Mikrofluidikk, kjemisk analyse
  - Forskjellige implantater
- Optikk
  - Mikrospeil for projektor
- Dataindustri
  - Blekkskriver-hoder
- Trådløs kommunikasjon
  - RF MEMS-svitsjer

# Mikromotor fra Sandia

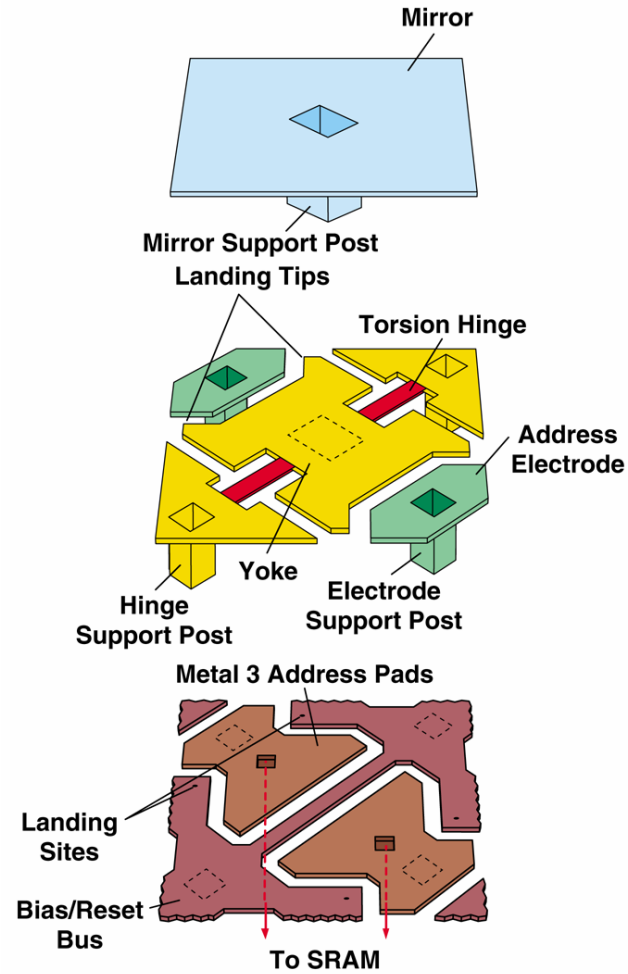




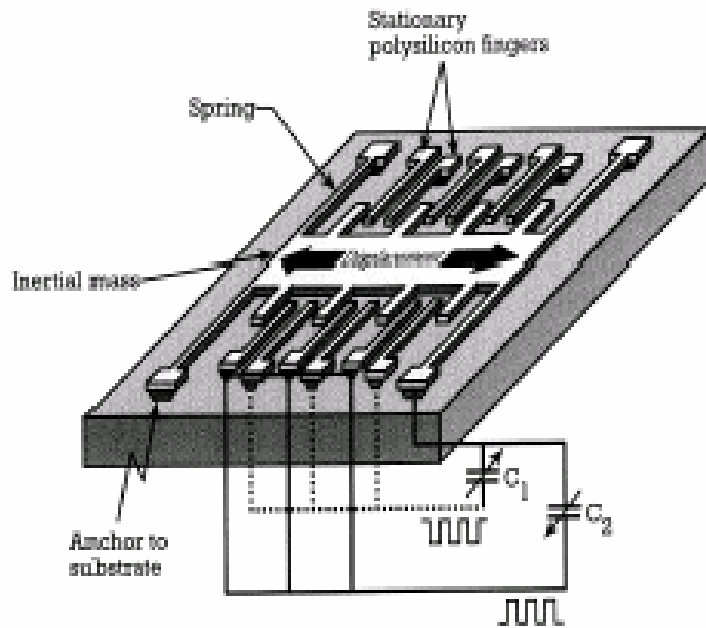
# Trykksensor



# Mikrospeil

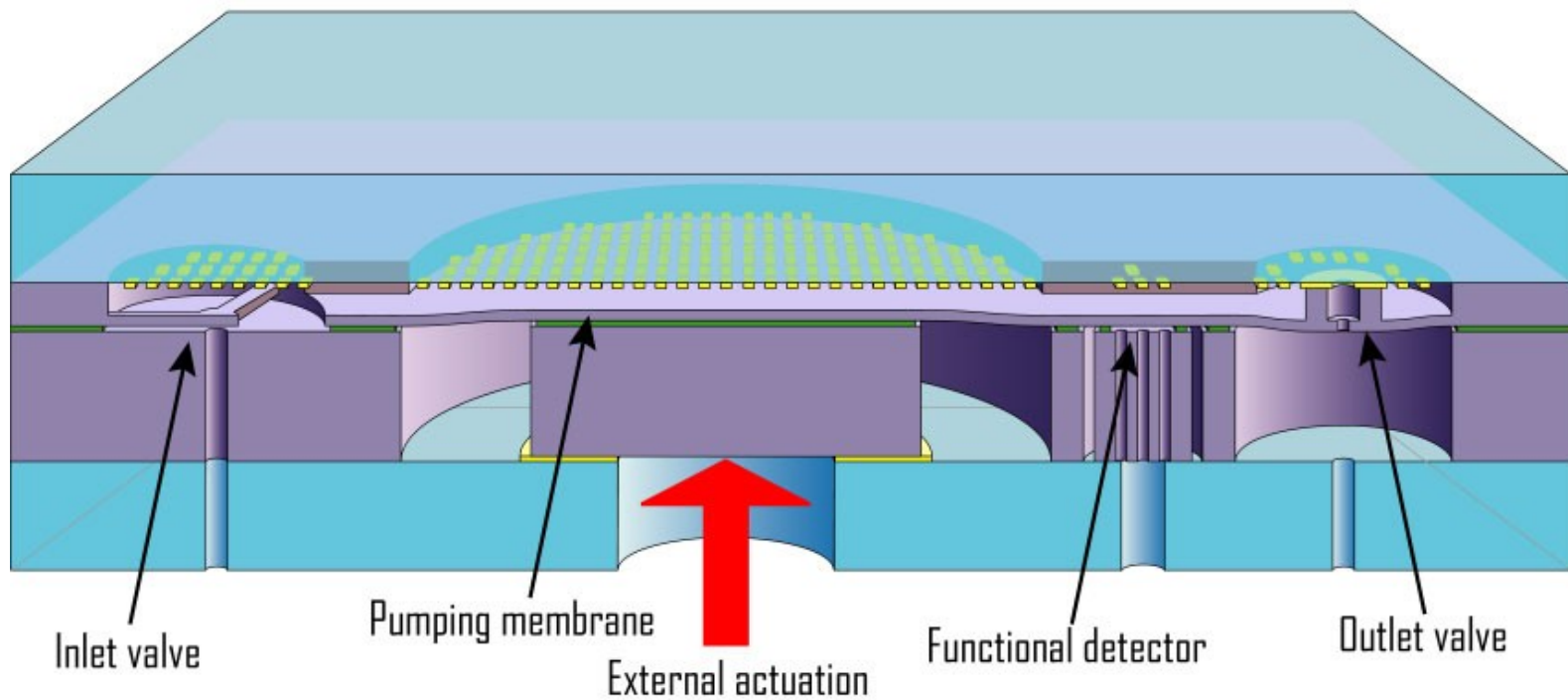


# A Capacitive Accelerometer

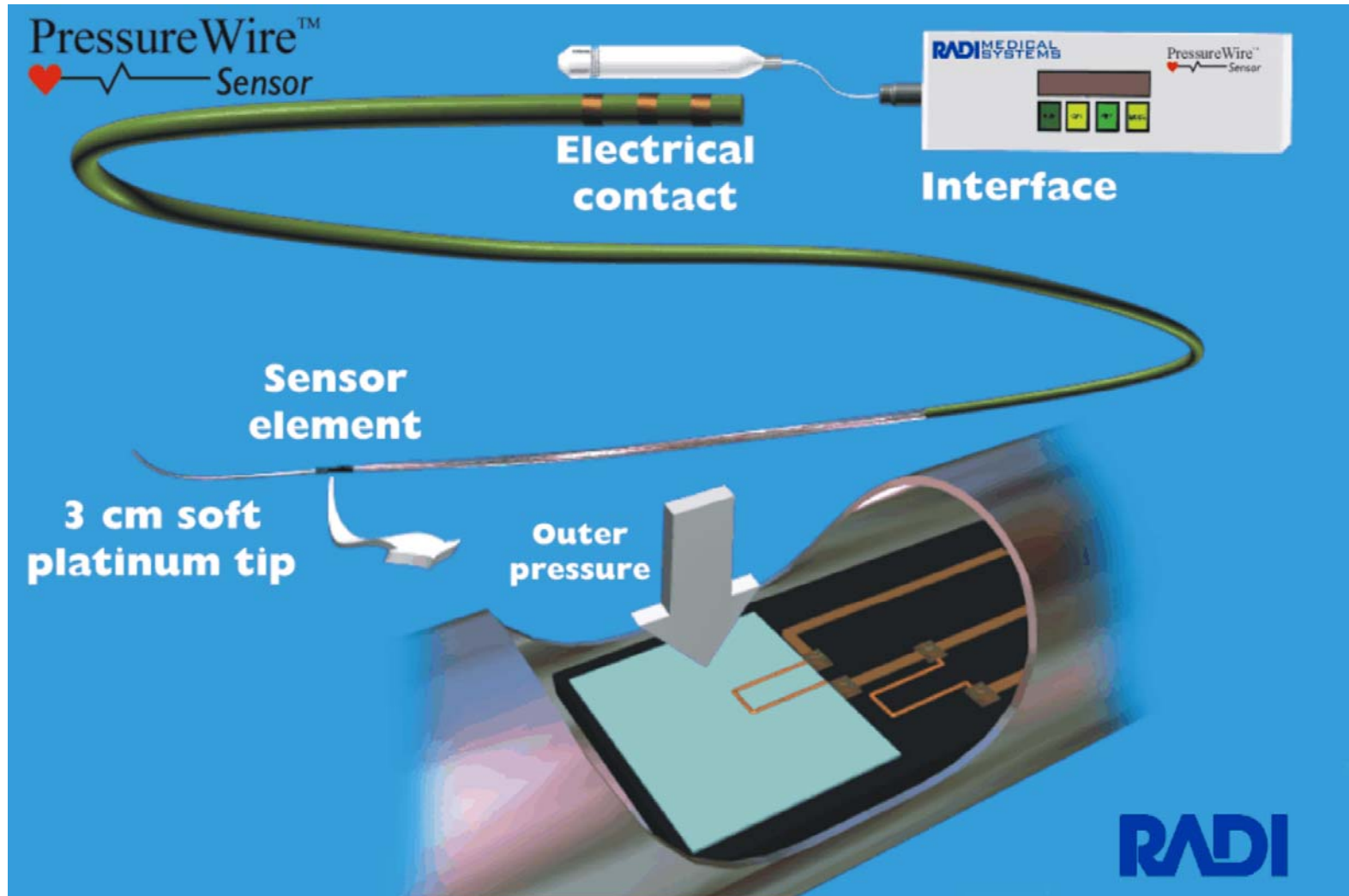


# Technology Analysis: Drug Delivery

## Debiotech Chip



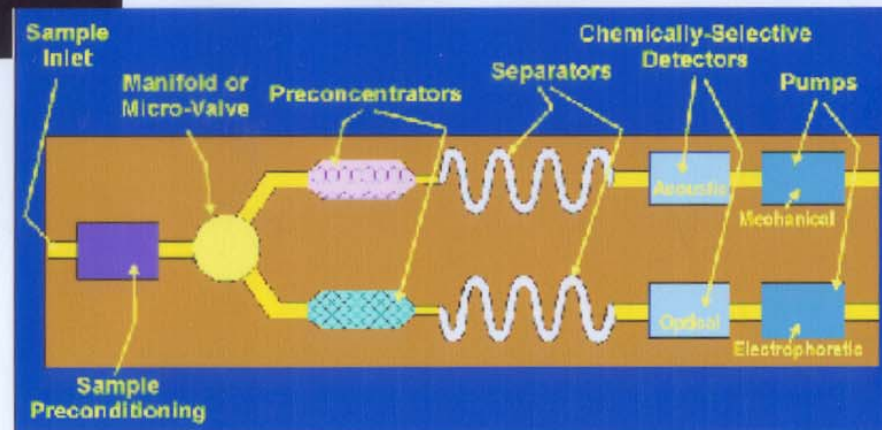
