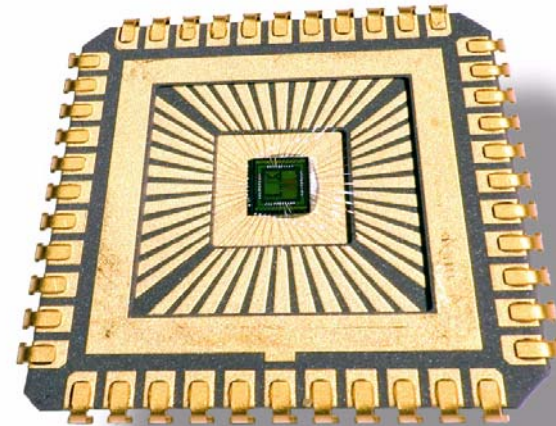
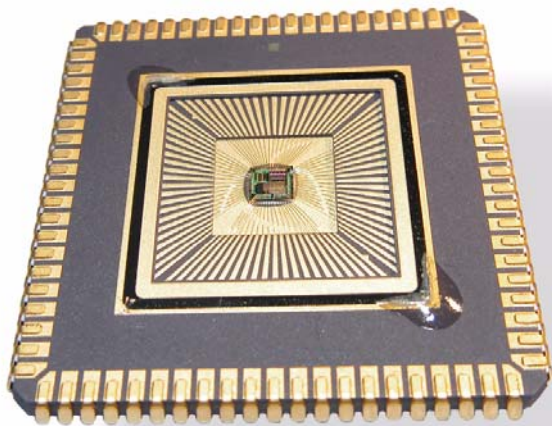


---

# EDA351 KRETSELEKTRONIK

**“Gå mot strömmen, höj din potential”**



Professor Per Larsson-Edefors  
VLSI Research Group, Chalmers tekniska högskola

---

# **FÖRELÄSNING 1**

## **Kursinformation**

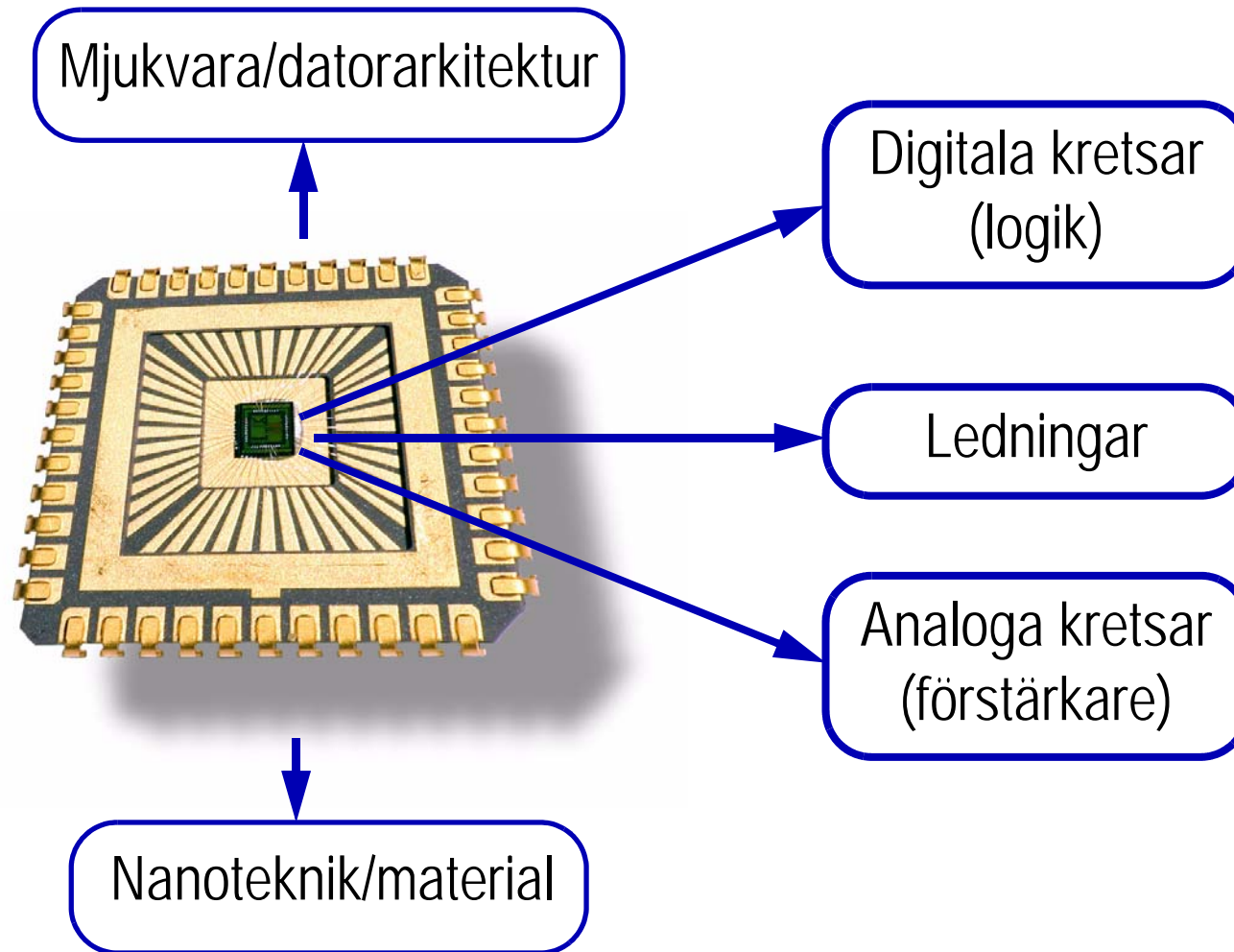
### **Elektronikens framväxt**

**Repetition: Elektronikens kärna — förstärkaren**

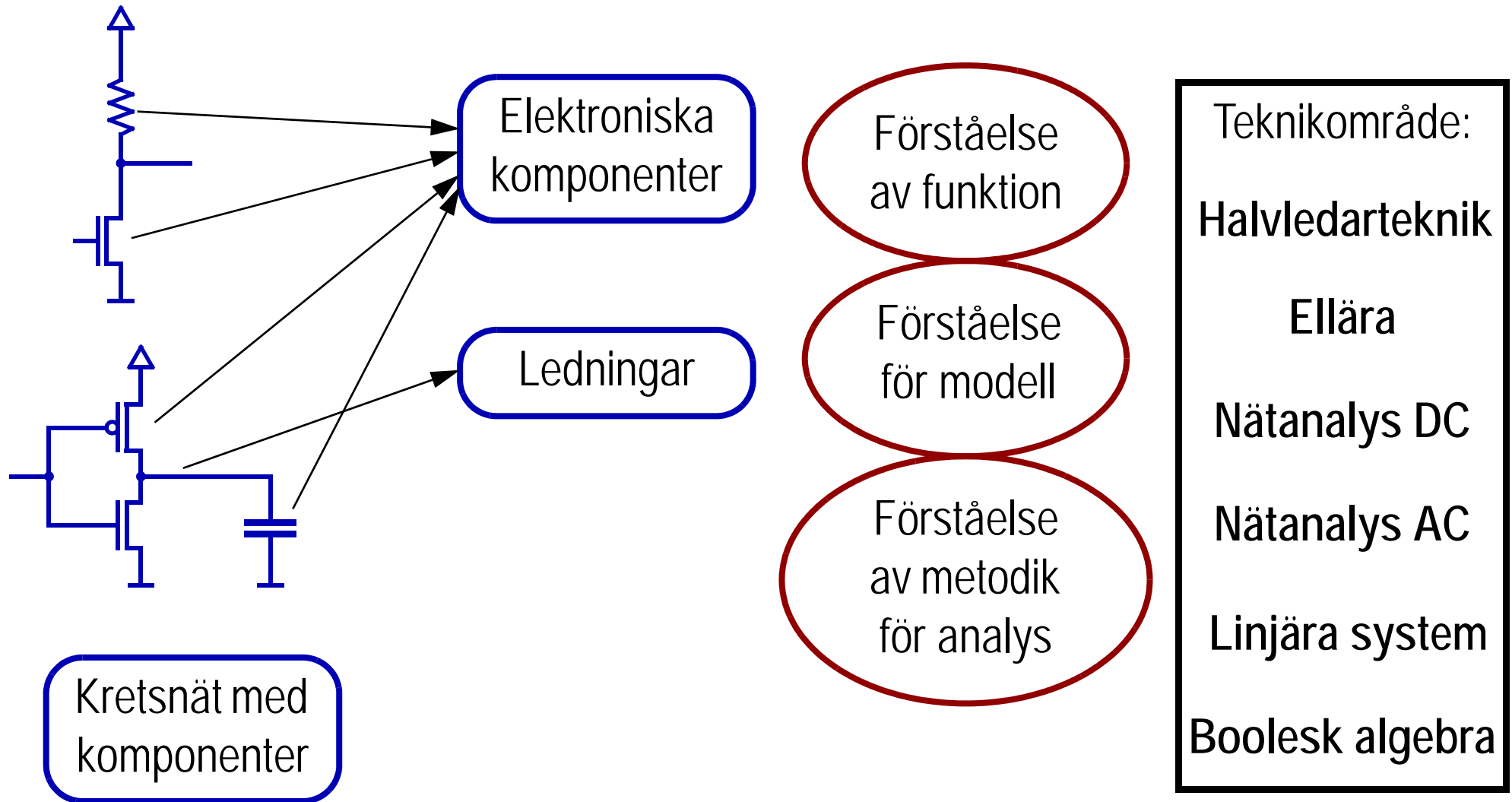
**Repetition: Nätanalys för DC**

# Kursinformation

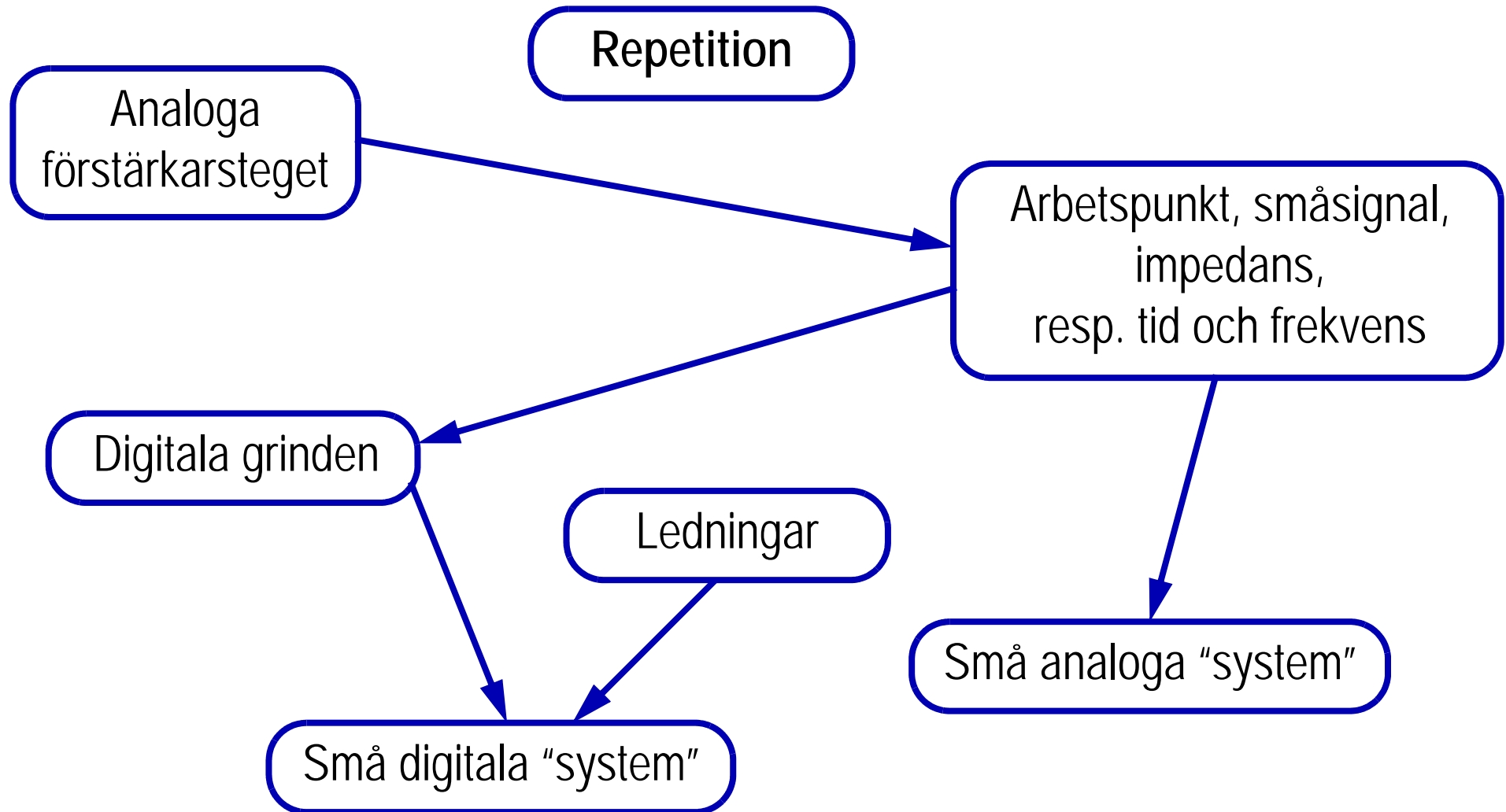
# CENTRALA BEGREPP I ELEKTRONIKKONSTRUKTION



