

EEM076 ELEKTRISKA KRETSAR OCH FÄLT

Föreläsning: Ledningar

Professor Per Larsson-Edefors
VLSI Research Group
Chalmers tekniska högskola

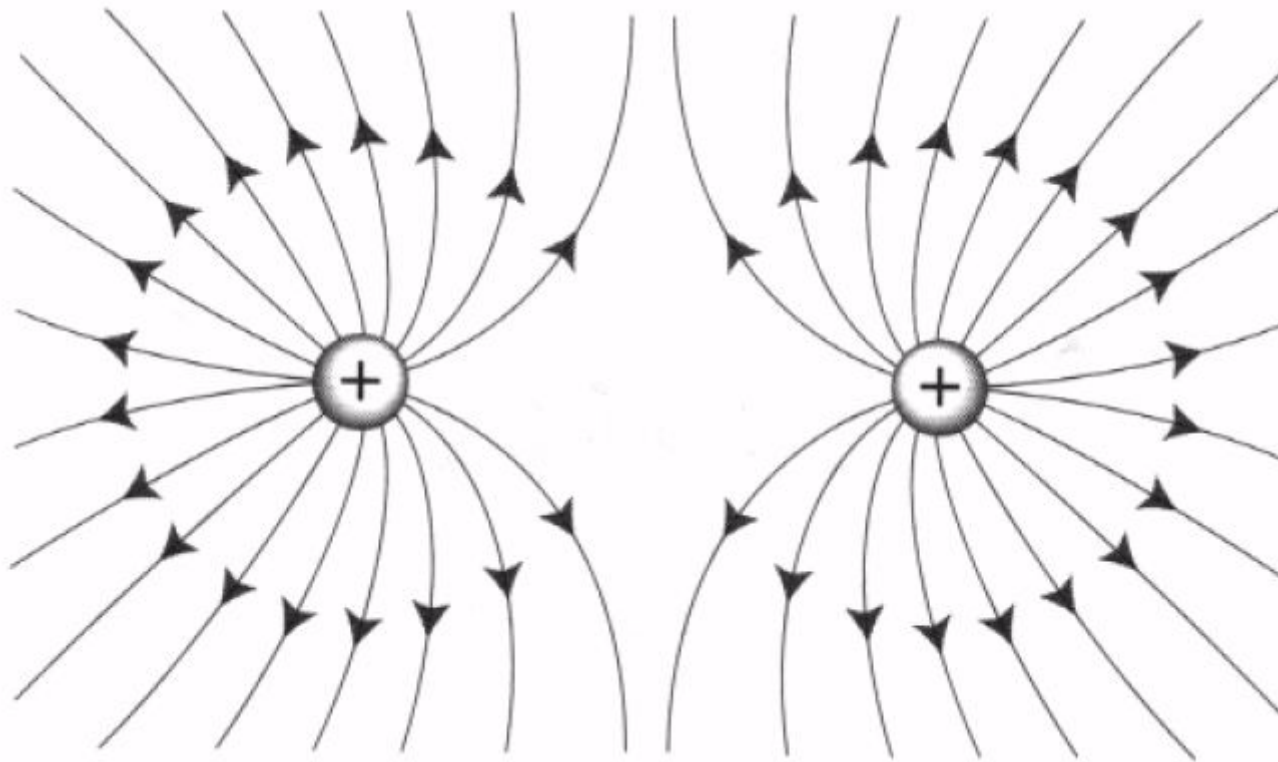
perla@chalmers.se

ELEKTRICITETSLÄRA

- ◆ ... handlar om elektriska och magnetiska fält $\Rightarrow$ elläran sysslar med mekanismer som verkar över både små och stora avstånd.
- ◆ ... beskriver påverkan/samverkan i liten skala (chips-ledningar ...) och stor skala (ett hus, en basstation, en låda och en telefon ...).
- ◆ ... är viktig för förståelse av elektriska egenskaper $\Rightarrow$ konstruktionsintuition.
- ◆ ... ger möjlighet att modellera vad som händer i en komponent, så att man kan göra nätanalys.

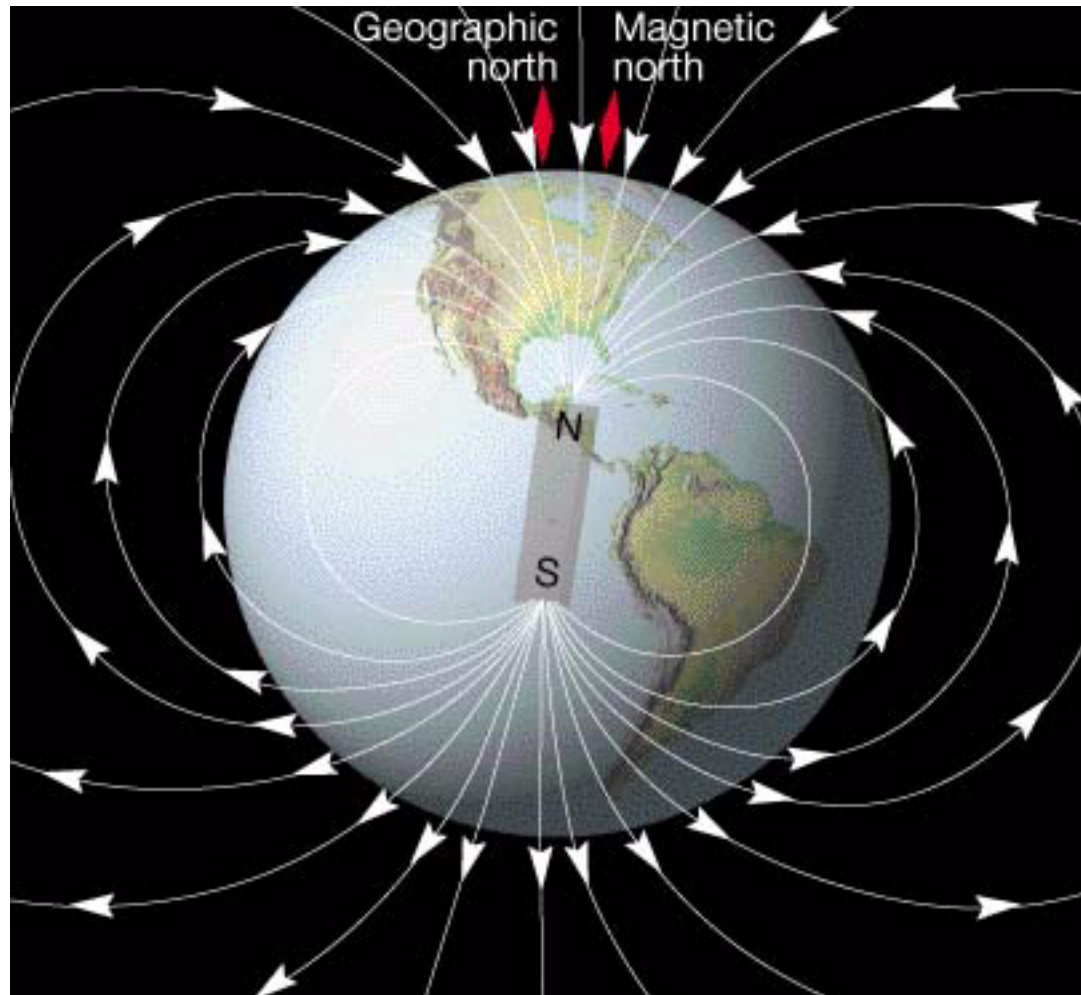
ELEKTRISKA FÄLTET (FÄLTSTYRKA)