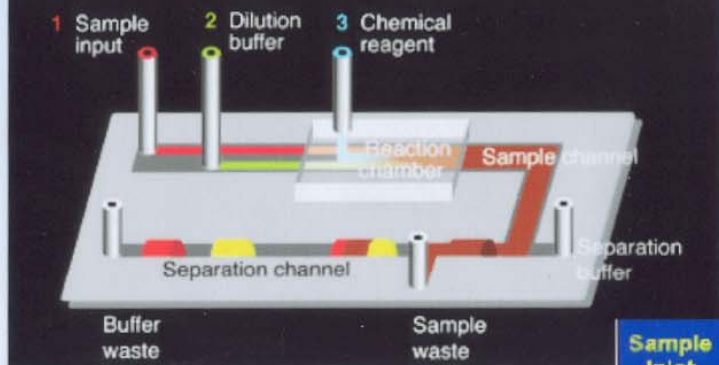
# Radi Catheter



# Biotechnology MEMS

## “Lab-on-a-Chip”

### Lab-on-a-chip concept for capillary electrophoresis



# iSTAT



- blood analysis  
glucose, urea, pH, blood gases,
- portable POC device
- analyser + disposable cartridges
- microfluidic channels
- micro-fabricated thin-film electrodes<sub>39</sub>

# Dagens forelesning

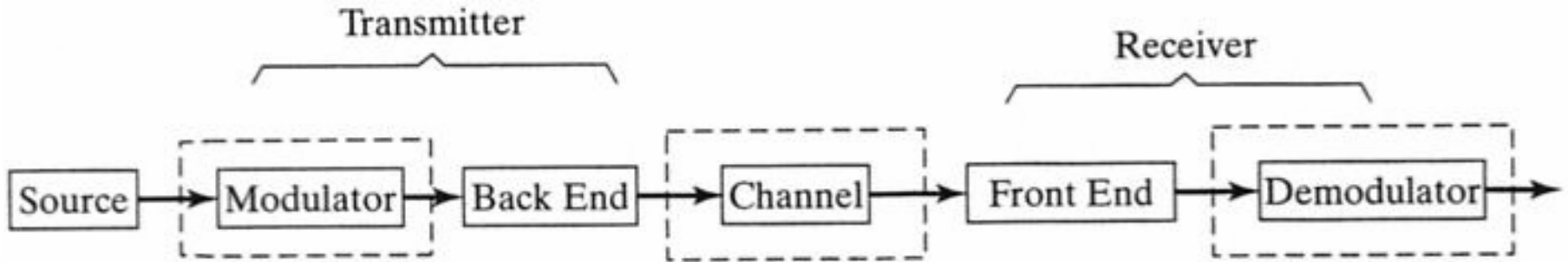
- Bakgrunn for emnet INF5490
- Opplegg våren 2008
- Introduksjon til temaet
  - MEMS generelt
  - RF-systemer
  - MEMS i RF-systemer