# FÖRSTÅELSE FÖR KRETSAR OCH KOMPONENTER



# EDA351 KRETSELEKTRONIK



## **FAKTA OM EDA351 KRETSELEKTRONIK**

[www.cse.chalmers.se/edu/year/2009/course/EDA351/](http://www.cse.chalmers.se/edu/year/2009/course/EDA351/)

### ◆ Kursmaterial:

- Föreläsningar (pdf)
- Övningsuppgifter (pdf)
- SPICE-övningar (pdf)
- Eskils ledningskapitel (pdf)

### ◆ Referensbok:

- Sedra och Smith, "Microelectronic Circuits", 5:e utgåvan, OUP, 2004

## **LÄRANDEMÅL - REPETITION**

- ◆ ... tillämpa grundläggande kretsätsanalys för
  - likspänning och växelspanning ( $j\omega$ -metoden).
  - spännings- och strömkällor, linjära komponenter ( $R$ ,  $C$ ,  $L$ ) samt icke-linjära (transistorer, dioder).
  - metodik för att anpassa icke-linjära komponenter till linjära system.
- ◆ ... hjälpligt tillämpa grundläggande nätanalys för frekvensberoende överföringsfunktioner.
- ◆ ... redovisa, på ett övergripande sätt, operationsprinciperna för de centrala elektroniska komponenterna; kapacitansen (elstatik), dioden (halvledarteknik) samt MOSFET-transistorn (halvledarteknik).



## **LÄRANDEMÅL - ANALOGA KRETSAR**

- ◆ ... genomföra en enkel analys av ett enkelt förstärkarsteg med avseende på de grundläggande elektriska förstärkaregenskaperna vid
  - arbetspunkten, d.v.s. ström, spänning, impedanser.
  - småsignalsoperation, d.v.s. transkonduktans, förstärkning, linjaritet.
- ◆ ... hjälpligt genomföra en enkel analys av ett enkelt förstärkarsteg m.a.p.
  - alternativa sätt att implementera en lastresistans, t.ex. med en strömkälla.
  - frekvensberoende förstärkaregenskaper, genom påverkan från kapacitanser på överföringsfunktionen.
- ◆ ... redovisa, på ett övergripande sätt, hur
  - ström alternativt spänning används som informationsbärare mellan förstärkarsteg.
  - systemaspekter som kaskadkoppling och återkoppling påverkar ett förstärkarsteg.

## **LÄRANDEMÅL - DIGITALA KRETSAR**

- ◆ ... genomföra en enkel analys av den enklaste digitala grindkretsen (CMOS-inverteraren) med avseende på
  - storsignalbeteende hos transistorerna.
  - upp- och urladdningsförlopp med antagande om lastkapacitans.
  - första-ordningens fördröjning och effektutveckling.
- ◆ ... förklara hur grindfördröjning påverkas av transistorkretsens topologi och transistorernas storlekar.
- ◆ ... redovisa, på ett övergripande sätt, funktionen hos kretsar för SRAM-minnen och kretsar för synkronisering, d.v.s. vippor.

## **LÄRANDEMÅL - LEDNINGAR I DIGITALA SYSTEM**

- ◆ ... redogöra för vad som är utmärkande för de två kategorier av modeller för ledningar som används i digitala system; ledningen med förluster respektive den förlustfria ledningen.
- ◆ ... genomföra en enkel analys av hur en digital signal påverkas i förlustfria ledningar; d.v.s. långa, breda chipsledningarna och kretskortsledningarna.
- ◆ ... göra grundläggande konstruktionsval för såväl ledningar med förluster som förlustfria ledningar.
- ◆ ... redovisa, på ett övergripande sätt, vilken betydelse stig- och falltider har för digitala system.

## **EXAMINATION**

- ◆ Godkänt förberedda och genomförda SPICE-övningar (med undantag av Avsnitt 11.2 och Avsnitt 11.3) tillsammans med kort individuell muntlig tentamen krävs för betyg 3.
- ◆ Godkänt förberedda och genomförda SPICE-övningar tillsammans med längre individuell muntlig tentamen krävs för betyg 4 och 5.

### *Kommentarer:*

1. För samtliga betyg är god/komplett dokumentation av SPICE-övningarna mycket viktigt.
2. Godkänd förberedelse = inlämnande till examinator av lösningar på förberedelseuppgifterna för respektive SPICE-övning.
3. Godkänt genomförande = redovisning för examinator av lösningar på övriga uppgifter för respektive SPICE-övning.

## **EXAMINATIONSÅL**

**Mål:** Alla ska klara kursen. (Alla brukar klara kursen.)

**Potentiella hinder:** Frånvaro.

# SCHEMA

Nr	Innehåll	Tid och plats	pdf
	<p><b>Lärandemål för repetitionsblock. Teknologen ska kunna ...</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* tillämpa grundläggande kretsåtnsanalys för               <ul style="list-style-type: none"> <li>- likspänning och växelspänning (jw-metoden)</li> <li>- spännings- och strömkällor, linjära komponenter (R, C, L) samt icke-linjära (transistorer, dioder)</li> <li>- metodik för att anpassa icke-linjära komponenter till linjära system</li> </ul> </li> <li>* hjälpligt tillämpa grundläggande nätanalys för frekvensberoende överföringsfunktioner</li> <li>* redovisa, på ett övergripande sätt, operationsprinciperna för de centrala elektroniska komponenterna; kapacitansen (elstatik), dioden (halvledarteknik) samt MOSFET-transistorn (halvledarteknik)</li> </ul>		
F1	<p><b>Föreläsning 1:</b>            Introduktion till ämnet och till kursen.            Repetition av elektromagnetiska fält, nätanalys för AC/DC, samt elektroniska komponenter</p>	må 21/1, 13-15, ES53	<a href="#">ladda hem</a>
F2	<p><b>Föreläsning 2:</b>            Fortsättning på repetition av elektromagnetiska fält, nätanalys för AC/DC, samt elektroniska komponenter</p>	on 23/1, 13-15, ES51	<a href="#">ladda hem</a>
S1	<p><b>SPICE-övning 1 / Nätanalys och grundläggande simulering:</b>            Obligatoriska förberedelser inför övningen är följande:            + Läs igenom SPICE-övning 1            + Gör Uppgift 1.3.3            + Gör Uppgift 1.5.3(a)-(e)</p>	on 23/1, 15-19 (handledning 15-17) Digitallabbet 4220(*)	
R1	<p><b>Räkneövning 1:</b>            Repetition, bl.a. uppgift K7(a) i examinatorns övningsuppgifter</p>	fr 25/1, 10-12, ES51	

Lägg in schemat i din elektroniska kalender/papperskalender!

# Elektronikens framväxt

## **FÖRE ELEKTRONIKEN ...**

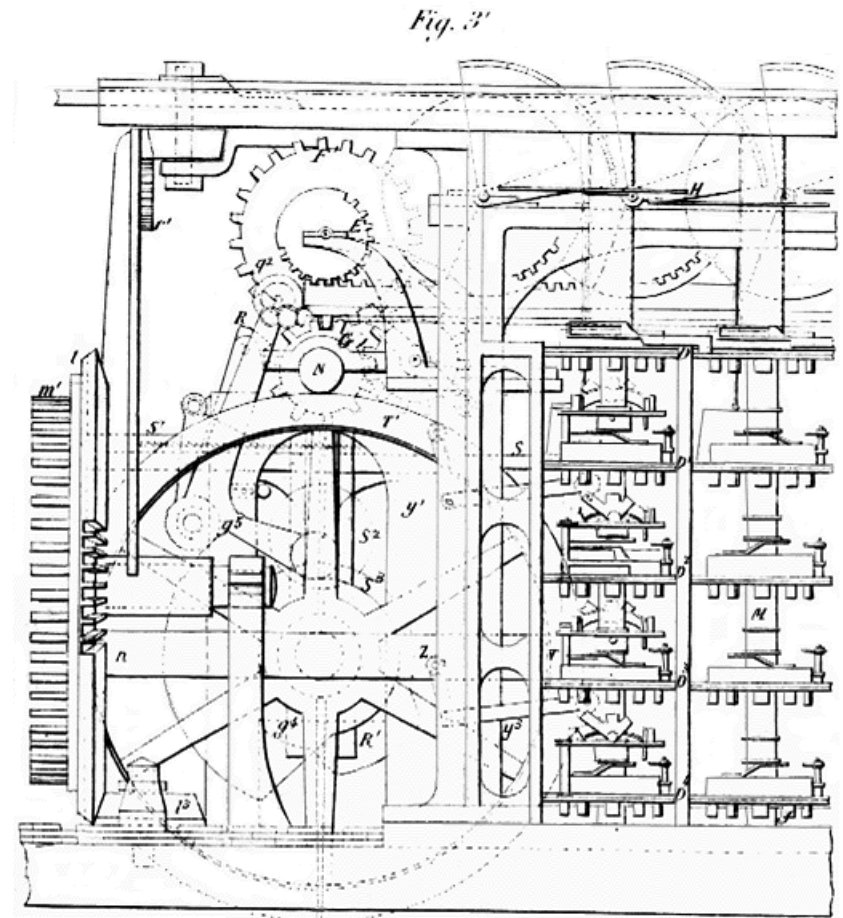
- 1642 - Pascal utvecklar en mekanisk aritmetisk maskin för ADD & SUB
- 1671 - von Leibniz utvecklar en mekanisk aritmetisk maskin för MULT & DIV
- 1822 - Babbage föreslår differensmaskinen
- 1844 - Morse sänder ett meddelande 50 miles med en telegraf
- 1854 - Boole skriver "An Investigation of the Laws of Thought"
- 1865 - Loomis överför en puls via två drakar
- 1876 - Bell visar upp telefonen
- 1878 - Edison arbetar med elektriskt ljus
- 1888 - Hertz visar att gnistor genererar elektromagnetiska vågor



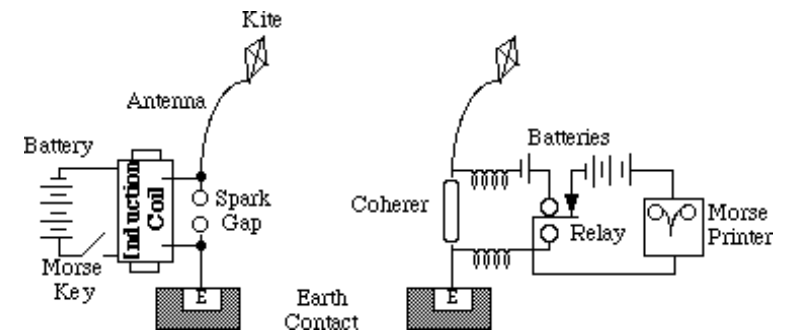
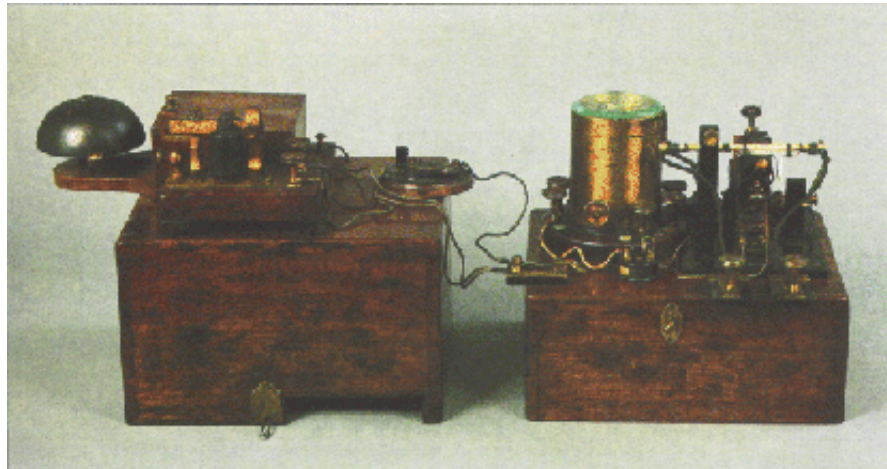
## VÄRLDENS FÖRSTA DATOR VAR SVENSK

Georg Scheutz och sonen Edward byggde Babbages differensmaskin som de första i världen, 1853. Idag finns en sådan att beskåda på the Smithsonian i USA.