E är det elektriska fältet som “uppstår från en punkt av laddning”.



MAGNETISKA FÄLTET (FÄLTSTYRKA)

B är det magnetiska fältet som “går runt i cirklar”.



MAXWELLS VEKTOR-EKVATIONER

1. $\nabla D = \rho$ ($\nabla E = \frac{\rho}{\epsilon_0}$) *“elektriska fält uppstår ur punkt av laddning”*

2. $\nabla B = 0$ *“magnetiska fält går runt i cirklar”*

3. $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$ *“varierande elektriskt fält ger upphov till magnetfält”*

Tänk elmagnet eller tänk på elallergiker.

4. $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$ *“varierande magnetiskt fält ger upphov till elektriskt fält”*

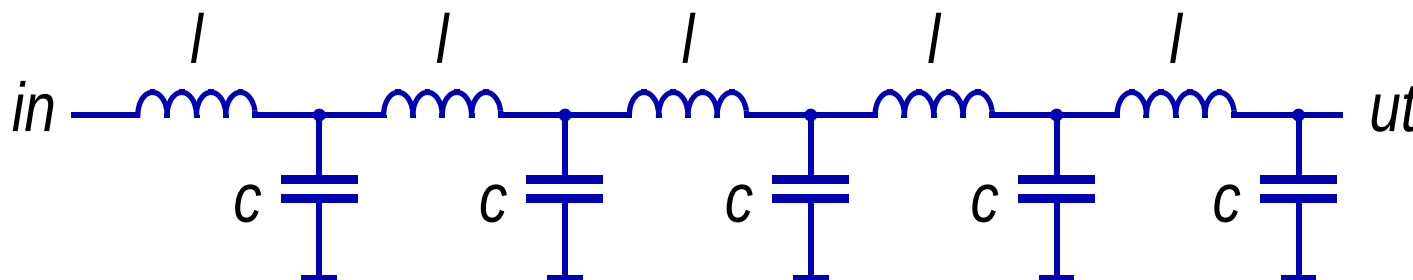
En generator!

FYSIK OCH ELEKTRONIK

$$\nabla D = \rho + \nabla B = 0 + \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} + \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$\Rightarrow$

Modeller för elektriska kretsar, som exempelvis en ledning ...



LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

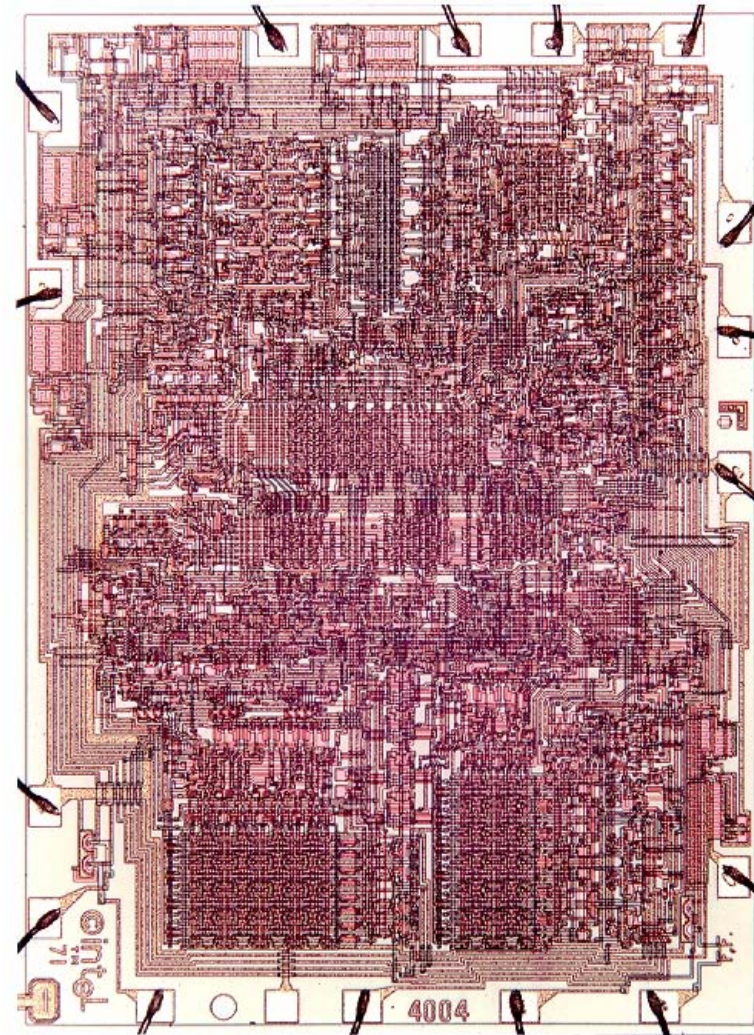
- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