# RF-systemer generelt

- Radiobølger benyttes for transmisjon/mottak
  - Elektromagnetiske bølger (Maxwells ligninger)
- Grunnleggende komponent: radio **"transceiver"**
  - Transmitter + Receiver
  - Prinsipielle metoder for overføring
    - TDMA (Time Division Multiplexing Access)
    - FDMA (Frequency D M A)
- Signalkvalitet i radiokanalen avhengig av
  - Posisjon
  - Omgivelser, refleksjon
    - "Multipath"
  - Støy (S/N-forholdet, BER= bit error rate)

# Generelt kommunikasjonssystem



Bitstrøm moduleres typisk på **bærebølge** (carrier)

Radiokanalen introduserer støy, interferens, forstyrrelser

Mottaker former signalet for demodulasjon

→ **Høye krav til komponent-ytelse!**

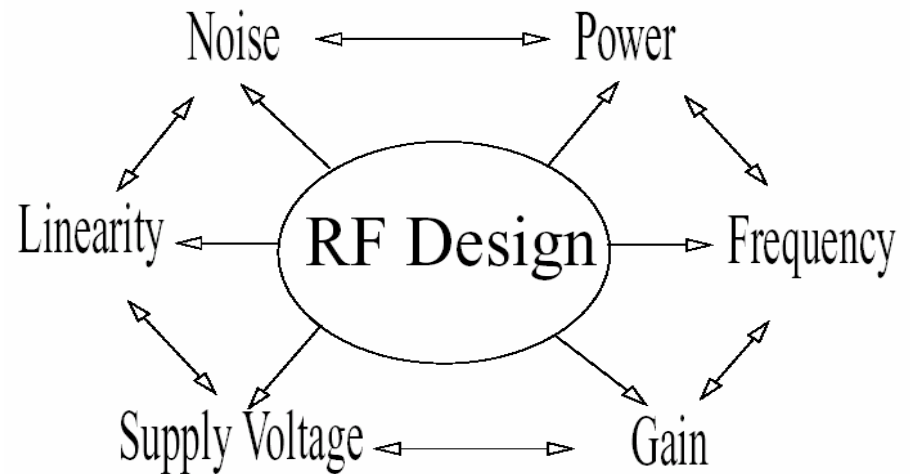
# RF-systemer

- RF-systemers effektivitet/ytelse
  - Evne til å overføre **effekt**
  - Samtidig benytte en begrenset **båndbredde**
  
- Systemene kjemper om frekvensbånd
  - ”Skarp” RF-filtrering trengs for å skille kanaler
  - Kvaliteten på RF-komponentene er sentralt for å realisere trådløs kommunikasjon

# RF design

- → **En stor utfordring for krets-konstruktøren!**
  - Mange ulike forhold kommer inn ved RF design

**RF Design Hexagon**  
**Multi-objective approach**

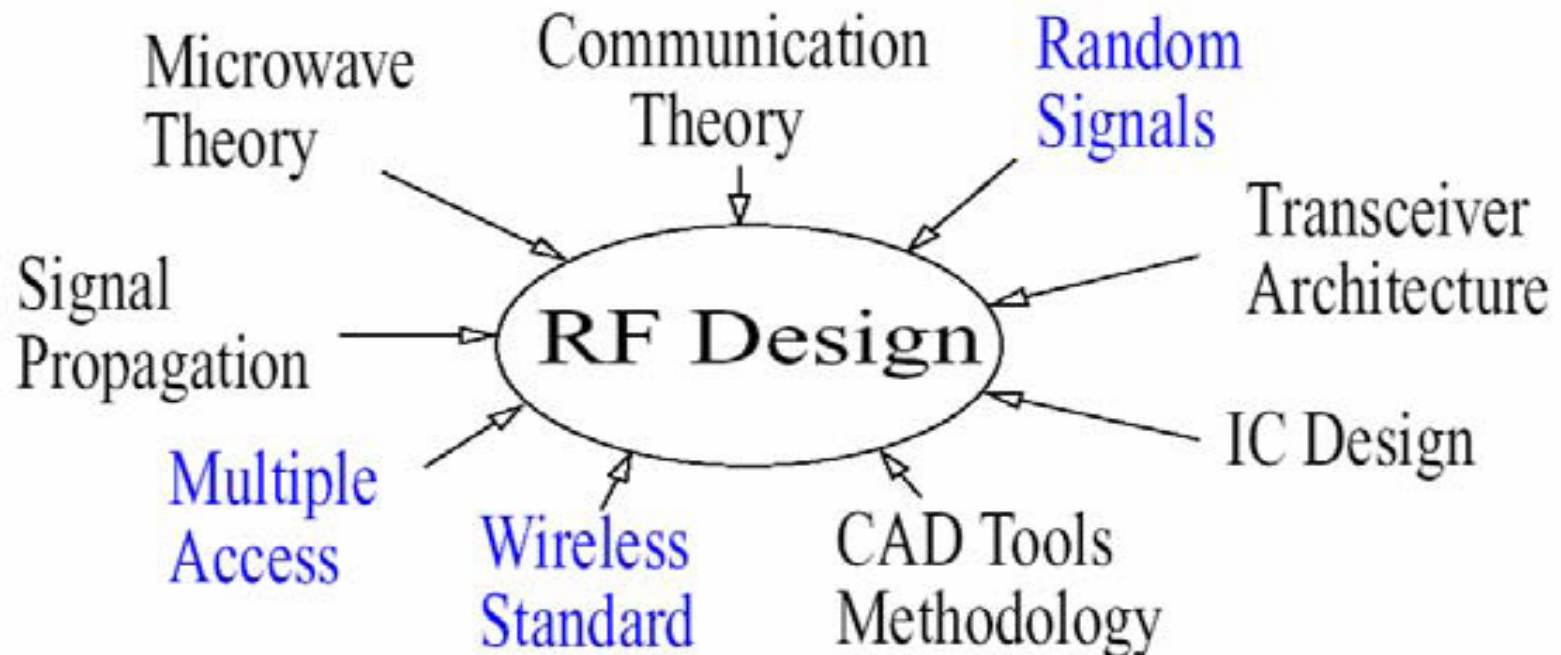


Jerzy Dabrowski, CMOS RF Transceiver Design, 2004

- CMOS-teknologi er en sterk kandidat for å implementere sentrale deler i en transceiver!
  - Kan ikke dekke alle krav til komponentytelse

# Disipliner som kreves i RF design

- Dabrowski 2004



# Overgang til RF medførere

- Økt frekvens:
  - → kortere bølgelengde
    - i vakuum:  $\lambda \cdot f = c$
  - → signalene varierer over korte fysiske avstander
    - spenning  $V$ , strøm  $I$  er ikke lenger konstante over komponentene: bølger!
  - → mindre komponent-dimensjoner er ønskelig
    - høypresisjons-fabrikering
    - mikromaskinering

**Table 1-1 IEEE Frequency Spectrum**

Frequency Band	Frequency	Wavelength
ELF (Extreme Low Frequency)	30–300 Hz	10,000–1000 km
VF (Voice Frequency)	300–3000 Hz	1000–100 km
VLF (Very Low Frequency)	3–30 kHz	100–10 km
LF (Low Frequency)	30–300 kHz	10–1 km
MF (Medium Frequency)	300–3000 kHz	1–0.1 km
HF (High Frequency)	3–30 MHz	100–10 m
VHF (Very High Frequency)	30–300 MHz	10–1 m
UHF (Ultrahigh Frequency)	300–3000 MHz	100–10 cm
SHF (Superhigh Frequency)	3–30 GHz	10–1 cm
EHF (Extreme High Frequency)	30–300 GHz	1–0.1 cm
Decimillimeter	300–3000 GHz	1–0.1 mm
P Band	0.23–1 GHz	130–30 cm
L Band	1–2 GHz	30–15 cm
S Band	2–4 GHz	15–7.5 cm
C Band	4–8 GHz	7.5–3.75 cm
X Band	8–12.5 GHz	3.75–2.4 cm
Ku Band	12.5–18 GHz	2.4–1.67 cm
K Band	18–26.5 GHz	1.67–1.13 cm
Ka Band	26.5–40 GHz	1.13–0.75 cm
Millimeter wave	40–300 GHz	7.5–1 mm
Submillimeter wave	300–3000 GHz	1–0.1 mm