Signifikansen i bygget är stor, då Babbage är den förste som tänkte på att kombinera data (kalkylator) och kontroll (vävstolar) = dator.

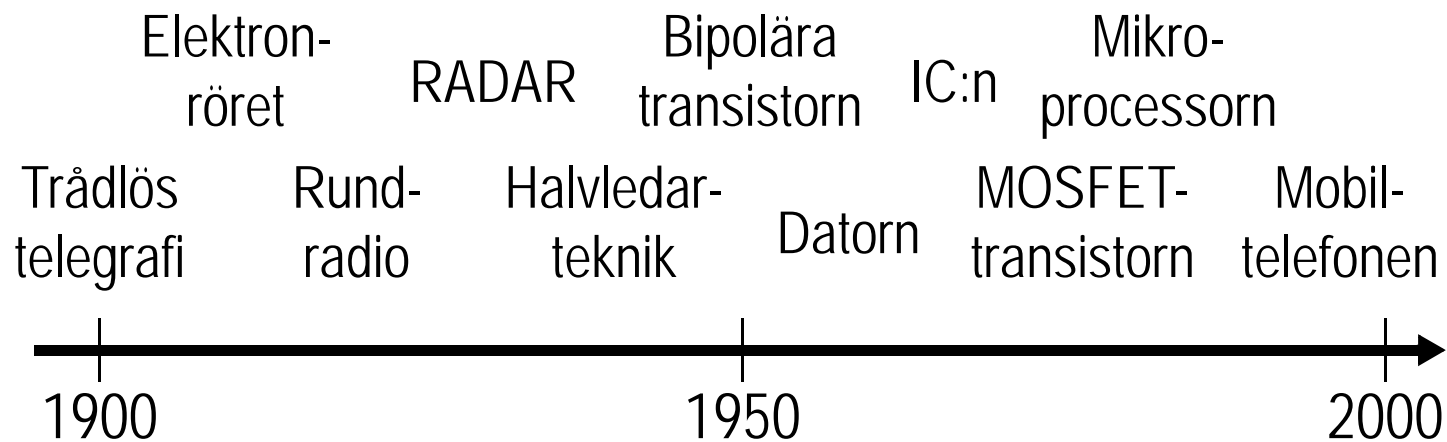


# ELEKTRONIK



Marconis trådlösa telegraf från 1895

# 1900-TALET'S UTVECKLING



# DEN TRÅDLÖSA REVOLUTIONEN

1895

Marconi demonstrerar trådlös telegrafi på sin fars ägor utanför Bologna

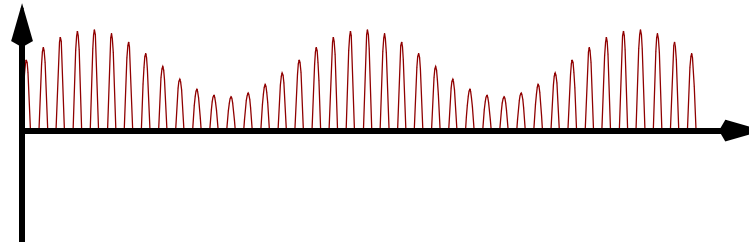
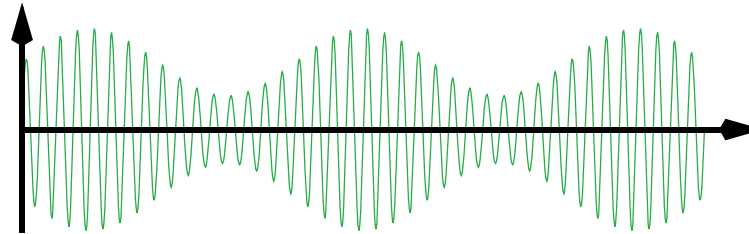
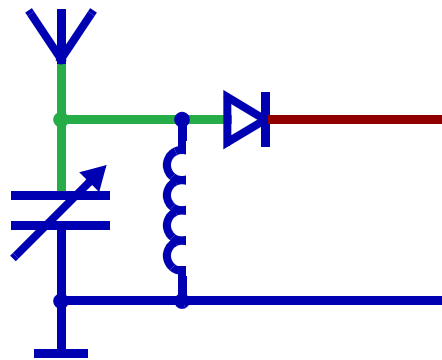
1901

Marconi sänder bokstaven S tvärs över Atlanten

1912

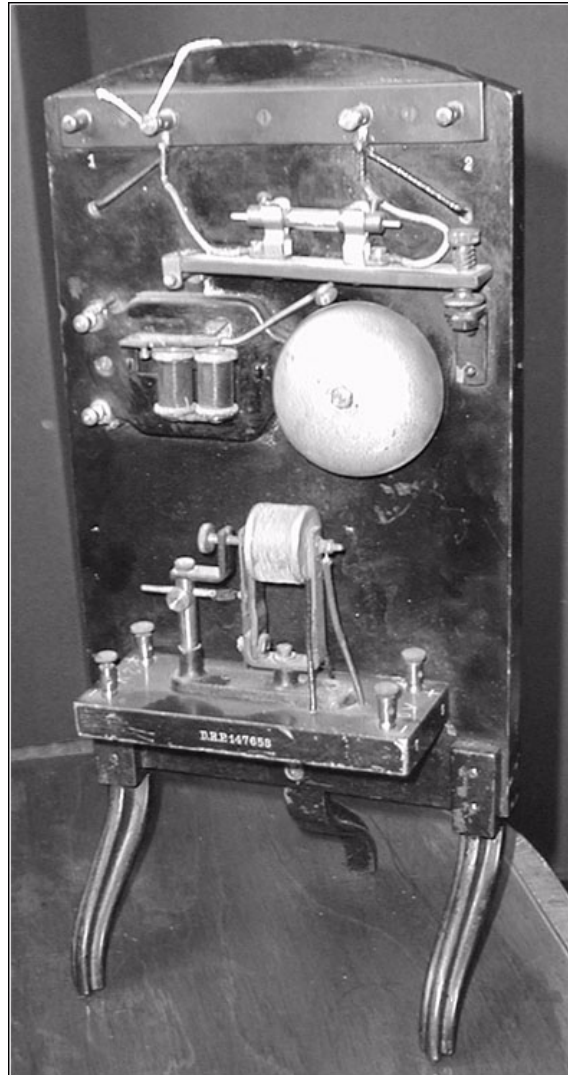
Titanic går under - telegrafistens SOS räddar 700 människor

# HUR DETEKTERAR MAN EN RADIOSIGNAL?



Kristallmottagaren

# KOHÄRERN SOM DETEKTOR



## JAKTEN PÅ BÄTTRE DETEKTORER

1874 - Likriktande verkan hos blyglans utreds (Braun)

1890 - Kohärern (Branly/Lodge)

1901 - Termisk elektronemission (Richardson)

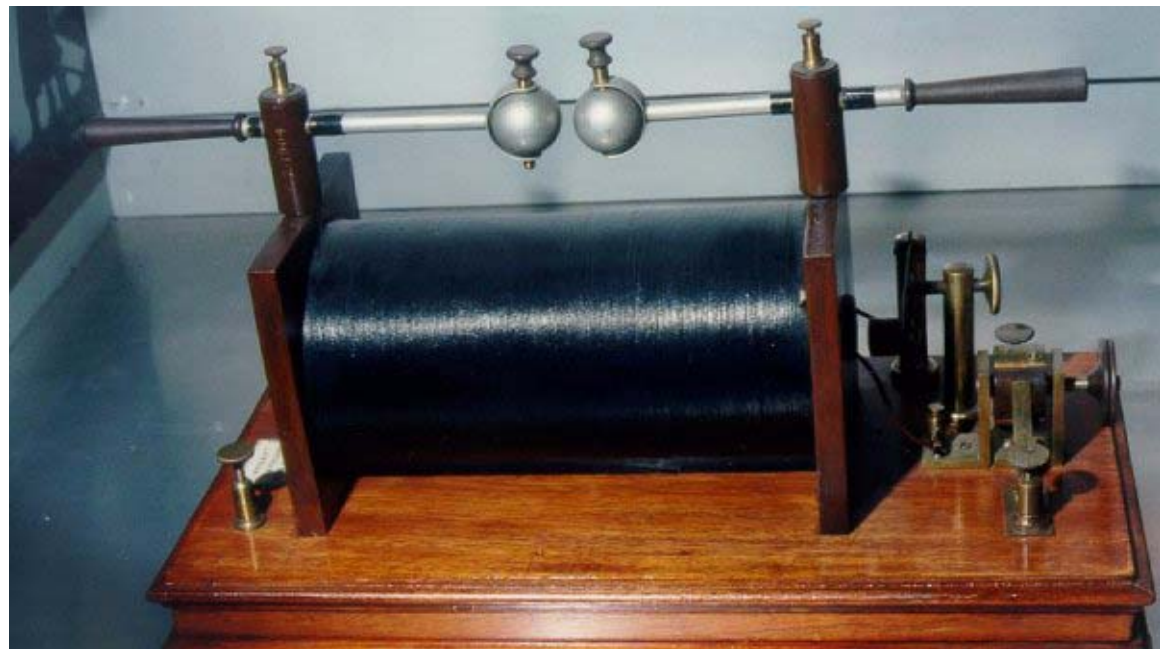
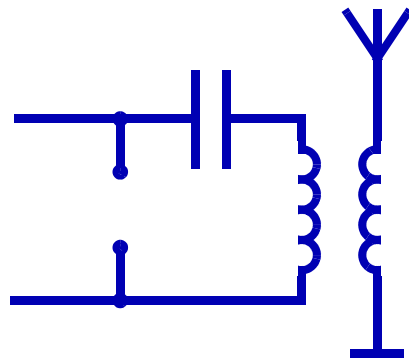
1904 - Elektrondioden (Fleming)  
(röret från Edison 1883)





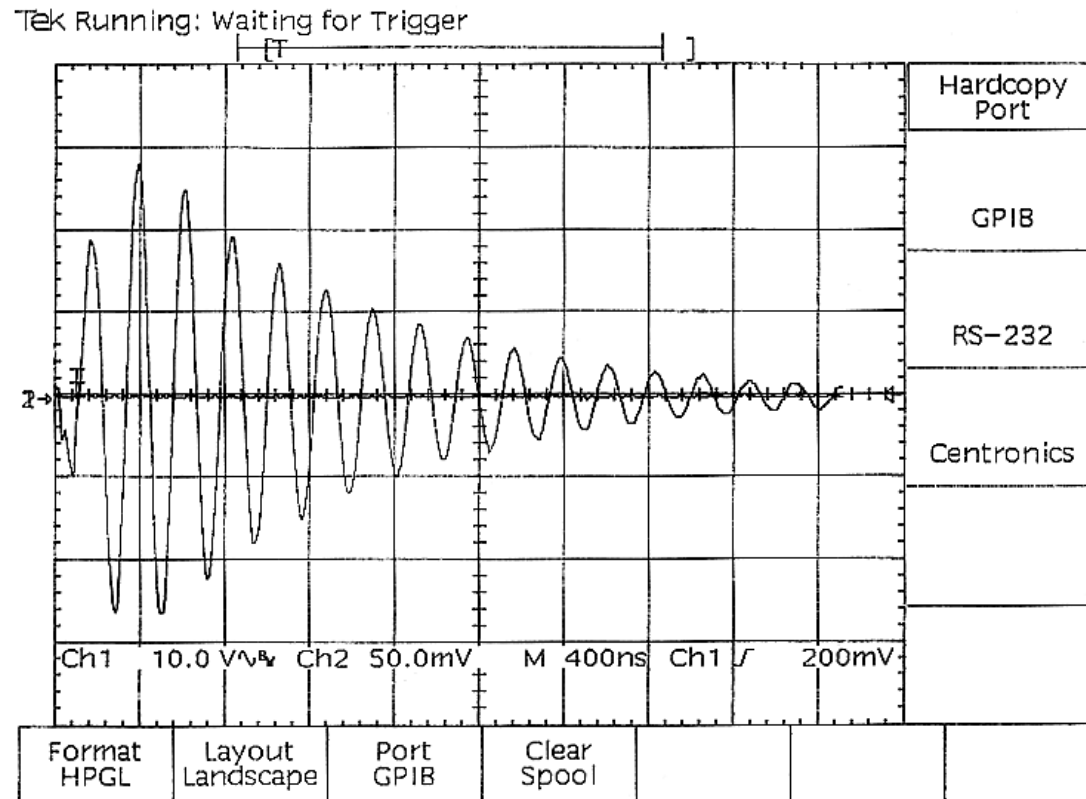
# HUR GENERERAR MAN EN RADIOSIGNAL?