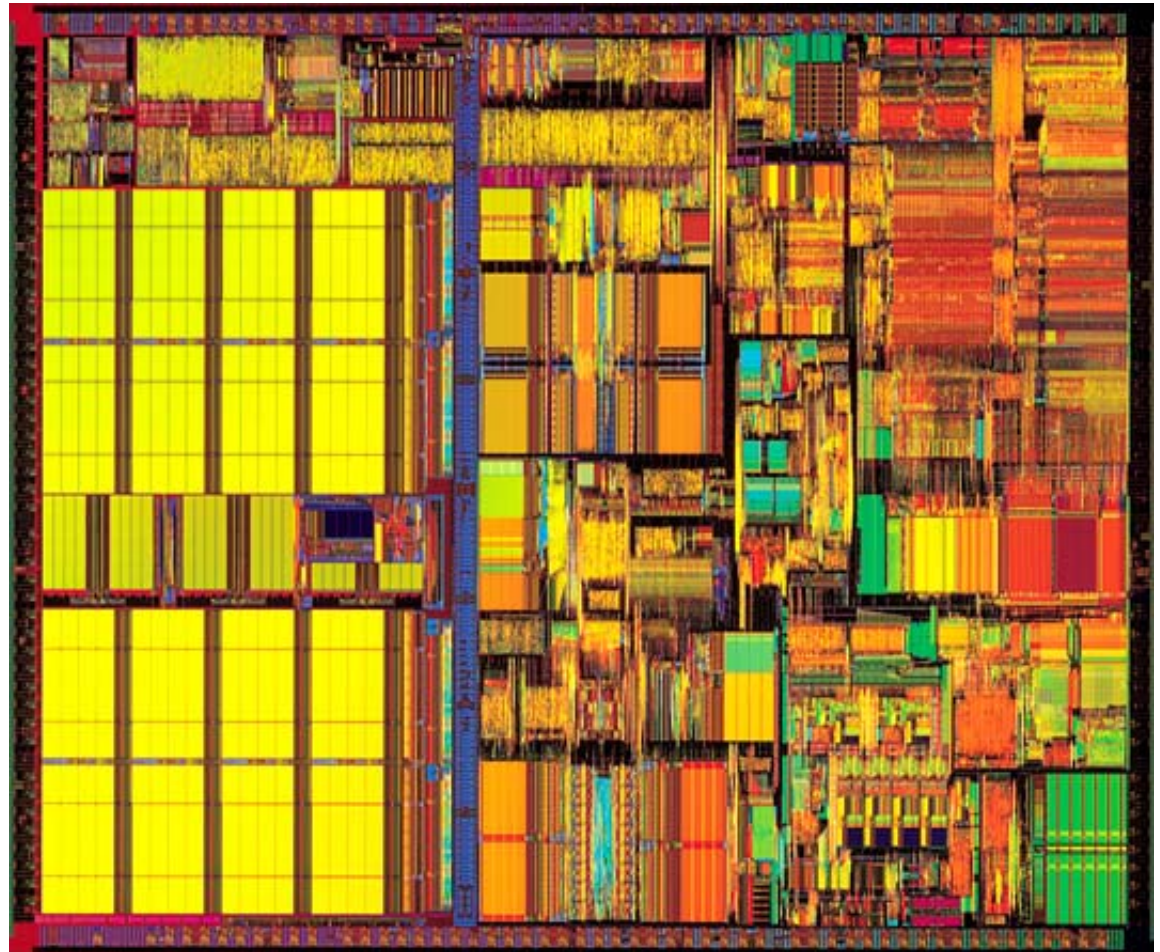
4004

- ◆ 2300 transistorer.
- ◆ $L = 10 \mu\text{m}$.
- ◆ $Y_{\text{ta}} = 13,5 \text{ mm}^2$.
- ◆ Frekvens = 0,108 MHz.
- ◆ januari 1971.