# Kommunikasjonsstandarder

- Det eksisterer mange ulike kommunikasjonsstandarder

**Overview of Standards**

Standard	Access Scheme	Frequency band (MHz)	Channel Spacing	Frequency Accuracy	Modulation Technique	Data Rate (kb/s)	Peak Power
GSM	TDMA/ FDMA/ TDD	890-915 (Tx) 935-960 (Rx)	200 kHz	90 Hz	GMSK	270.8	0.8, 2, 5, 8 W
DCS-1800	TDMA/ FDMA/ TDD	1710-1785 (Tx) 1805-1850 (Rx)	200 kHz	90 Hz	GMSK	270.8	0.8, 2, 5, 8 W
DECT	TDMA/ FDMA/ TDD	1880-1900	1728 kHz	50 Hz	GMSK	1152	250 mW
IS-54	TDMA/ FDMA	824-849 (Tx) 869-894 (Rx)	30 kHz	200 Hz	$\pi/4$ QPSK	48	0.8, 1, 2, 3 W
IS-95	CDMA/ FDMA	824-849 (Tx) 869-894 (Rx)	1250 kHz	N/A	OQPSK	1228	N/A
Bluetooth	CDMA/ FDMA/FH	2400-2483	1000 kHz	20 ppm	GFSK	1000	1,4,100 mW
WCDMA (UMTS)	W-CDMA/ TD-CDMA	1920-1980 (Tx) 2110-2170 (Rx)	5000 kHz	N/A	QPSK	3840 (max)	125,250 500mW, 2W

Jerzy Dabrowski, CMOS RF Transceiver Design, 2004

6

- Går ikke inn på standarder i INF5490!



# Dagens forelesning

- Bakgrunn for emnet INF5490
- Opplegg våren 2008
- Introduksjon til temaet
  - MEMS generelt
  - RF-systemer
  - MEMS i RF-systemer

# MEMS i RF-systemer

- RF MEMS ble utviklet på 90-tallet
  - 1990: første MEMS mikrobølge-**svitsj** bedre enn GaAs (Hughes Res Lab)
  - 1995: RF MEMS svitsjer fra Rockwell Science & TI
  - Fra 1998: en rekke universiteter forsker på RF MEMS
    - Univ of Michigan, Univ of Calif Berkeley, Northeastern Univ, MIT, Columbia Univ, CMU, IMEC, LETI
  - Noen aktuelle bedrifter:
    - Analog Devices, Motorola, Samsung, ST Microelectronics
  - Institutt
    - Sandia, Fraunhofer

# Typiske RF MEMS komponenter

- Svitsjer
- Variable kapasitanser
- Induktorer
- Resonatorer
- Mikromekaniske filtre
- Faseskiftere

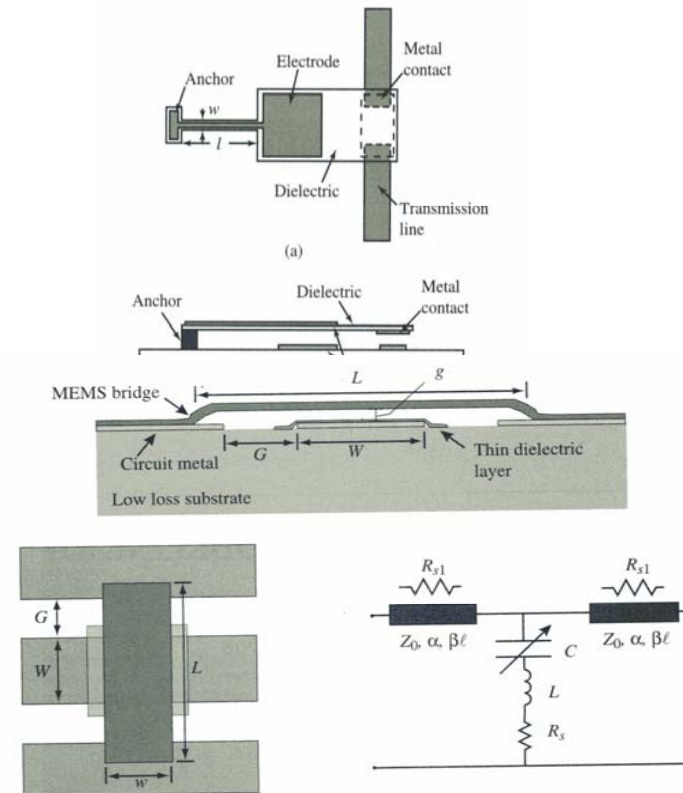
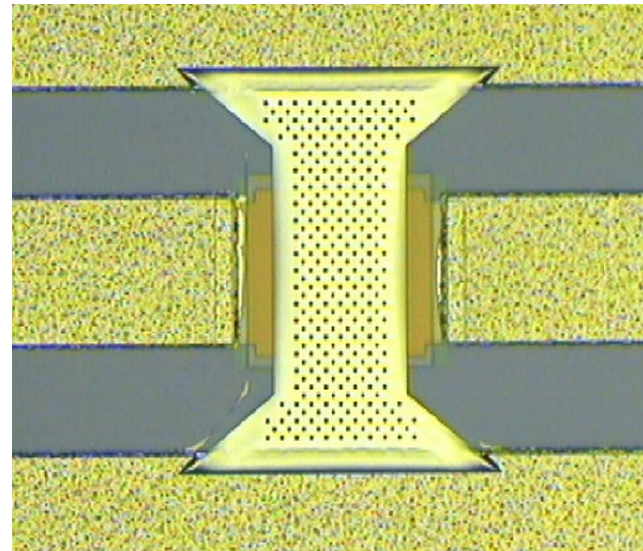


Figure 4.1. Illustration of a typical MEMS shunt switch shown in cross section and plan view. The equivalent circuit is also shown [6] (Copyright IEEE).

# Typiske RF MEMS komponenter

- Svitsjer
- Variable kapasitanser
- Induktorer
- Resonatorer
- Mikromekaniske filtre
- Faseskifttere

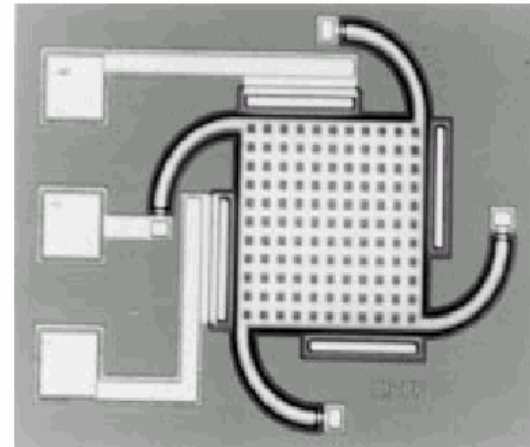
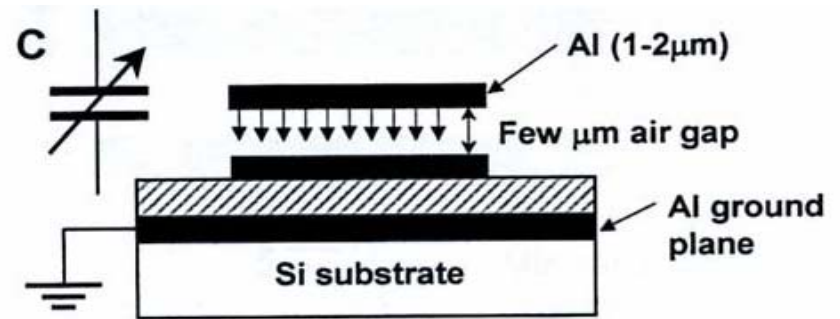