Brauns gnistsändare





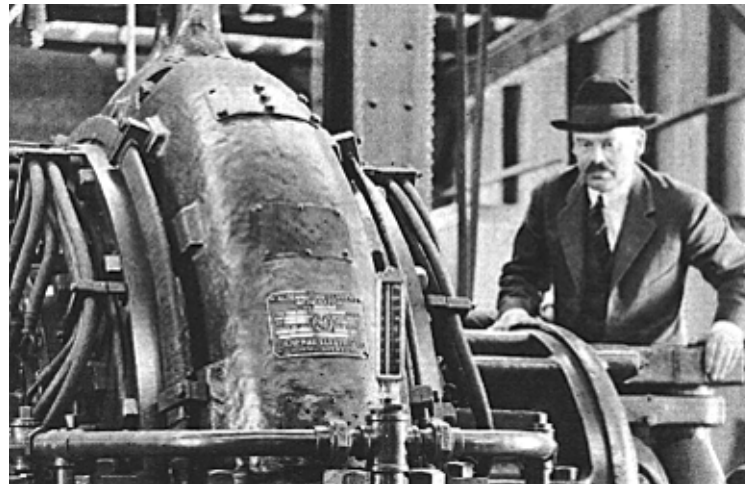
# SIGNALEN FRÅN EN GNISTSÄNDARE



## JAKTEN PÅ BÄTTRE OSCILLATORER

1905 - Elektrontrioden (von Lieben, senare de Forest)

- Växelströmgeneratorn (Ernst Alexanderson och Fessenden)



1912 - Kaskadkopplade trioder = grunden till förstärkare (de Forest)

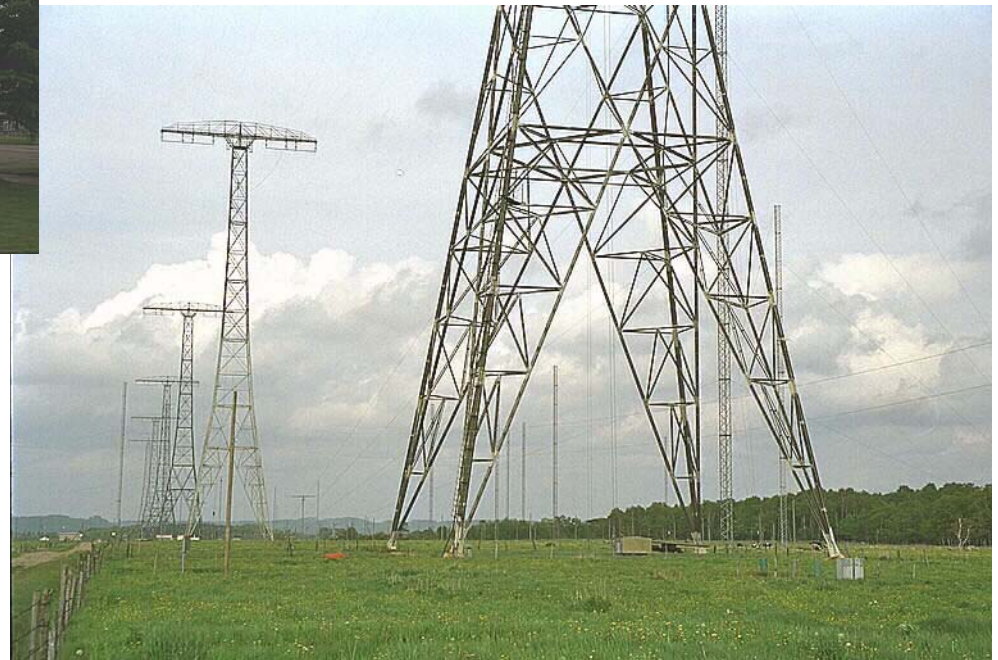
- Återkopplad triod = grunden till oscillering (Armstrong)

## RADIO OCH SVERIGE - GRIMETONSÄNDAREN



Grimetons LW-sändare från 1924,  
UNESCO världsarv 2004!

- ◆ 16,7 kHz = 18.000 m våglängd
- ◆ 200 kW sändareffekt
- ◆ 6 stycken 130 m höga torn
- ◆ Öppet vatten till New York



# RADIO OCH SVERIGE - MOTTAGARE

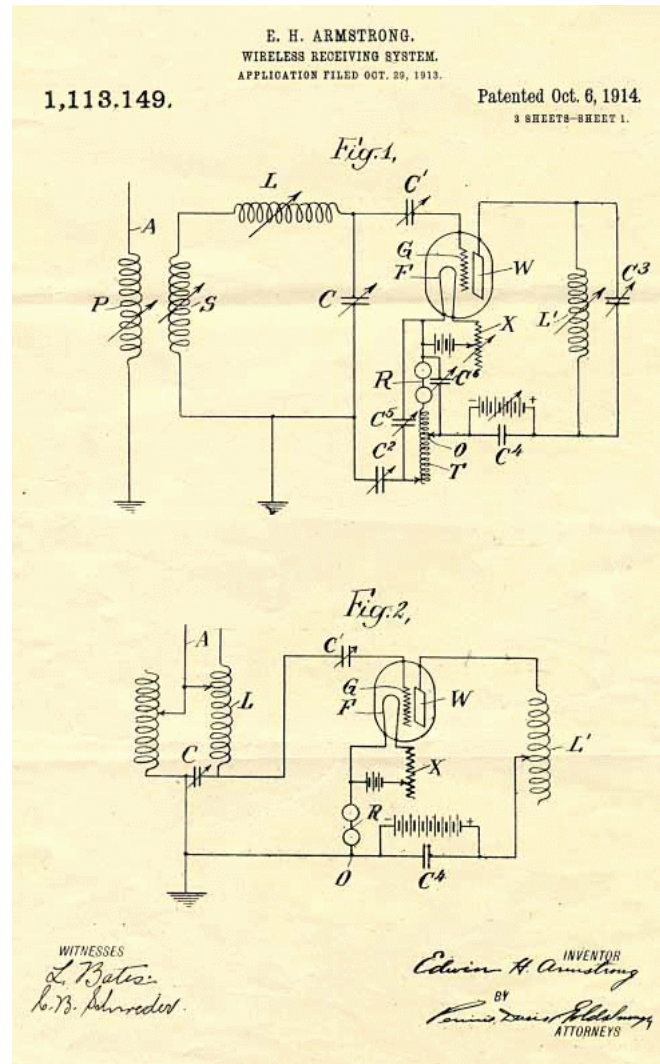


AGA-mottagare  
(1924)



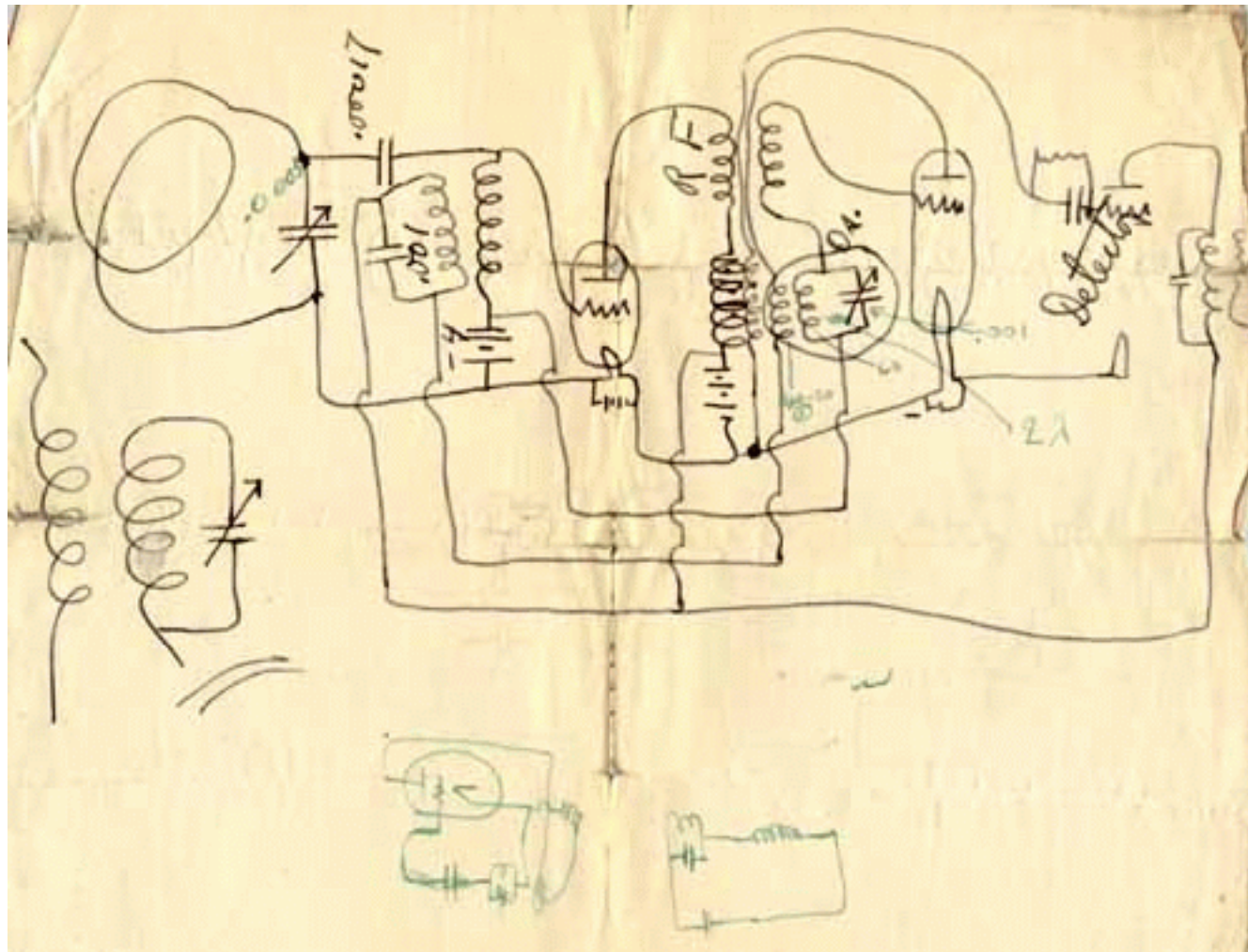
LM Ericsson-mottagare  
(1925)