PENTIUM III

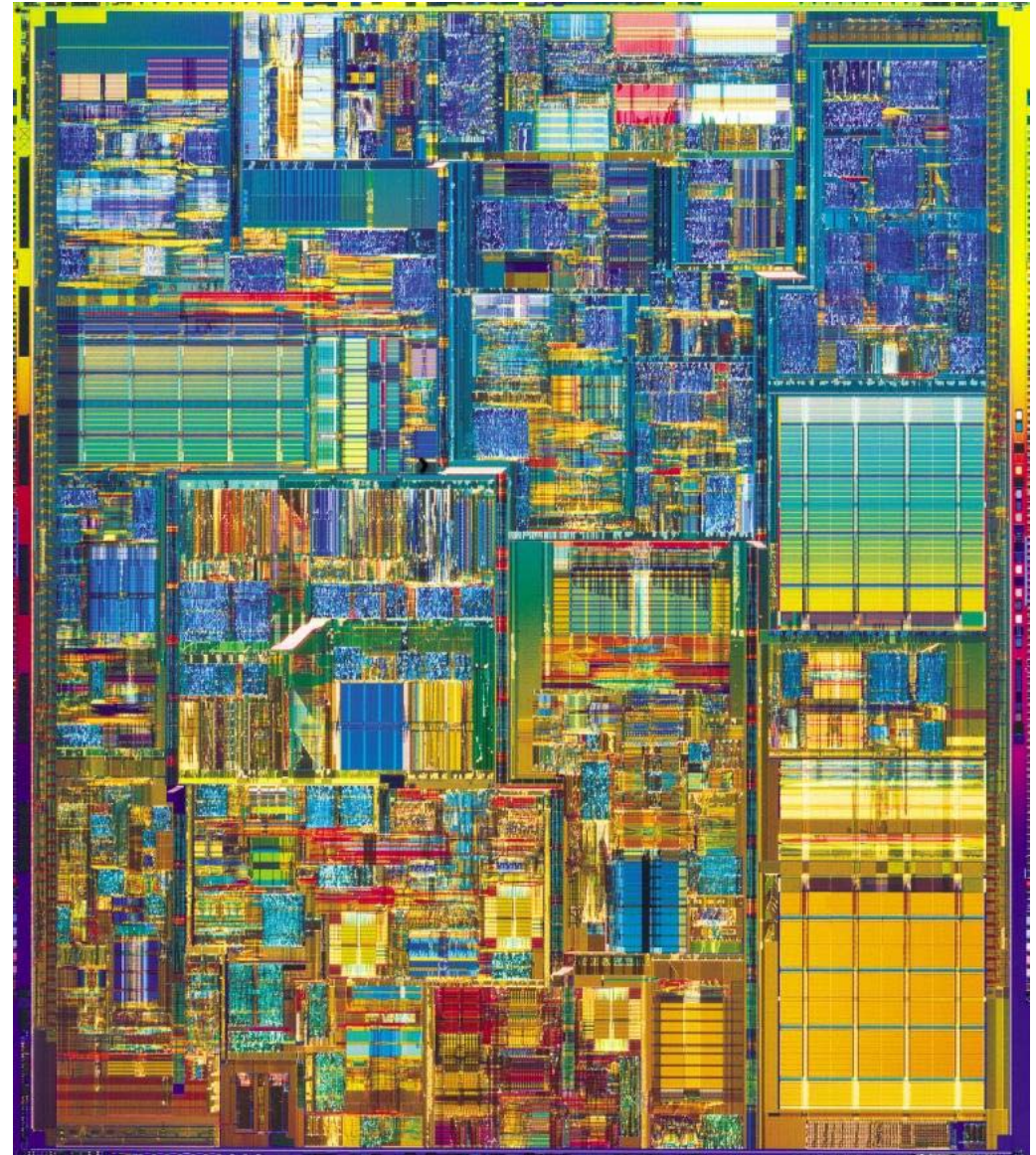
- ◆ 9,5 miljoner transistorer.
- ◆ $L = 0,25 - 0,18 \mu\text{m}$.
- ◆ $Y_{\text{ta}} = 140 \text{ mm}^2$.
- ◆ Frekvens = 500-733 MHz.
- ◆ februari 1999.



P 4 (WILLAMETTE)

- ◆ 42 miljoner transistorer.
- ◆ $L = 0,18 \mu\text{m}$.
- ◆ $Y_{\text{ta}} = 217 \text{ mm}^2$.
- ◆ Frekvens = 1,5 GHz.
- ◆ 6 metall-lager.
- ◆ november 2000.

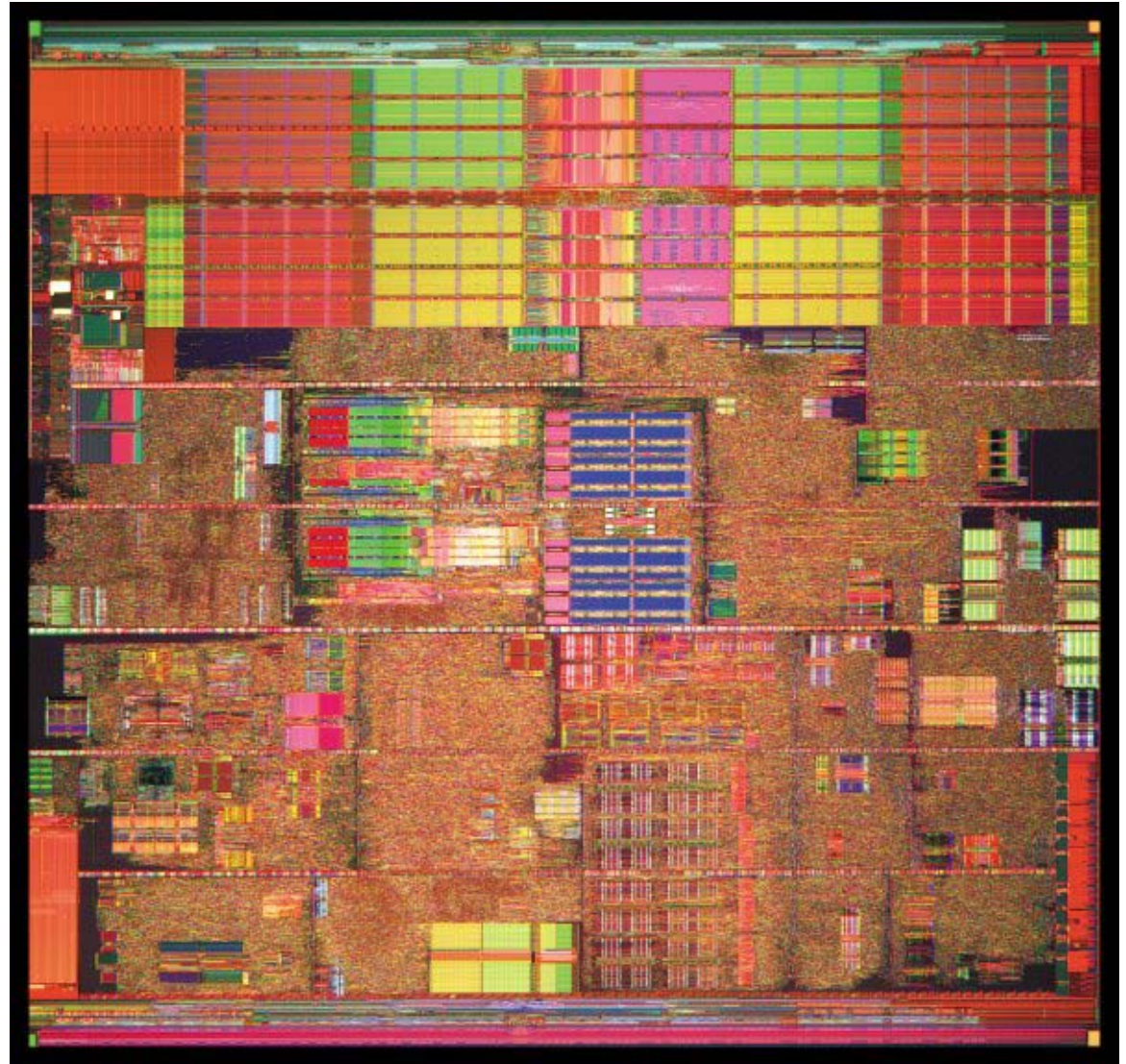
(SSE2, men slö FPU)



... Northwood (55M) ...