# Eks.: mikrobølge svitsj

- En tidlig anvendelse av RF MEMS
  - Mye aktivitet, mange eksempler finnes
  - Fordeler
    - Elektrostatisk styring er vanlig: enkelt prinsipp
      - El spenning → ladning → tiltrekningskrefter → mekanisk bevegelse
    - Høy linearitet ved signalgjennomgang
    - Lav DC "standby power"
    - Lavt tap ("insertion loss")
  - Ulemper
    - Lav hastighet (noen  $\mu\text{s}$ )
    - Pålitelighet i mekaniske kontakter (slitasje)

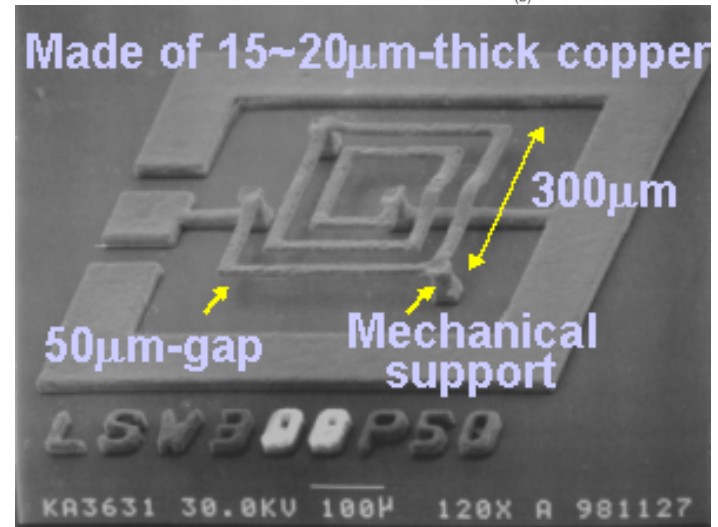
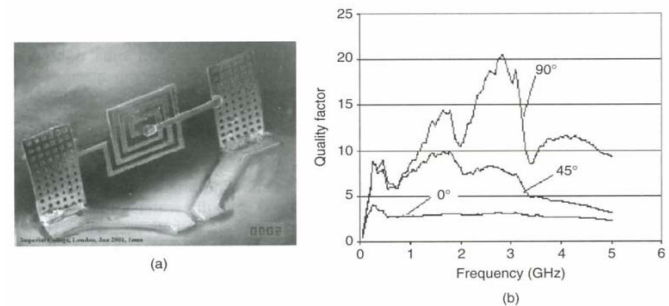
# Typiske RF MEMS komponenter

- Svitsjer
- Variable kapasitanser
- Induktorer
- Resonatorer
- Mikromekaniske filtre
- Faseskifttere



# Typiske RF MEMS komponenter

- Svitsjer
- Variable kapasitanser
- Induktorer
- Resonatorer
- Mikromekaniske filtre
- Faseskifttere

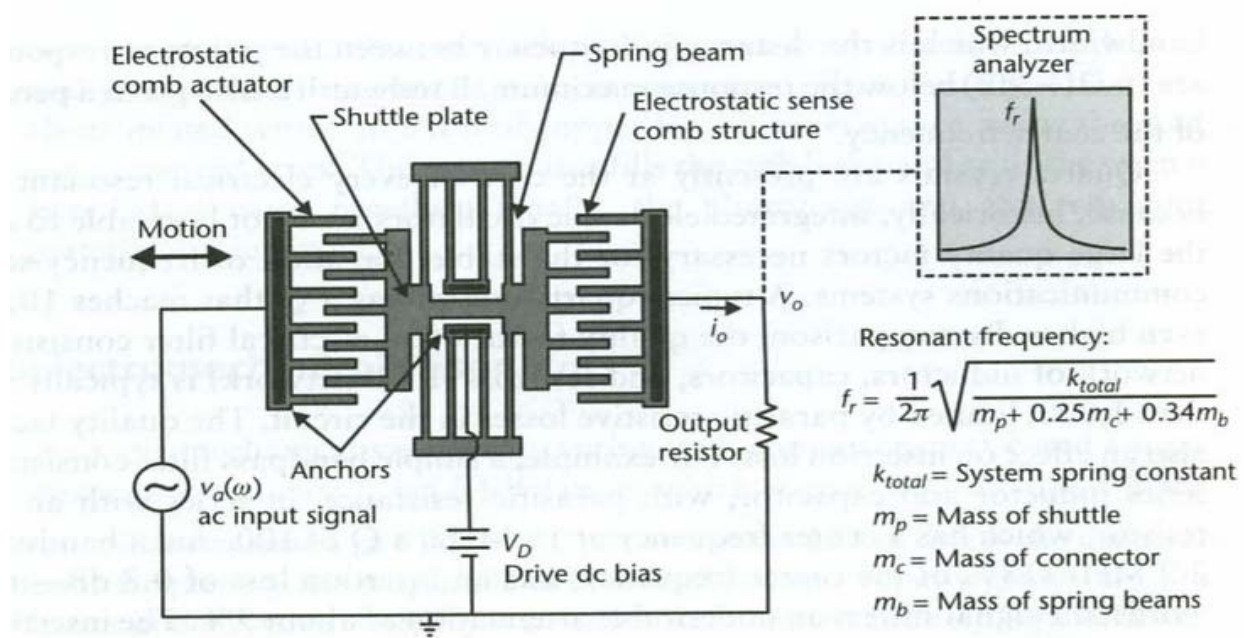


# Typiske RF MEMS komponenter

- Svitsjer
- Variable kapasitanser
- Induktorer
- Resonatorer
- Mikromekaniske filtre
- Faseskiftere
- **Fokus på ekte vibrerende strukturer →**
  - Kan implementere
    - oscillatorer
    - filtre
    - "mixer with filter"



# Kam-resonator



lateral bevegelse

# Dobbelt-innspent bjelke resonator (clamped-clamped beam)

First-order  
resonant frequency:

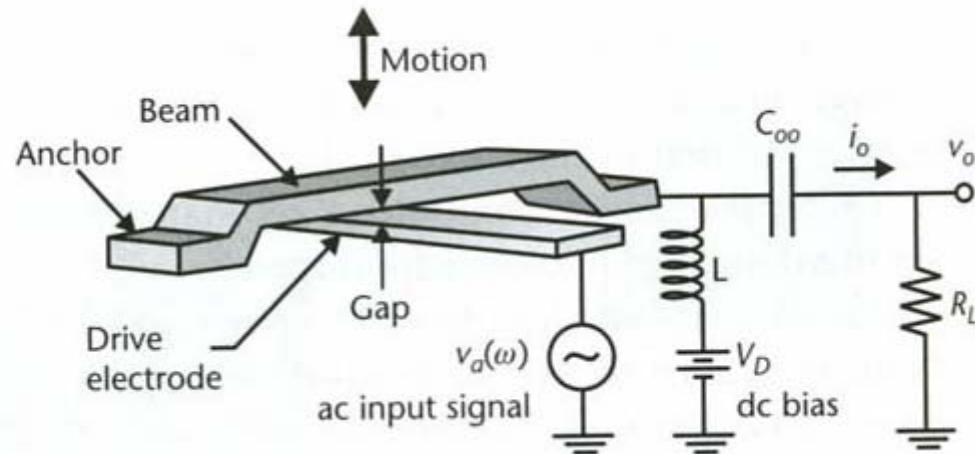
$$f_r = 1.03 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \frac{t}{L^2}$$