# ELEKTRONISKA KRETSAR - ÅTERKOPPLINGEN





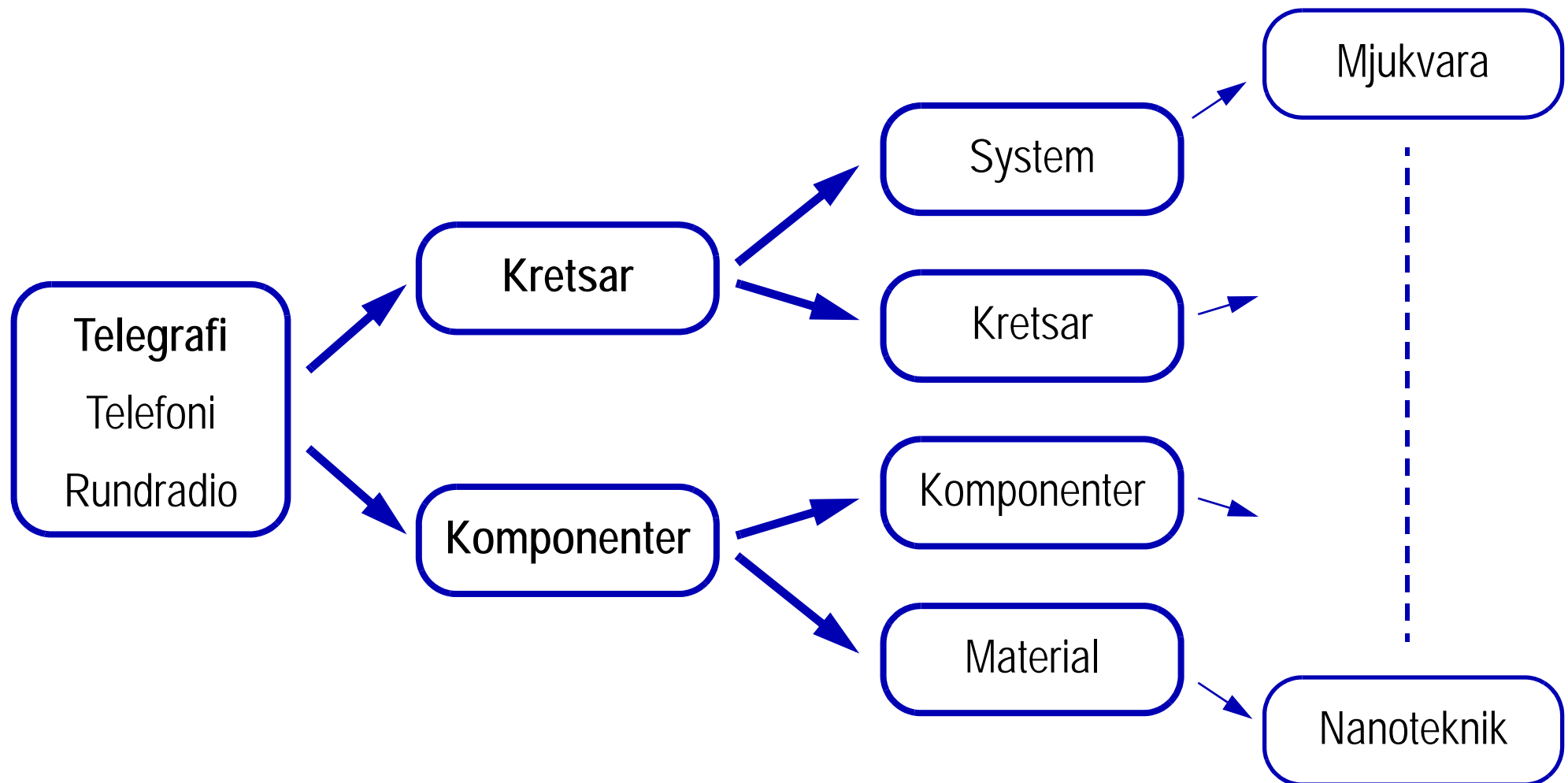
# ELEKTRONISKA KRETSAR - SUPERHETERODYNEN



## **SYSTEMEN I RADIOHISTORIEN**

- 1900 - Marconi utvecklar "tuning" med resonanskretsen (patent 7777)
- 1904 - Fessenden utvecklar heterodyn-principen
- 1912 - Armstrong utvecklar regenerations-tekniken (positiv återkoppling)
- 1920 - Armstrong tillkännager den första superheterodynen
- 1934 - Armstrong utvecklar frekvensmoduleringstekniken (FM)

## ETT INGENJÖRSOMRÅDE UTVECKLAS ...





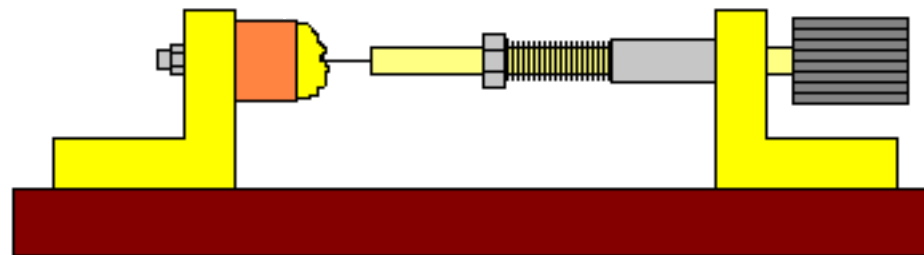
## **DEN DIGITALA HORIZONTEN**

- 1919 - Eccles och Jordan bygger den första vippan
- 1927 - Vannevar Bush @ MIT och den analoga datorn (differentialmaskinen)
- 1937 - Claude Shannon @ MIT föreslår "electric adder to the base two"
- 1941 - Konrad Zuse bygger Z3, en reläbaserad programmerbar logikmaskin
- 1943 - Colossus, UK, en reläbaserad programmerbar logikmaskin
- 1944 - Harvard Mark I, USA, en reläbaserad programmerbar logikmaskin
- 1945 - ENIAC, USA, en rörbestyckad (18,000 rör) kalkylator
  - Von Neumann beskriver (First Draft) en dator med programminne
- 1948 - 'Baby'/Mark 1, UK, den första datorn med data- och programminne

## HALVLEDARE

1874 - Kristallens egenskaper kartläggs för första gången

1905 - Kristaller börjar användas i radiomottagare



1907 - Kisel föreslås användas som kristallmaterial

1937 - Förklaringen till kristallers beteende är strömnen! (Ohl vid Bell Labs)

## **JAKTEN PÅ ETT “FASTA TILLSTÅNDETS RÖR”**

1940 - pn-övergången upptäcks (Ohl)

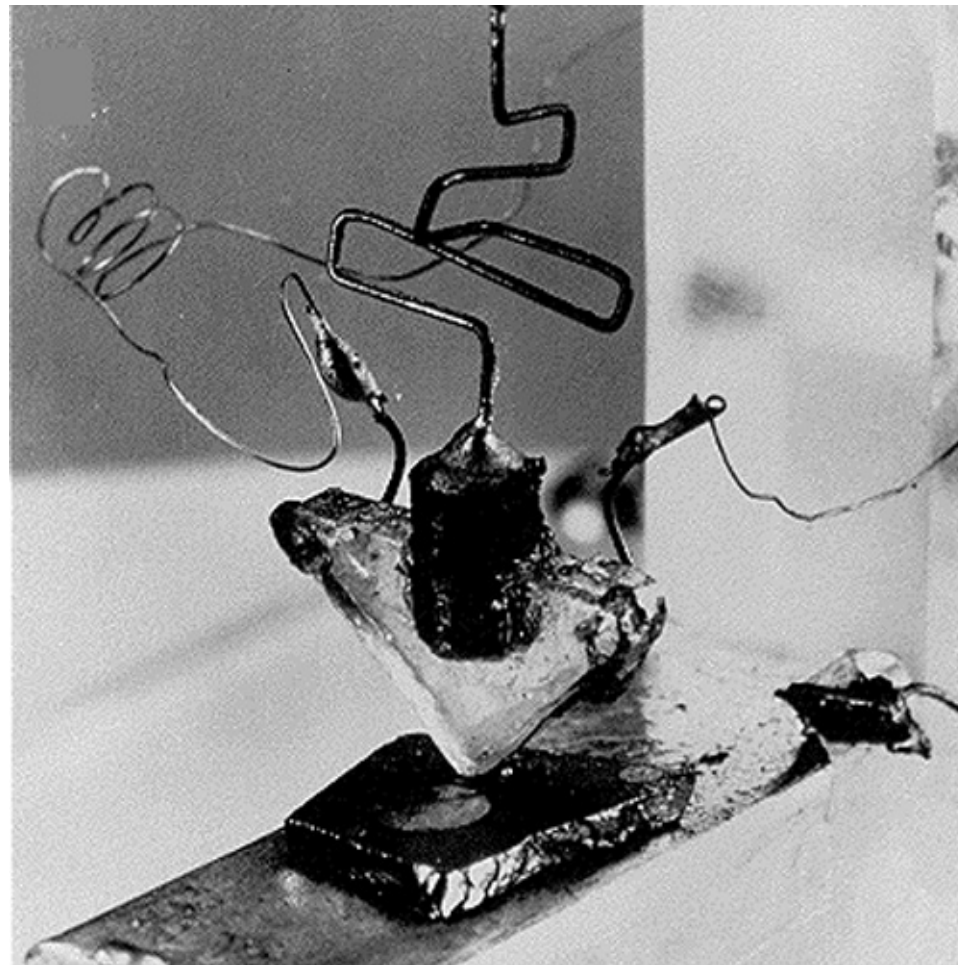
1945 - Bell drar igång en satsning på fasta tillståndets komponenter.  
Försök att bygga fälteffektstransistorer (skisser från 1925) inleds.

1946 - Fälteffektstransistorerna fungerar inte :-)

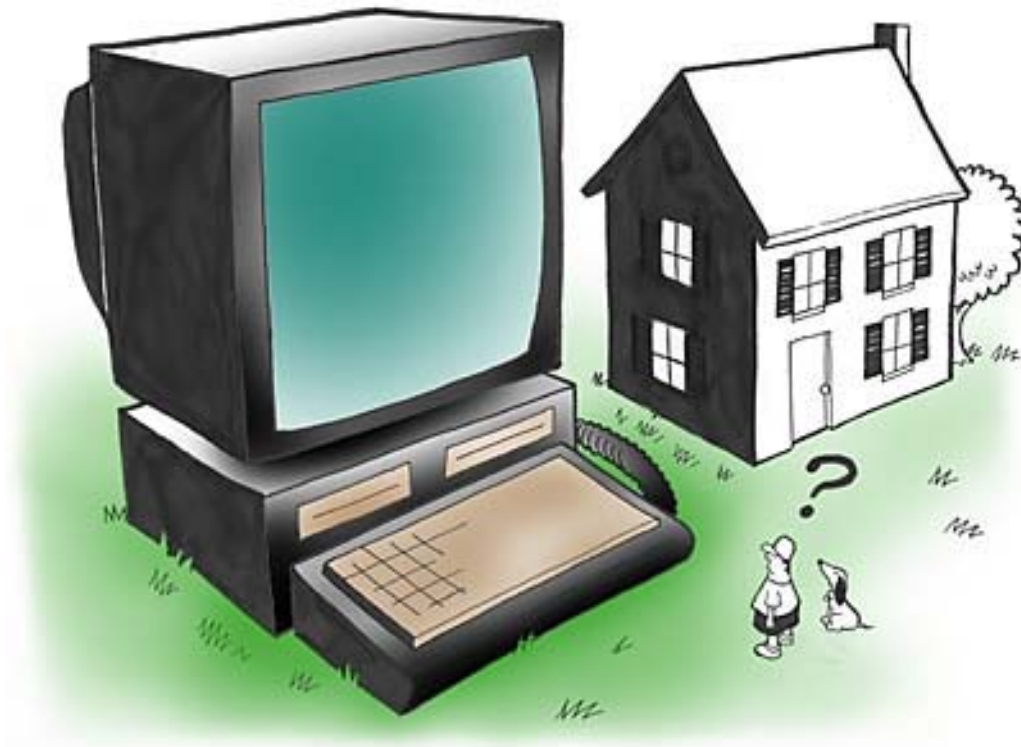
**John Bardeen anar att ytorna på materialen  
är orsaken till problemen  
och för att bekräfta hypotesen inleds tester**

.....

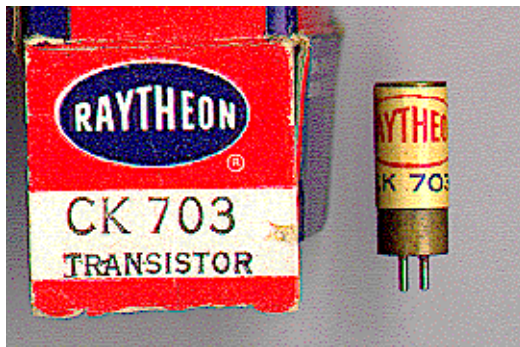
# EN TRANSISTOR ÄR FÖDD - 16 DECEMBER 1947



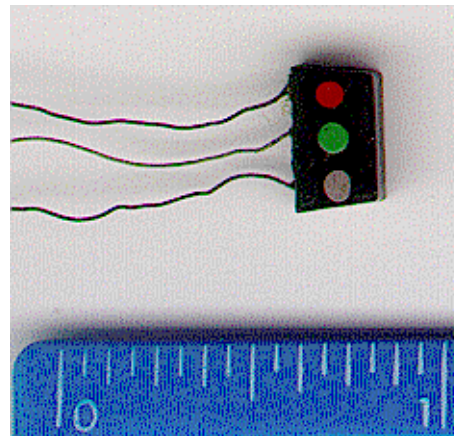
# TRANSISTORER ELLER RÖR?