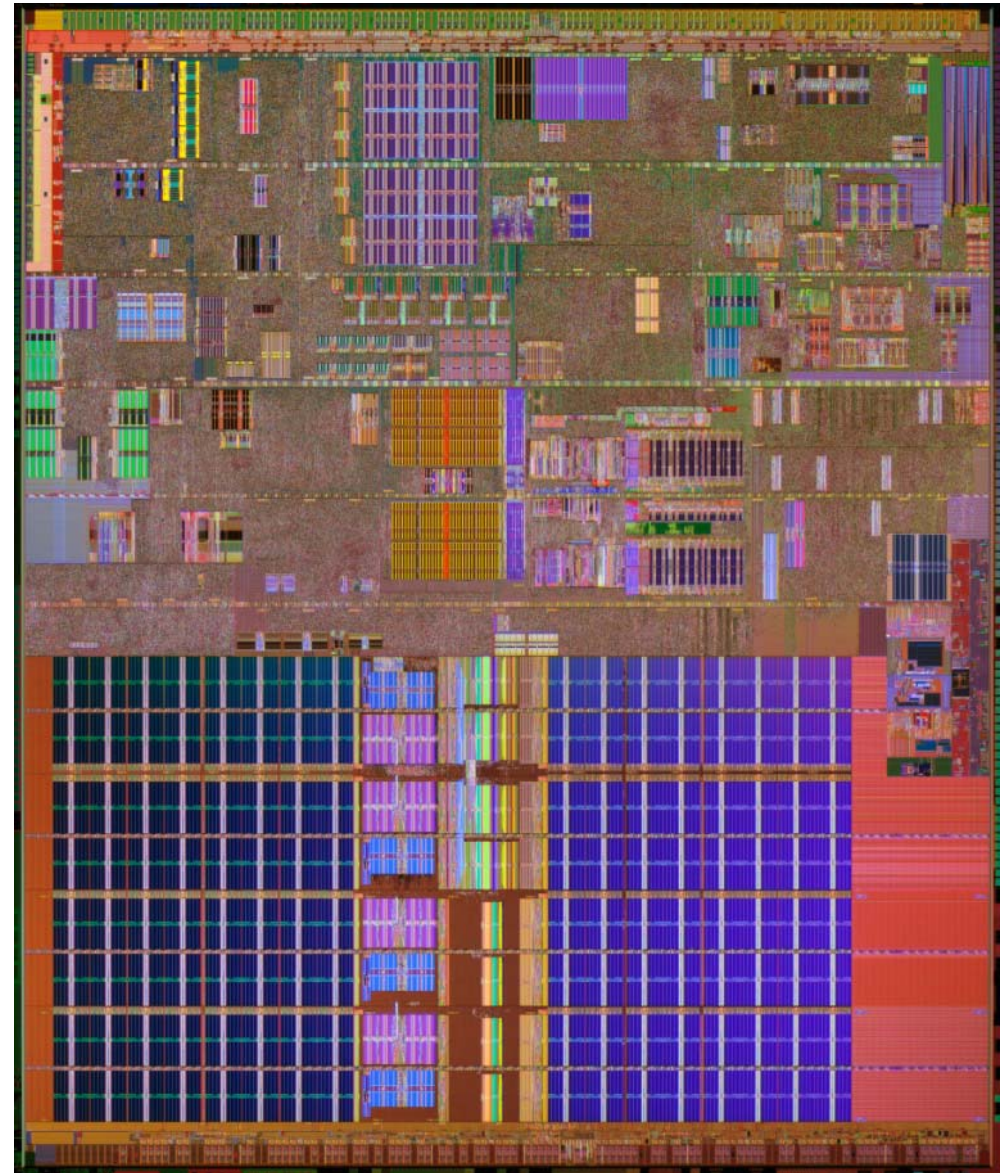
P4 (PRESCOTT)

- ◆ 125 miljoner transistorer.
- ◆ $L = 90 \text{ nm}$.
- ◆ $Y_{\text{ta}} = 112 \text{ mm}^2$!!!
- ◆ Frekvens = 2,8-3,4 GHz.
- ◆ 7 metall-lager.
- ◆ 2004.