$E$  = Young's modulus

$\rho$  = Density

$t$  = Beam thickness

$L$  = Beam length



vertikal bevegelse

# Fordeler gitt av RF MEMS

- Høyere **ytelse**
  - Økt selektivitet: skarpe filtre
  - Høyere Q-faktor: stabil "tank" frekvens
  - Redusert tap
  - Bedre isolasjon, mindre overhøring
  - Lavere signalforvrengning
  - Økt båndbredde
- Lavere **effektforbruk**
- **Kostnadsreduksjon**
  - Batch prosessering
- Krets og system **miniatyrisering**
  - Systemintegrasjon ( $\mu$ elektronikk + MEMS)
    - Pakking: Multi-chip modul
    - Monolittisk integrasjon: SoC (System-on-Chip)

# Utfordringer ved å implementere RF transceivere

- **Ytelse**

- Integrerte mikroelektronikk-komponenter har begrenset ytelse ved RF
  - Teknologi: GaAs, bipolar Si, CMOS, PIN-dioder
  - eks. PIN-diode svitsj (ineffektiv), RF filter (vanskelig)
- Dagens RF systemer trenger **off-chip componenter** for å oppnå ønskede egenskaper
  - "matching" nettverk, filtre
  - krystall-oscillatorer, spoler, variable kondensatorer

- **Miniatyrisering**

- **Diskrete** komponenter er et hinder for miniatyrisering
- Kretskortmontasje → plasskrevende

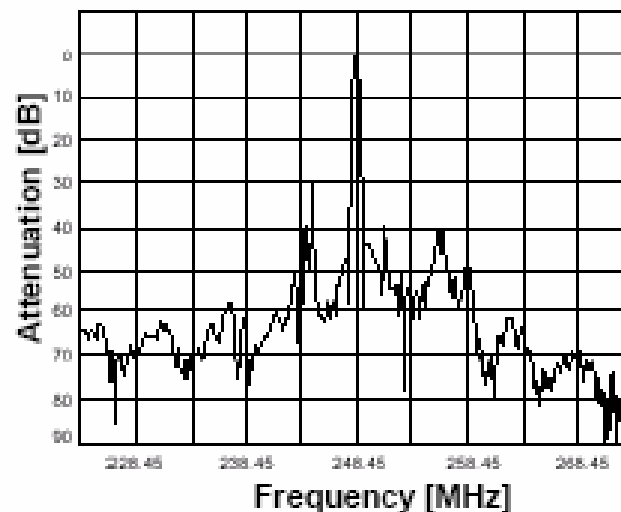
# Utfordringer ved å implementere RF transceivere

- **Rekonfigurerbarhet**

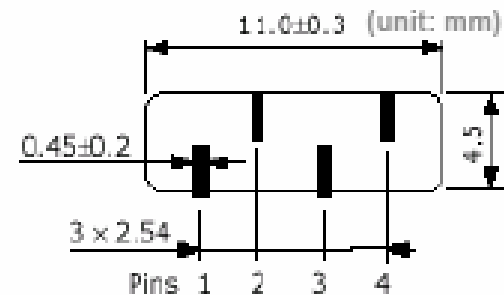
- Økende krav til at en RF transceiver skal dekke en rekke standarder og kanaler
  - Programmerbarhet er ønskelig
- **Rekonfigurerbar "front-end"** for "sw-defined radio" trens
  - RF MEMS kan løse problemet!

# Bottlenecks in Current Microwave/MM-Wave Systems – Band Selection Filters

- **High-Q** ( $Q \sim 1000$ 's) filters are needed in heterodyne communication receivers for frequency selection in RF and IF bands
- Current solution: Off-chip surface-acoustic wave (SAW) filter
  - Bulky



**IF filter**  
 $f_0$ : 240MHz  
 $\Delta f$ : 260kHz  
 $Q$ :  $\sim 1000$



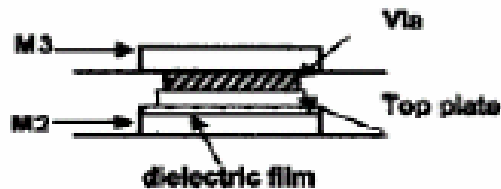
**RF filter**  
 $f_0$ : 868MHz  
 $\Delta f$ : 600kHz  
 $Q$ :  $\sim 1500$

# Bottlenecks in Current Microwave/MM-Wave Telecommunication Systems – Passive Elements

- Lack of high-Q ( $\sim 1000$ ) passive elements like inductors and capacitors in matching circuit or bias-Tee, etc.

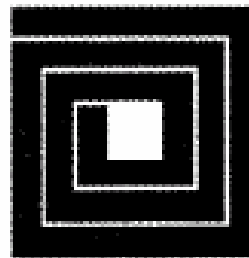
## MIM Capacitor

- Low Q ( $< 100$ )