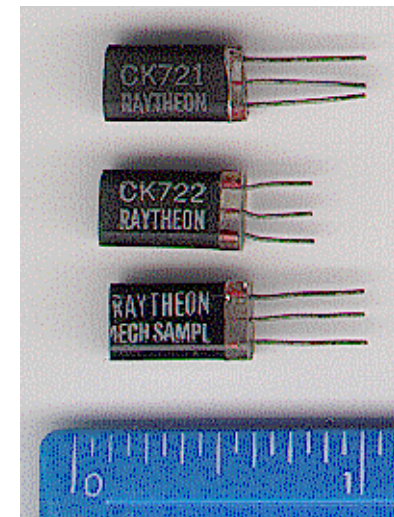
## NÅGRA TIDIGA TRANSISTORER



Raytheon CK703  
Spetstransistor: (1948)



Bell/WE M1752  
BJT: (1951)



Raytheon CK722  
BJT: (1953)

## DE FÖRSTA APPLIKATIONERNA

1950 - Hörapparater och telefonväxlar

1954 - Texas Instruments lanserar tillsammans med IDEA den första transistorradion Regency TR-1; priset var \$49.95

- IBM lanserar en transistorbaserad dator

1957 - Sony tar fram radion TR-63, den första storsäljaren

### Transistorpriser

1950 kostar en transistor **5 dollar** (> 200 kr i dagens penningvärde) stycket

1965 kostar en transistor **ett par cent** stycket

### Omsättning

1961 passerar halvledarbranschen 1 miljard dollar i intäkter

## **TRANSISTORN OCH SVERIGE - PACEMAKERN**

Den 8:e oktober 1958 inopererades den första pacemakern.  
Patienten, som då var 43 år, hette Arne Larsson.  
25 st pacemakerbyten senare, hela 86 år gammal,  
dog Arne Larsson i hudcancer.

Åke Senning och ingenjören Rune Elmqvist stod bakom denna svenska uppfinning som bl.a. bestod av två transistorer

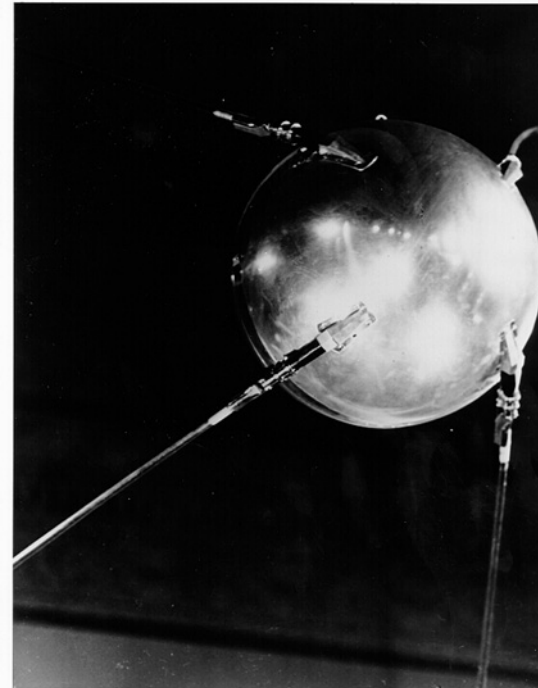




## MINIATYRISERING TILL VARJE PRIS - 1957



Hotet från **Japan**  
Sony TR-63 (mars 1957)



Hotet från **Sovjet**  
Sputnik 1 (oktober 1957)

## **STEGEN MOT DEN INTEGRERADE KRETSEN**

### **Texas Instruments**

1958 - Kilby "monterar" komponenter på en skiva germanium, Nobelpris 2000

### **Fairchild Semiconductors**

1956 - Shockley flyttar hem till Palo Alto och startar Shockley Semiconductor

1957 - Åtta forskare lämnar Shockleys företag och startar Fairchild

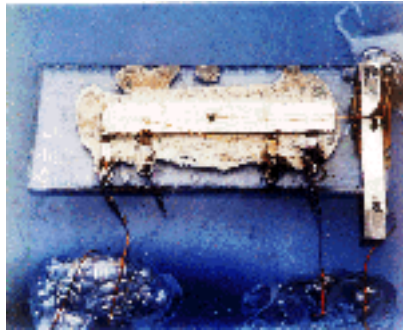
1958 - Hoerni utvecklar (kisel-)planarprocessen

1959 - Noyce lyckas med planarprocessen integrera även ledningar

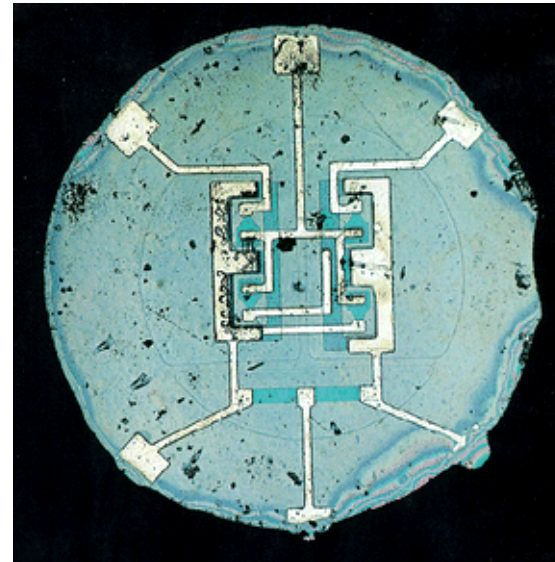
1962 - ICs är i volymproduktion vid TI och Fairchild

1963 - ICn gör entré i elektroniken i form av en hörapparat

# TIDIGA INTEGRERADE KRETSAR



Kilbys IC (en oscillator)  
(1958)



Fairchild IC: RTL logik  
(1961)

## **MOSFET ELLER BJT?**

1958 - Tszner i Frankrike utvecklar den första kommersiella FET:en (i Ge)

1960 - Kahng och Atalla; den första Metal Oxide Semiconductor-transistor i kisel

1962 - Beeson och Ruegg utvecklar TTL för bipolär teknik (Bipolar Junction Trans.)

- Hofstein och Heiman vid RCA beskriver "Insulated Gate" FET:en (MOSFET)

**Mitten av 60-talet:** Transistorprinciper/processer tillgängliga för ICs

1966 - Dennard vid IBM uppfinner DRAM:et som bygger på 1 MOSFET per cell

**Slutet av 60:** DRAM driver på skalning av MOSFET:ar

**MOSFET-tekniken påbörjar sin dominans över bipolär teknik!**

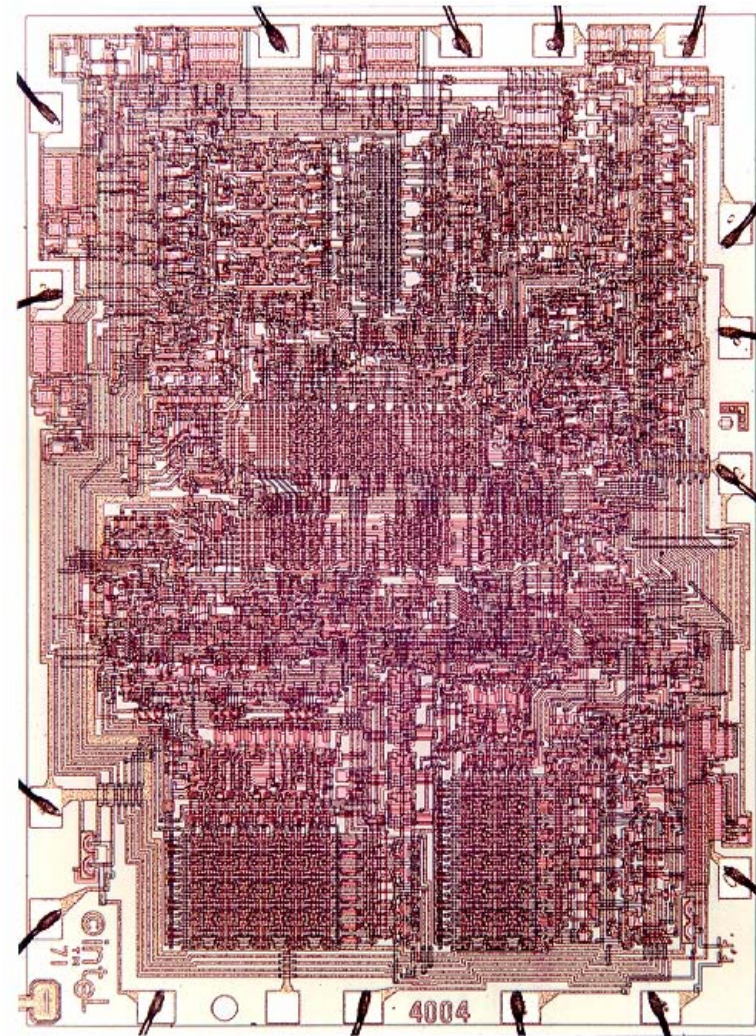
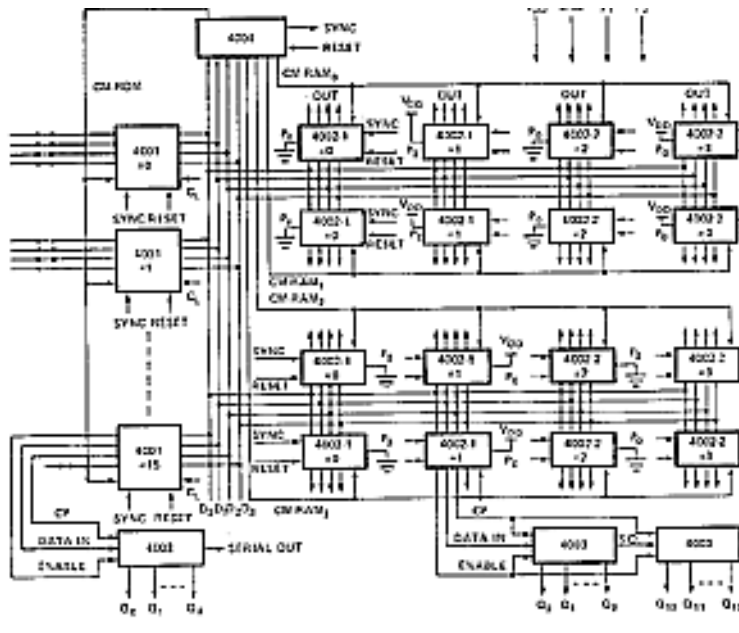
## **SAGAN OM INTEL**

- 1968 - Noyce och Moore lämnar Fairchild. Startar M&N Electronics (senare Intel)
- 1969 - Japanska företaget Busicom ber Intel utveckla ett 12-IC set till ny miniräknare, men Intel har inte råd att utveckla detta. Man antar ändå utmaningen, och som tur är uppfinnar Ted Hoff mikroprocessorn för att lösa problemen.
- 1971 - Efter att ha köpt tillbaka rätten till processorn från Busicom introducerar Intel 4004, den första mikroprocessorn. Denna innehåller 2300 stycken 10- $\mu\text{m}$  långa MOS-transistorer!

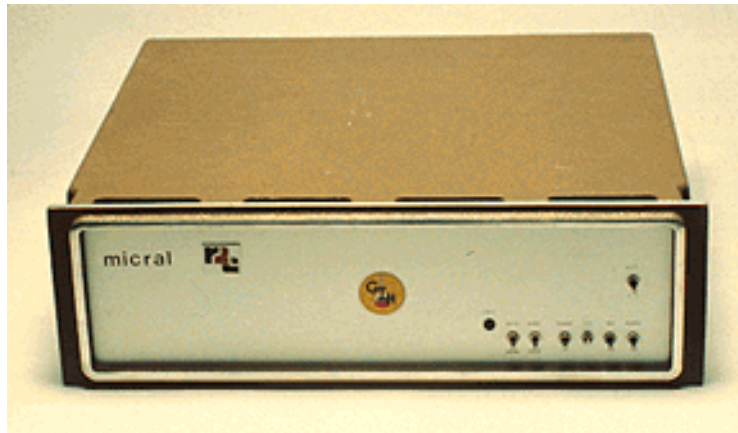
**Eran för MOSFET:ar och mikroprocessorer är inledd**



# INTEL 4004 (108kHz/0,06MIPS) - 1971



# DE FÖRSTA PERSONDATORERNA MED $\mu$ P



Mical; 1973  
(8008, 200kHz, 3500T, 10 $\mu$ )