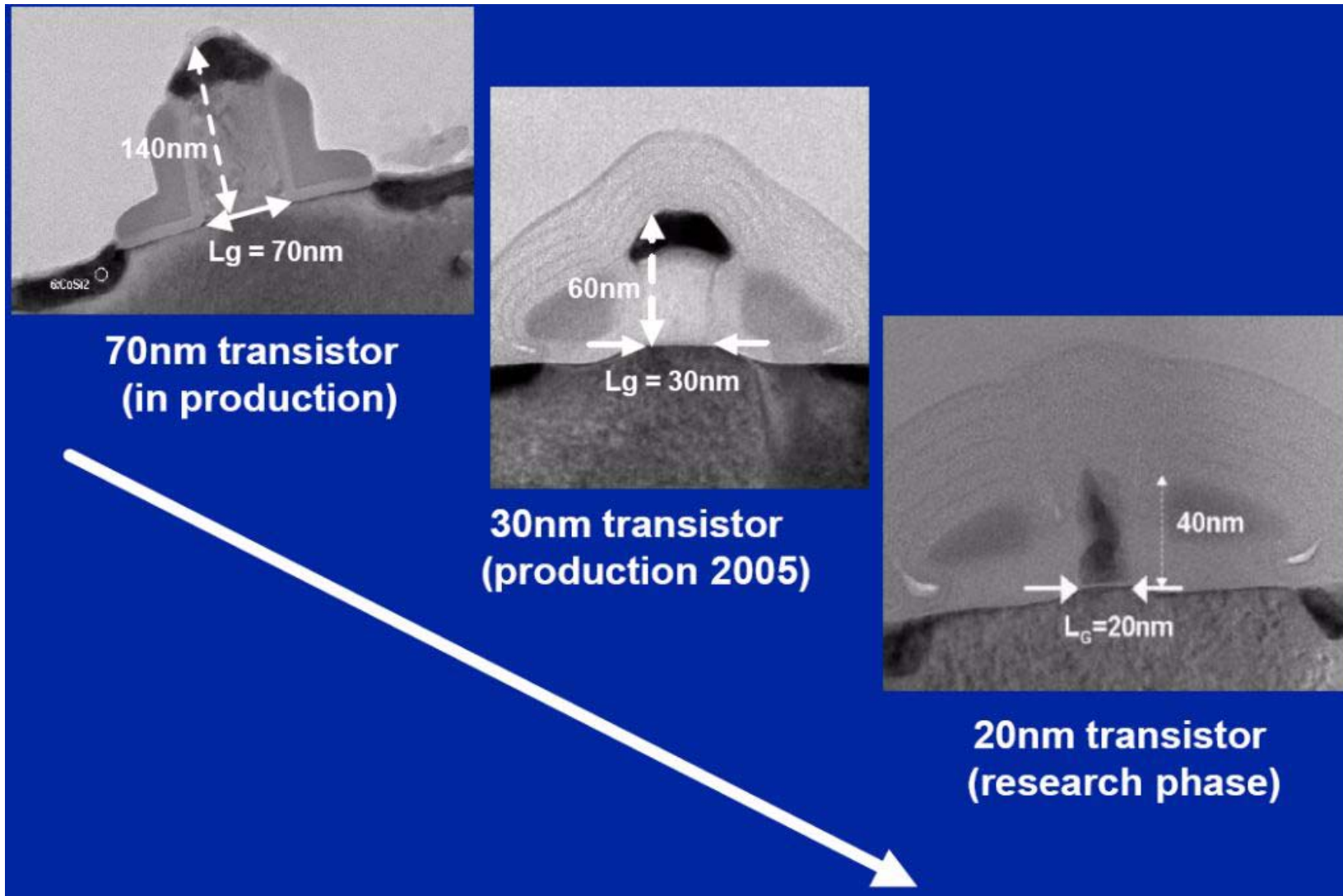


P4 (6xx)

- ◆ 170 miljoner transistorer.
- ◆ $L = 90 \text{ nm}$.
- ◆ $Y_{\text{ta}} = 135 \text{ mm}^2$.
(10,7 x 12,6 mm).
- ◆ Frekvens = 3,73 GHz
(extreme edition).
- ◆ 2005.



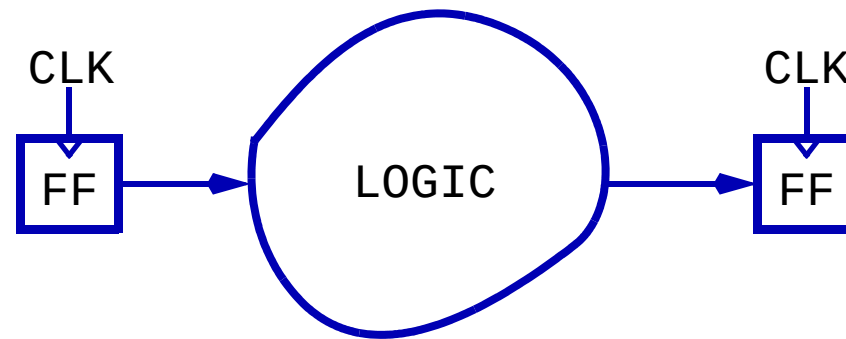
NEDSKALNINGSTREND FÖR TRANSISTORERNA



Källa
Intel

HÖGA HASTIGHETER PÅ CHIPS 1(5)

- ◆ Klockperioden sätter en gräns för hur lång tid logiken har på sig att utveckla sina Booleska uttryck.



- ◆ Vid 3,73 GHz klockas kärnan i en P4 vid dubbla frekvensen = 7,46 GHz $\Rightarrow$ en periodtid på 134 ps.
- ◆ Hur långt når en chipsignal på 134 ps?

HÖGA HASTIGHETER PÅ CHIPS 2(5)

- ◆ Ljushastigheten är $c = 300\,000\,000\text{ m/s}$ — i vakuum.
- ◆ När en elektrisk växelspanningssignal färdas på en chipsledning bestämmer dielektrikat runt ledningen maxhastigheten.

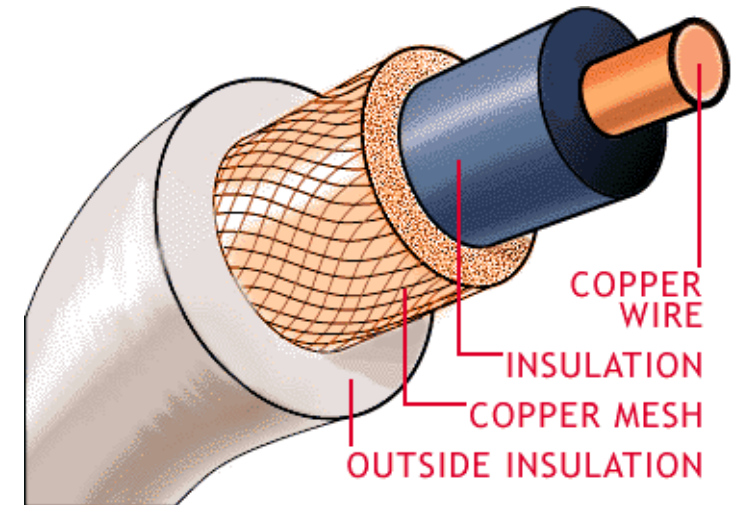
Den maximala utbredningshastigheten

bestäms då av $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$.