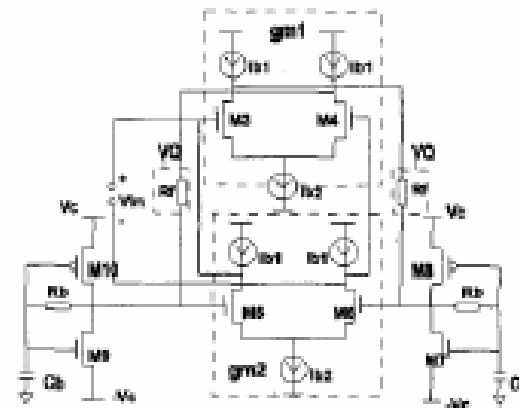
## Spiral Inductor

- Low Q ( $\sim 10$ )
- Low resonant frequency



## Active Inductor

- Large Noise
- High Power consumption



# Bruk av RF MEMS

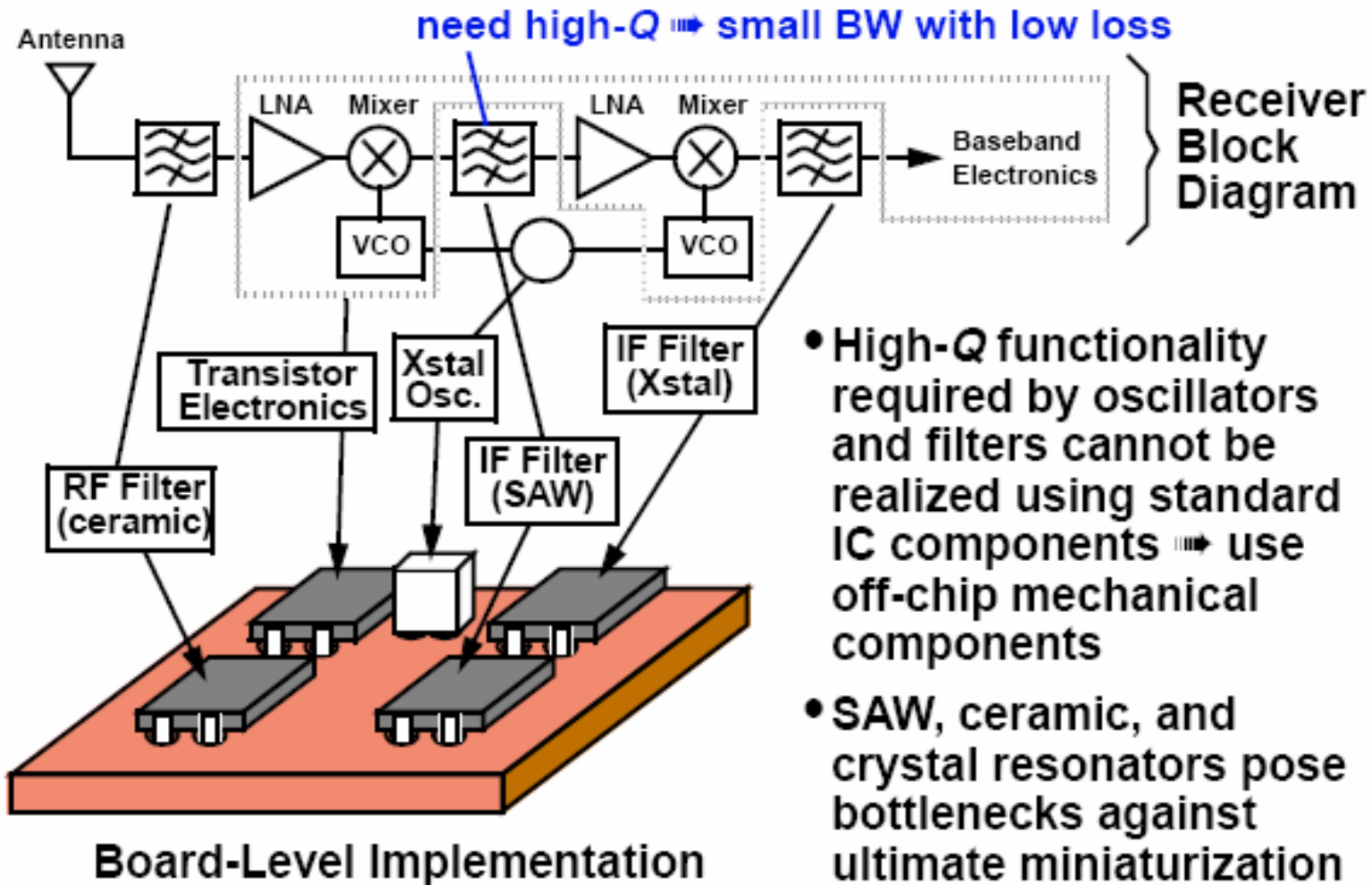
- A) **Erstatning** for diskrete passive komponenter
- B) **Ny** integrert funksjonalitet
  - Nye system-arkitekturer
    - Realisere rekonfigurerbare RF systemer ved bruk av nær ideelle RF MEMS svitsjer



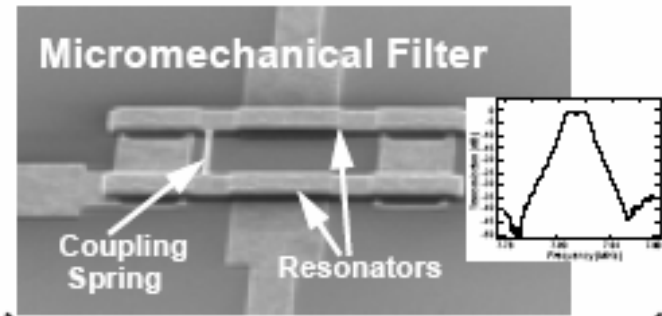
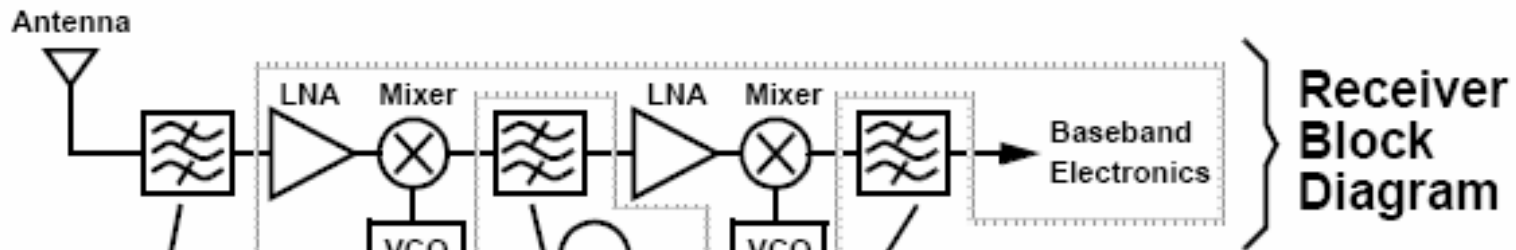
# Miniatyrisering av transceiver

- En typisk RF transceiver med diskrete komponenter →
  - Illustrasjoner av Prof. Clark T.-C. Nguyen, Univ of Michigan → UC Berkeley
    - Nguyen har stor aktivitet innen RF MEMS: resonatorer
  - Viser hvilke deler som med fordel kan **erstattes** av MEMS?