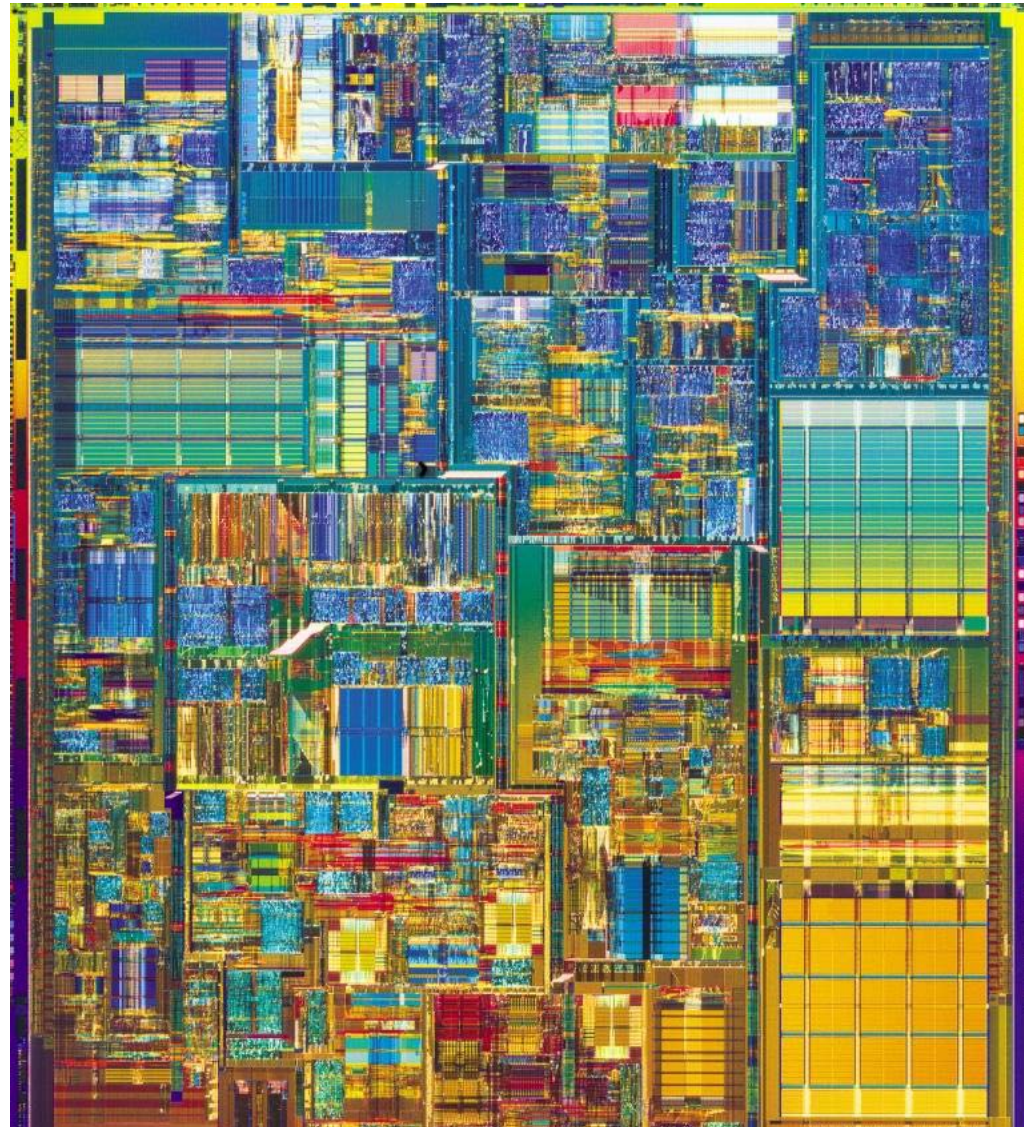


MITS Altair 8800; 1974  
(8080, 2MHz, 6000T, 6 $\mu$ )



## PENTIUM 4

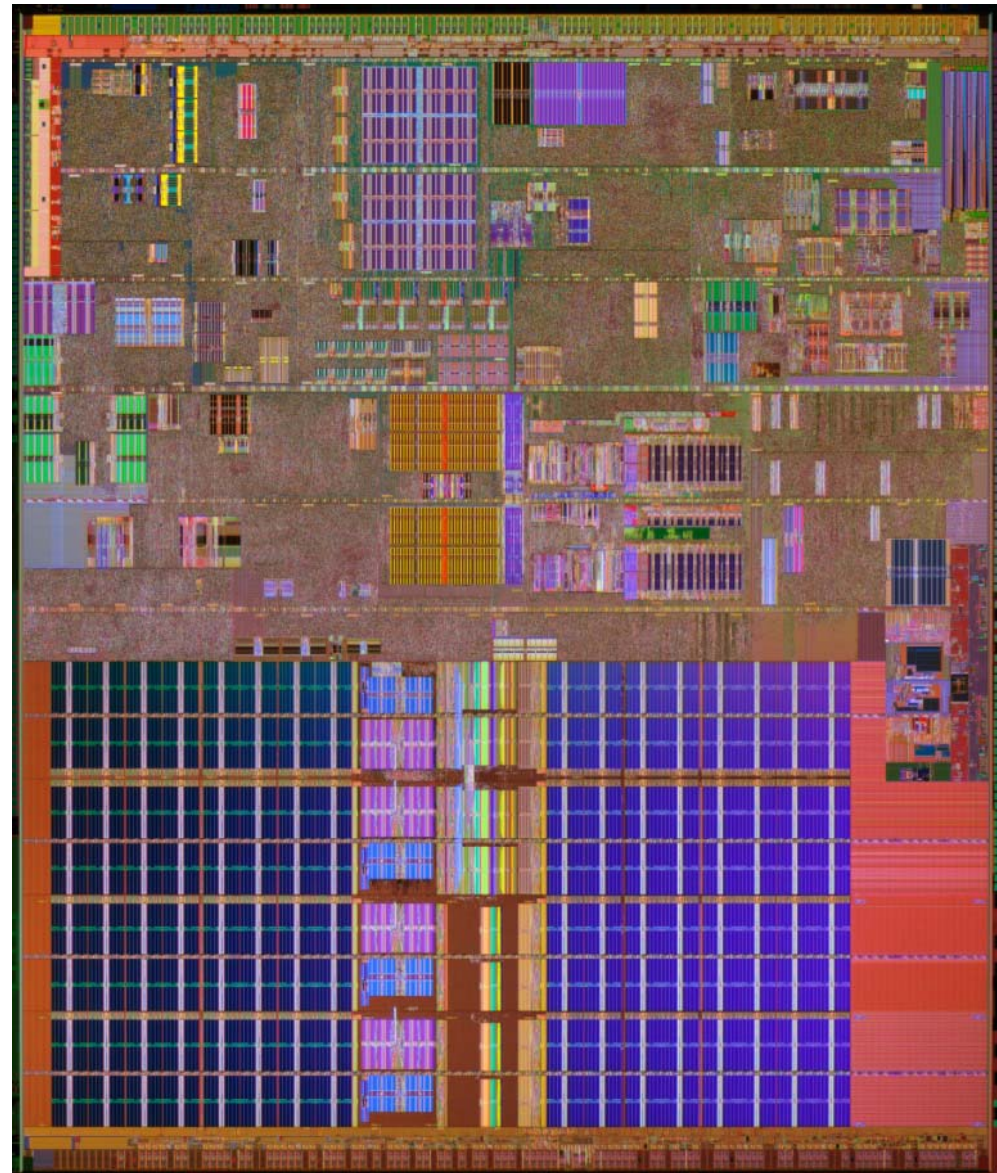
- ◆ 42 miljoner transistorer
- ◆  $L = 0,18\mu\text{m}$
- ◆ 2000





## P4 (6xx)

- ◆ 170 000 000 transistorer  
(2MB L2 cache)
- ◆ L = 90 nm
- ◆ Chipyta = 135 mm<sup>2</sup>  
(10,7 x 12,6 mm)
- ◆ Clockfrekvens = 3,73 GHz  
(extreme edition)
- ◆ 2005

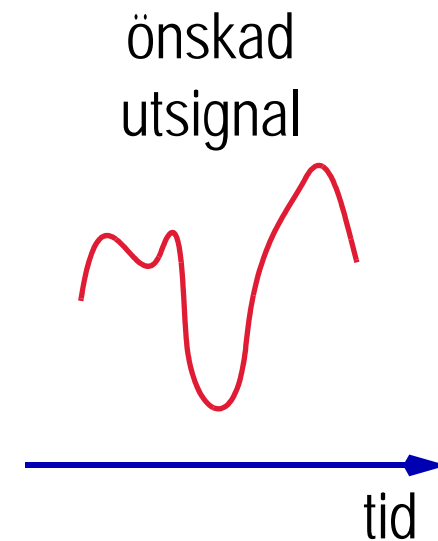
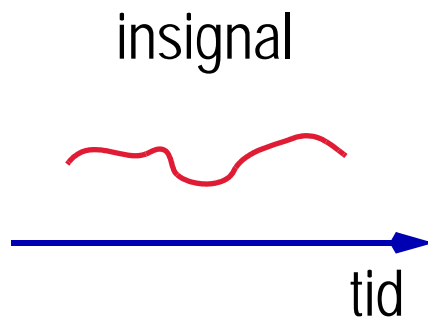


# **Repetition: Elektronikens kärna — förstärkaren (kika lite i kap 1)**

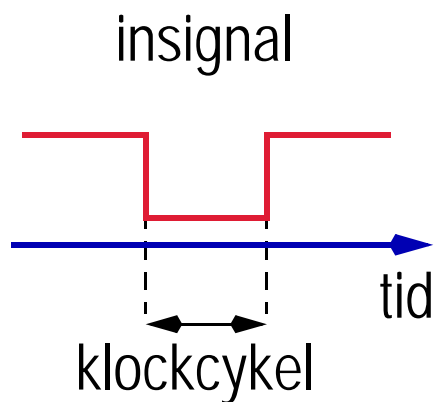
# FÖRSTÄRKNING

## Princip

Vi vill förstärka en  
signals amplitud så att  
den blir större  
(på något sätt: / eller  $\setminus$ )

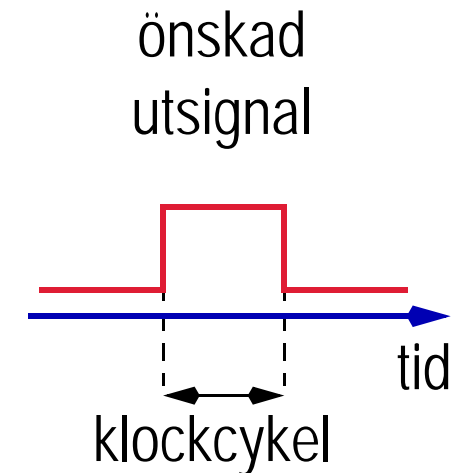


# FÖRSTÄRKNING - INTE BARA ANALOGT!

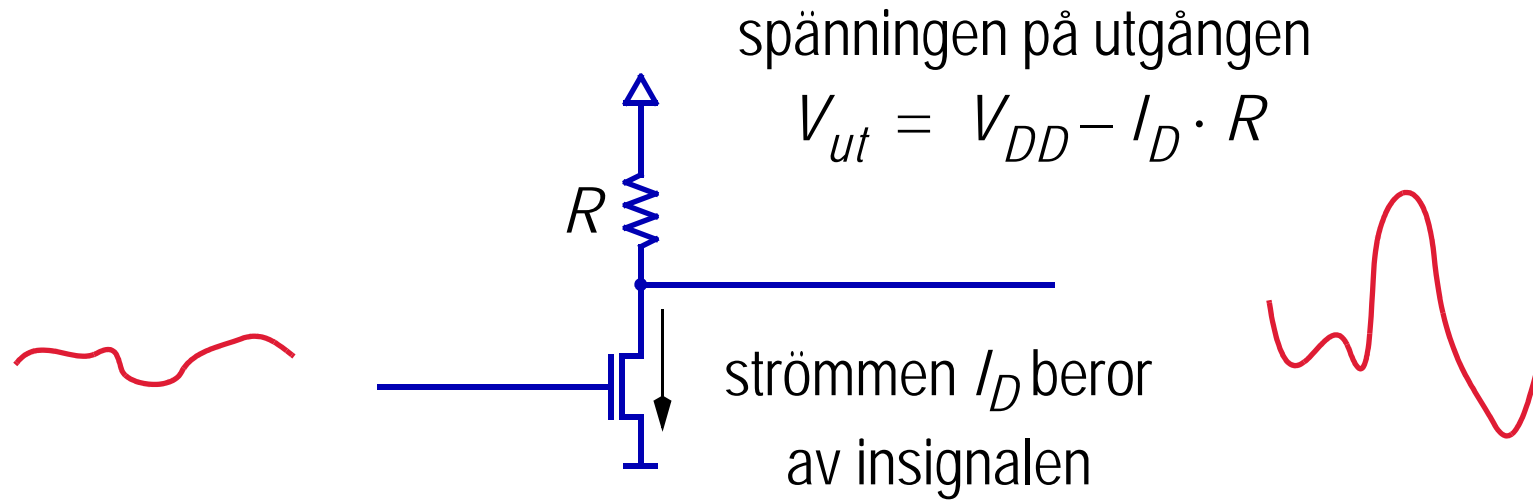


Vi vill utvärdera en logisk ingångsfunktion och skapa en utgångsfunktion:

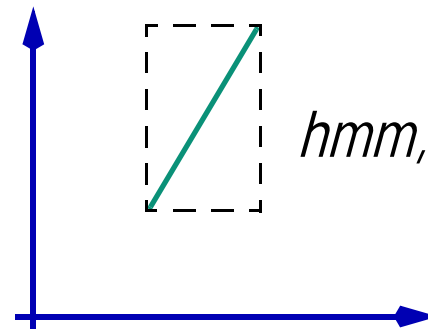
detta kräver förstärkning, även om den senare råkar vara (-)1



# FÖRSTÄRKARSTEGET



utsignal

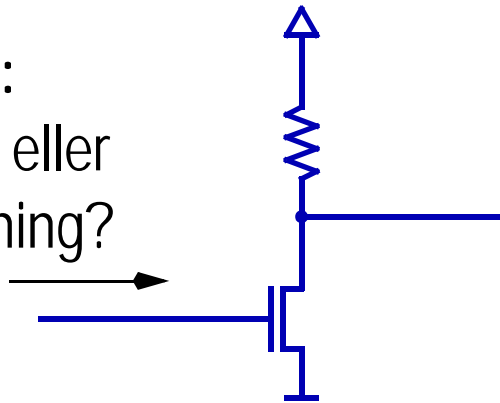


en linjär överföringskaraktistik  
*hmm, stämmer lutningen med kretsen ovan?*

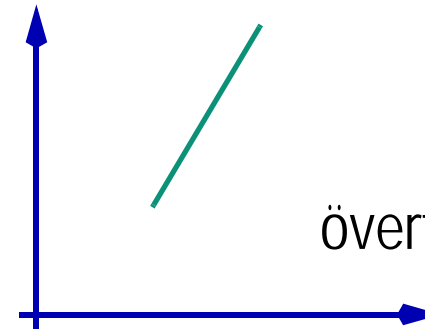
insignal

# AXPLOCK AV FRÅGOR VID FÖRSTÄRKARDESIGN

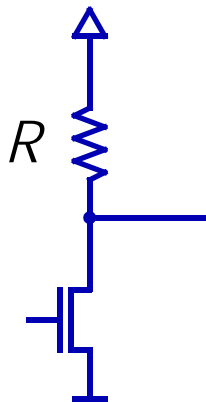
1:  
ström eller  
spänning?



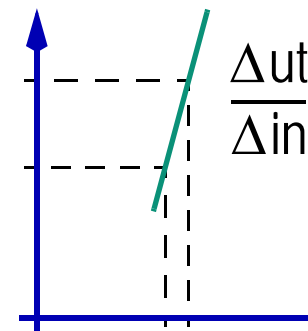
3:  
hur får man  
till en linjär  
överföringsfunktion?



2:  
stort eller litet  $R$ ?



utsignal



4:  
hur får man  
till en brant  
överföringsfunktion?  
(= stor förstärkning)

insignal

## **NÄTANALYS OCH KOMPONENTER**

- ◆ För att kunna bygga en krets som förstärker måste vi kunna analysera den, så vi kan beskriva prestanda:
  1. Vi måste kunna lite nätanalys, d.v.s. förstå det som händer när man sammankopplar diverse elektroniska komponenter med spännings- och strömkällor
    - Vilka likströmmar/likspänningar uppstår (kallas arbetspunkt!) i en krets?
    - Hur påverkar arbetspunkten de växelströmmar/växelspänningar som framkallas när signalen kopplas till kretsen?
  2. Vi måste förstå hur de ingående elektroniska komponenterna fungerar, annars blir det svårt att göra en nätanalys
    - Om man vet hur komponenterna fungerar, kan man använda rätt modeller för att representera dem i nätanalysen.

# **Repetition: Nätanalys för DC**

(kika lite i S&S4 3.4/S&S5 3.3)



---

## **NÄTANALYS (REP: ELEKTRISKA KRETSAR OCH FÄLT)**

- ◆ Nätanalys av linjära frekvensoberoende komponenter:  $R$
- ◆ Nätanalys av linjära men frekvensberoende komponenter:  $C$  och  $L$
- ◆ Nätanalys av ickelinjära och frekvensberoende komponenter:  
Dioder och transistorer

### **Nätanalys för DC:**

- ◆ Resistanser är  $R$
- ◆ Kapacitanser är avbrott
- ◆ Induktanser är kortslutningar
- ◆ Halvledare (dioder och transistorer) är ... svårare

## ETT ELEKTRONISKT NÄT - EN KRETS

Frågan är:

- ◆ Vad är  $V$  och  $I$ ? (Stora bokstäver = DC-värden)

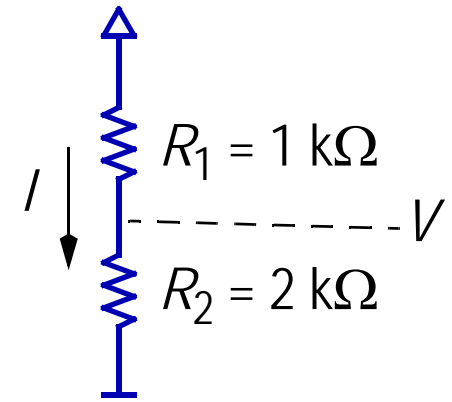
Svaret är:

1. Spänningskällan lägger  $V_{DD} = 3,3$  V över kretsen

2. Ohms lag:  $I = \frac{V_{DD}}{R_{tot}} = 1,1$  mA

3. Och  $V$  räknar vi ut (utgående från jord), som den potential högre än 0 V som krävs för att driva 1,1 mA genom 2 k $\Omega$ :

$$V = 0,0011 \cdot 2000 = 2,2$$
 V



Strömmar och spänningar i denna krets är konstanta:

Vi sysslar med DC nätanalys

## EN ANNAN ELEKTRONISK KRETS 1(3)

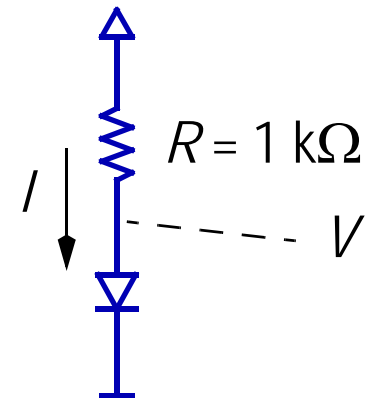
Frågan är densamma som på förra sidan; och  $V_{DD} = 3,3 \text{ V}$ .

1. Nu får vi problem: Vi har en diod i kretsen, d.v.s.  $V(I)$  är inte en linjär funktion!
2. Föregripande nästa föreläsning en aning, avslöjas nu att

för dioden gäller: 
$$I = I_0 \left( e^{\frac{V}{0,026}} - 1 \right)$$

3. Vi känner inte till  $I$  eller  $V$ . Bäst att finna en ekvation till, så vi har två ekvationer till två obekanta. Vad sägs om

$$I = \frac{V_{DD} - V}{R} ?$$



## EN ANNAN ELEKTRONISK KRETS 2(3)

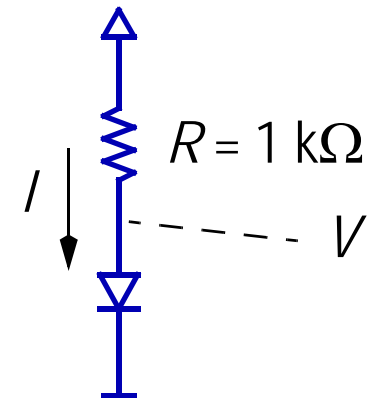
4. Vi måste nu lösa ekvationssystemet:

$$I = I_0 \left( e^{\frac{V}{0,026}} - 1 \right) \text{ och } I = \frac{V_{DD} - V}{R}$$

5. Anta  $I_0 = 10^{-9} \text{ A} = 1 \text{ nA}$ . Låt oss nu iterera oss fram med Newton-Raphsons metod  $\Rightarrow$

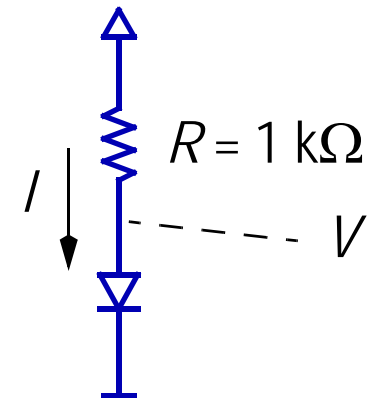
$$V_{n+1} = V_n - \frac{f(V_n)}{f'(V_n)}, \text{ där}$$

$$f(V_n) = \frac{V_{DD} - V_n}{R} - I_0 \left( e^{\frac{V_n}{0,026}} - 1 \right)$$



## EN ANNAN ELEKTRONISK KRETS 3(3)

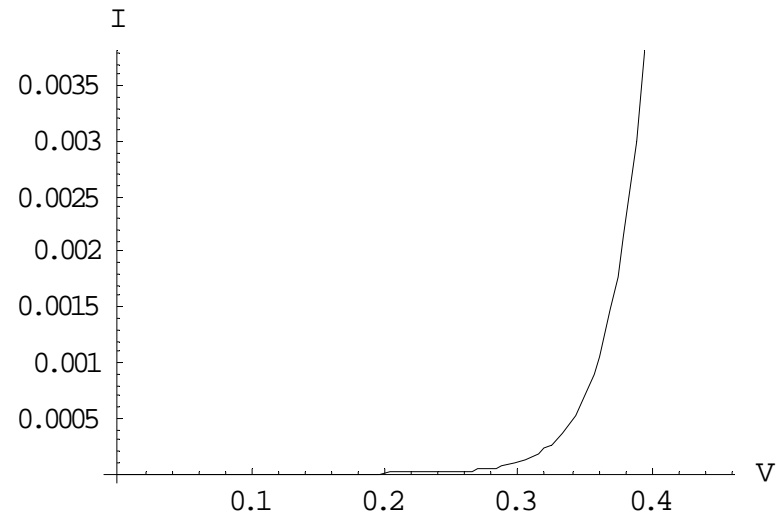
6. Med en bra gissning för  $V_0$ , typ  $V_0 = 0,35$  V, får jag följande iterationssekvens:  
 $0,35$  V  $\rightarrow$   $0,4303$  V  $\rightarrow$   $0,4092$  V  $\rightarrow$   $0,3942$  V  $\rightarrow$   
 $0,3879$  V  $\rightarrow$   $0,3870$  V  $\rightarrow$   $0,3870$  V. **STOPP!**
7. Alltså,  $V = 0,387$  V och därmed är  $I = 2,9$  mA



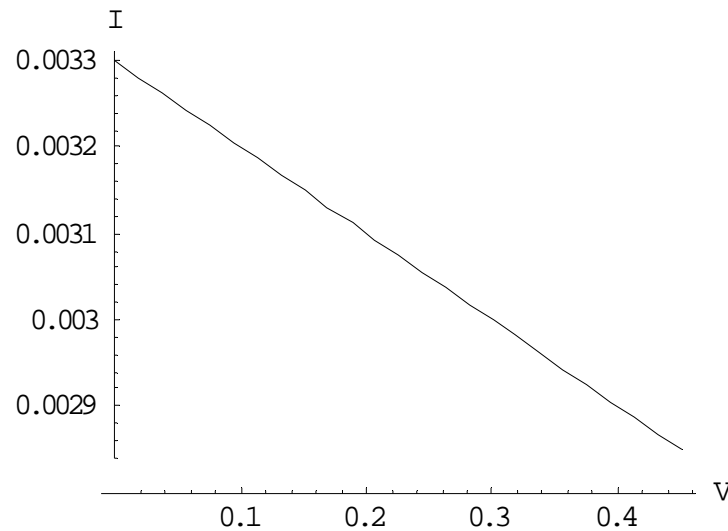
Det här var lite jobbigt, och därför brukar studenter (och lärare) inte protestera om man börjar diskutera grafiska lösningar

# GRAFISK LÖSNING FÖR DIODKRETSEN 1(2)

$$I = I_0 \left( e^{\frac{V}{0,026}} - 1 \right)$$



$$I = \frac{V_{DD} - V}{R}$$



$$V = 0$$

$$V = 3,3 \text{ V}$$

## GRAFISK LÖSNING FÖR DIODKRETSEN 2(2)

- ◆ Genom att hitta skärningspunkten mellan de två graferna hittar vi lösningen till vårt ekvationssystem
- ◆ Lösningen är arbetspunkten för kretsen, d.v.s. den likström och likspänning som finns i kretsen när alla eventuella dynamiska förlopp dött ut
- ◆ Från grafen ser vi att den numeriska lösningen,  $V = 0,387 \text{ V}$  och  $I = 2,9 \text{ mA}$ , ser ut att kunna stämma väl