- ◆ Men vad är ϵ_r ?

HÖGA HASTIGHETER PÅ CHIPS 3(5)

- ◆ Dielektricitetskonstanten ϵ
länkar ihop D- och E-fälten: $D = \epsilon E$
- ◆ I luft är $D = \epsilon_0 E$, där
$$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{ As/Vm.}$$



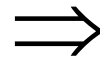
HÖGA HASTIGHETER PÅ CHIPS 4(5)

- ◆ Kiseldioxid är isolatormaterial (planarprocessen).
- ◆ För SiO_2 är $\epsilon_r = 3,9$ och maxhastigheten blir då ca 150 000 000 m/s. Med denna hastighet når man på 134 ps ungefär 20 mm!
- ◆ Det finns ledningar som är längre än 20 mm på vanliga chips idag!
- ◆ Vad värre är ... man kommer sällan upp i maxhastigheten!

*Maxhastighet är bara möjlig i förlustfria ledningar.
Mer om detta senare!*

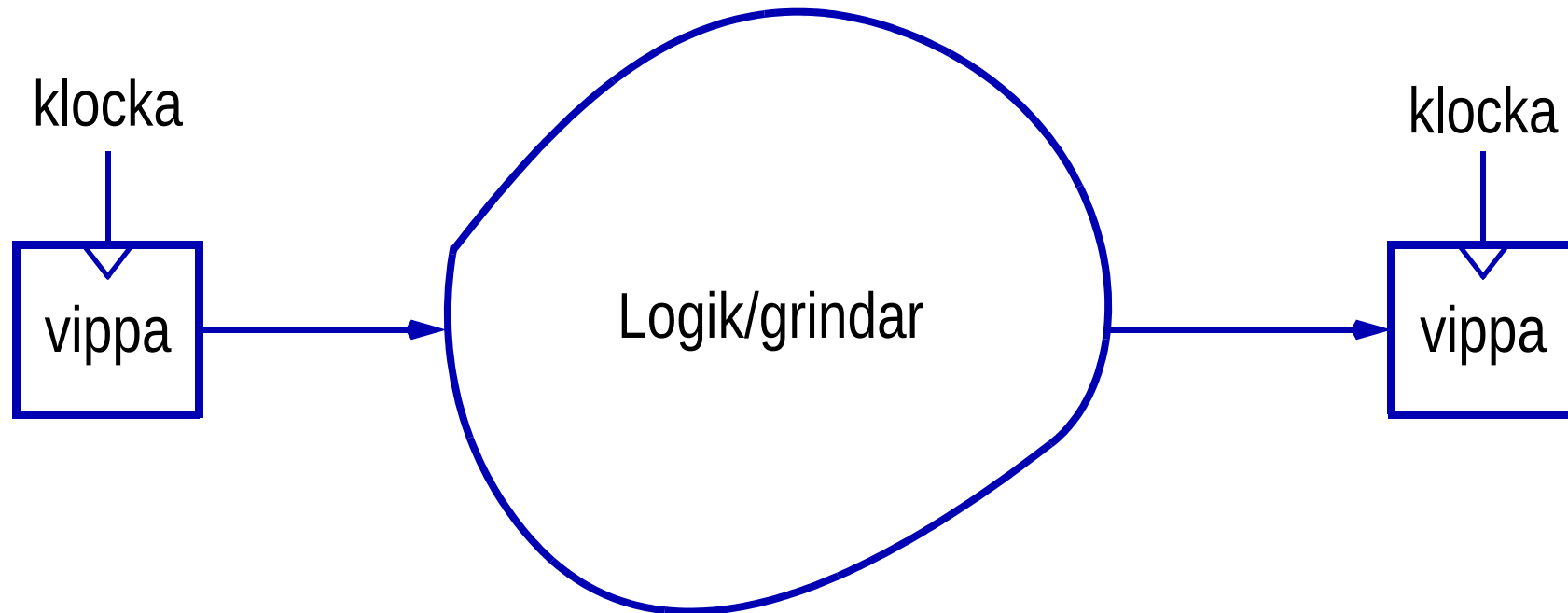
HÖGA HASTIGHETER PÅ CHIPS 5(5)

Beräkningskapaciteten “måste” öka,
genom ökad frekvens,
ökad chipsyta, etc.



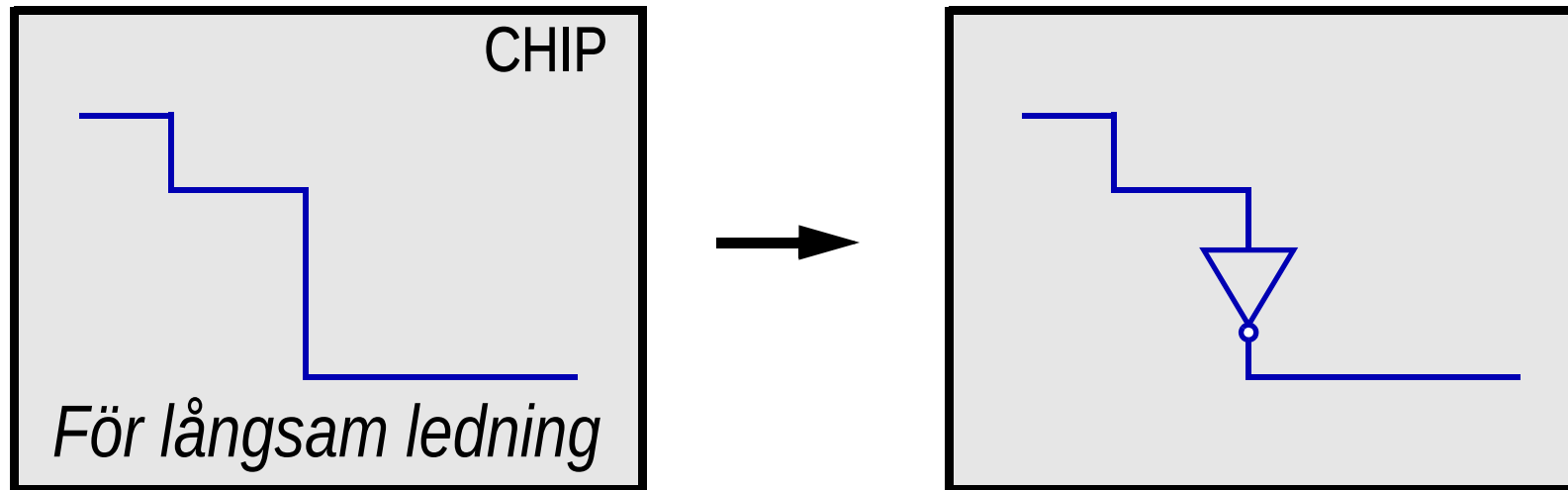
Hastighets-flaskhalsen hamnar
i ökande utsträckning
i ledningarna,
ej i grindarna