# Miniaturization of Transceivers

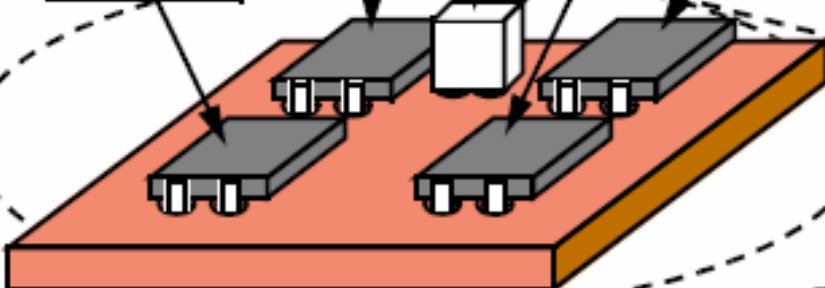


# Target Application: Integrated Transceivers



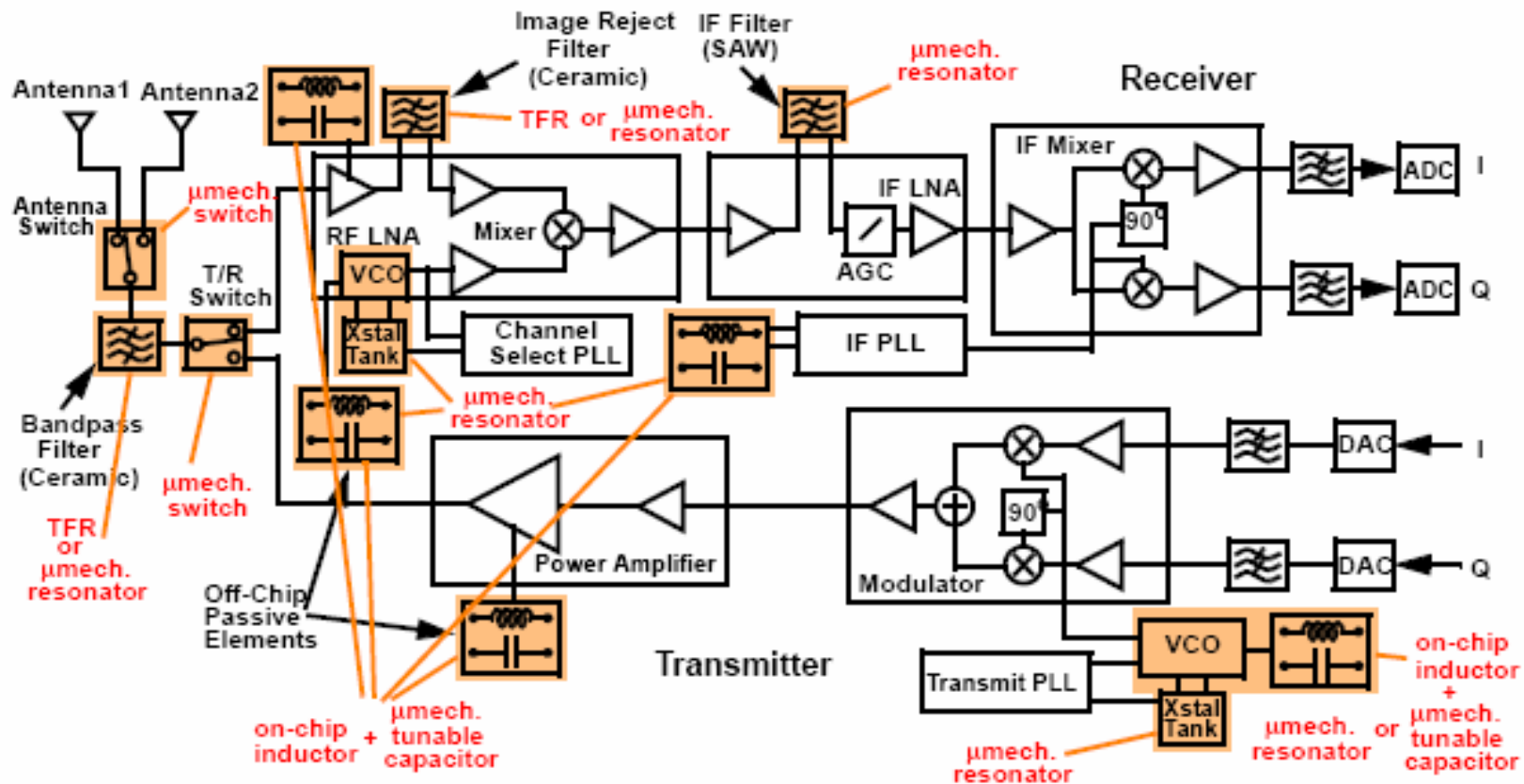
**MEMS**

↓



- Off-chip high-Q mechanical components present bottlenecks to miniaturization ⇒ replace them with  $\mu$ mechanical versions

# MEMS-Replaceable Transceiver Components



- A large number of off-chip high-Q components replaceable with  $\mu$ machined versions; e.g., using  $\mu$ machined resonators, switches, capacitors, and inductors

# Nye RF arkitekturer

- MEMS muliggjør **nye måter** å konstruere RF systemer på
  - MEMS teknologi kan brukes til å lage mange, små, billige eksemplarer av grunn-komponenter
    - Svitsjer kan brukes til å velge mellom grunnmodulene
  - MEMS kan lette modularisering av design
    - Mikromaskinerte "lumped\* components" kan erstatte distribuerte (\* "lump" = klump, noe som ses under ett)
    - Gir fleksibilitet i integrasjon (enklere modularisering)

# Noen utfordringer for RF MEMS

- Aktiveringshastighet bør økes
  - Svitsjer (typisk 1-100  $\mu$ s)
- Oppnåelig RF frekvens bør heves
  - Opp til noen få GHz i dag (3 – 5 GHz)
- Gode RF filterbanker for båndseleksjon bør realiseres
- Pålitelighet må utforskes videre
- Pakking er en utfordring
  - Vakuum
  - Moduler av ulike materialer og teknologi
    - SiP – "System-in-Package"
- **Monolittisk integrasjon** er ønskelig
  - SoC – System-on-Chip

# Integrerte løsninger?

- Fremstilling av mikroelektronikk og MEMS har mange fellestrekk
- Kombinasjon av elektronikk og mikromekanikk
  - Integrerte løsninger på Si-brikke
    - → "Radio-on-a-chip"!

MEMS for wireless integration

Intel Developer Forum Spring 2002

## MEMS for wireless integration

**Today**

BASE BAND PROCESSOR RF CHIP

100s of passive components

**Future (3 - 4 Yrs)**

RF MEMS CHIP

BASE BAND RF

RF MEMS CHIP

**Future (4+ Yrs)**

BASE BAND RF & MEMS CHIP

- Silicon integration follows Moore's law
- MEMS research to enable:
  - "High Value" passives (Filters, Switches etc) to be built from Silicon and integrated together

Intel Labs

http://www.intel.com/labs

Copyright © 2002 Intel Corporation

Page 18

# Perspektiv

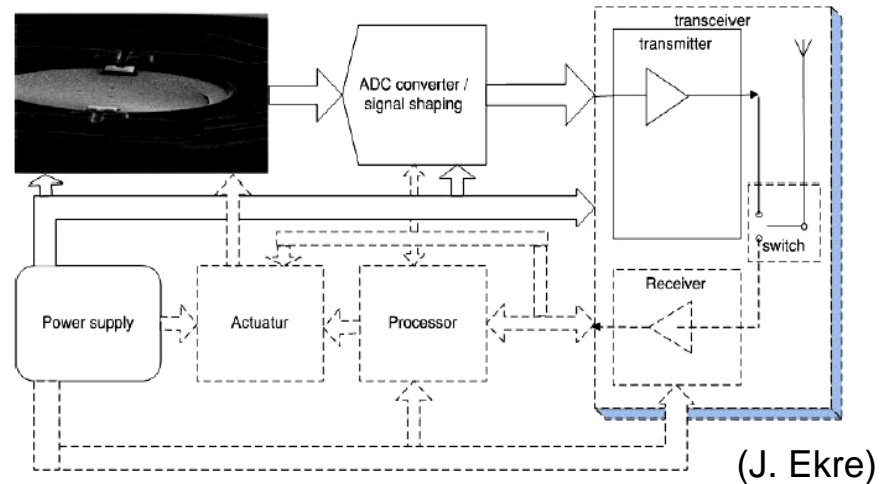
- Bruk av trådløs (personlig) kommunikasjon ekspanderer
  - 3-4 G systemer og mobile terminaler
  - Multistandard enheter
    - "15 radiosystemer i hver enhet?"
- Ulike teknologier smelter sammen
  - Mikromekanikk og mikroelektronikk
  - **Optikk** og elektronikk
  - Passive komponenter og aktive ICs



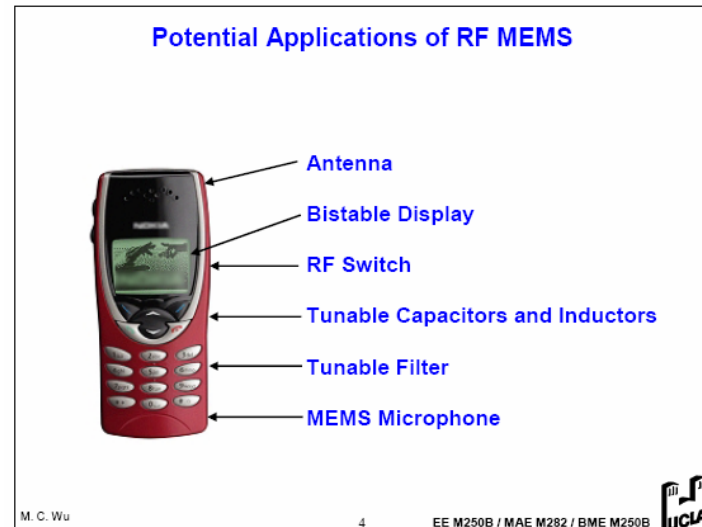
# Bruk av RF MEMS

- Trådløse sensor nettverk (WSN)

- Sensorer overalt
  - kompakte, intelligente
- "ambient intelligence"



- Mobile terminaler



# Internasjonal oppmerksomhet

- RF MEMS er tema på ledende internasjonale konferanser
  - ISSCC, IEDM (Int. Electron Devices Meeting)
  - Egne MEMS-konferanser og tidsskrifter
    - Se web-siden!
- Europractice tilbyr MPW (Multi Project Wafer)
- Økt interesse for RF MEMS i industrien
  - Ser store muligheter
    - Miniaturisering, ytelsesøkning, volumproduksjon
  - MEMS generelt har ikke tatt av!
    - Noen få suksesshistorier: airbagutløser, projektor, skriverhoder