VARFÖR ÄR HASTIGHETEN ETT PROBLEM?



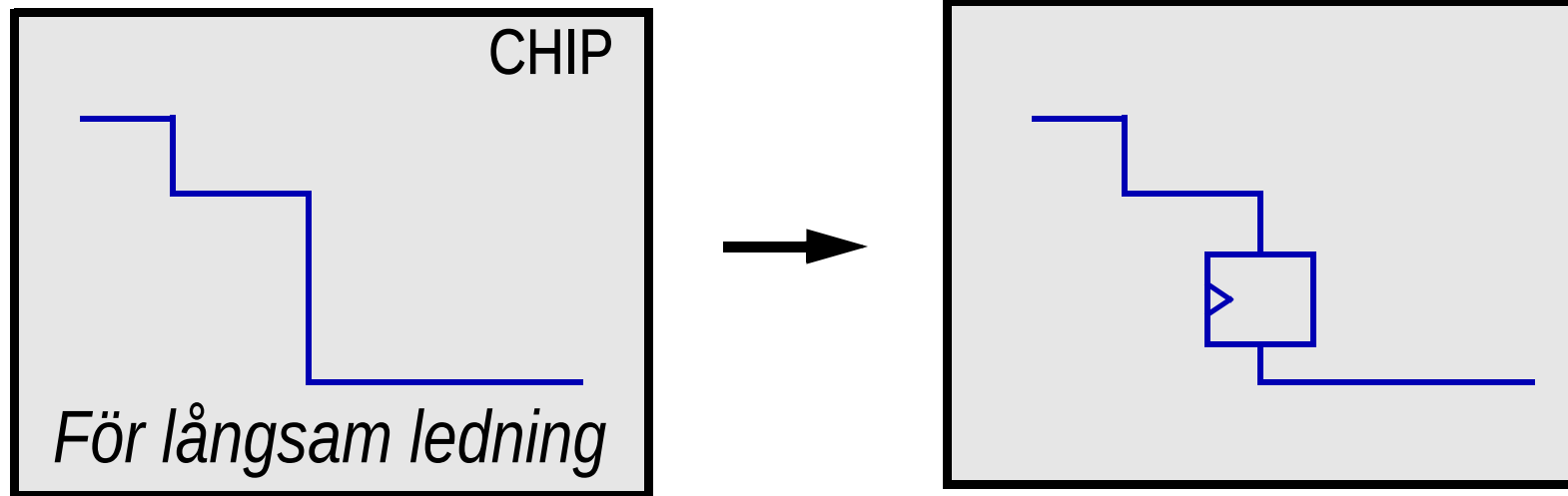
- ◆ Grindarna mellan vipporna måste få tid att räkna ut sina logiska värden.
- ◆ Ledningar tenderar stjäla tid från riktiga logiska beräkningar

VAD GÖRA OM LEDNINGEN ÄR FÖR LÅNGSAM? 1(2)



- ◆ “Repeater-insertion” $\Rightarrow$ förstärker signalen, så fördröjningen minskar.
- ◆ Fungerar bara om ledningen har förluster.

VAD GÖRA OM LEDNINGEN ÄR FÖR LÅNGSAM? 2(2)



- ◆ Pipelinad buss $\Rightarrow$
kommunikationen sker ej inom en enda klockcykel $\Rightarrow$
försämrade förutsättningar för arkitekturnivån.

INGENJÖRENS PERSPEKTIV

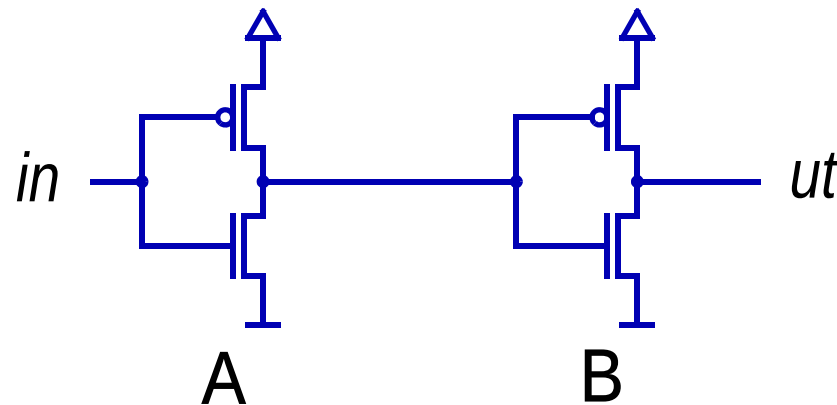
- ◆ *Vad händer i ledningarna ?*
Vi vill förstå de relevanta elektriska fenomenen.
- ◆ Men enbart förståelse för elektriska principer räcker inte, för ...
... du som ingenjör behöver ha verktyg också!
 - För ett motstånd är modellen $V = R \cdot I$ eller $I = V/R$.
 - För en MOS-transistor kan man p.s.s. beskriva $I = k (V - V_T)^2$.
- ◆ Nu kan ingenjören konstruera och analysera!

LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

UTGÅNGSLÄGET - EN GRIND DRIVER EN ANNAN

- ◆ En inverterare (A) driver en annan inverterare (B):

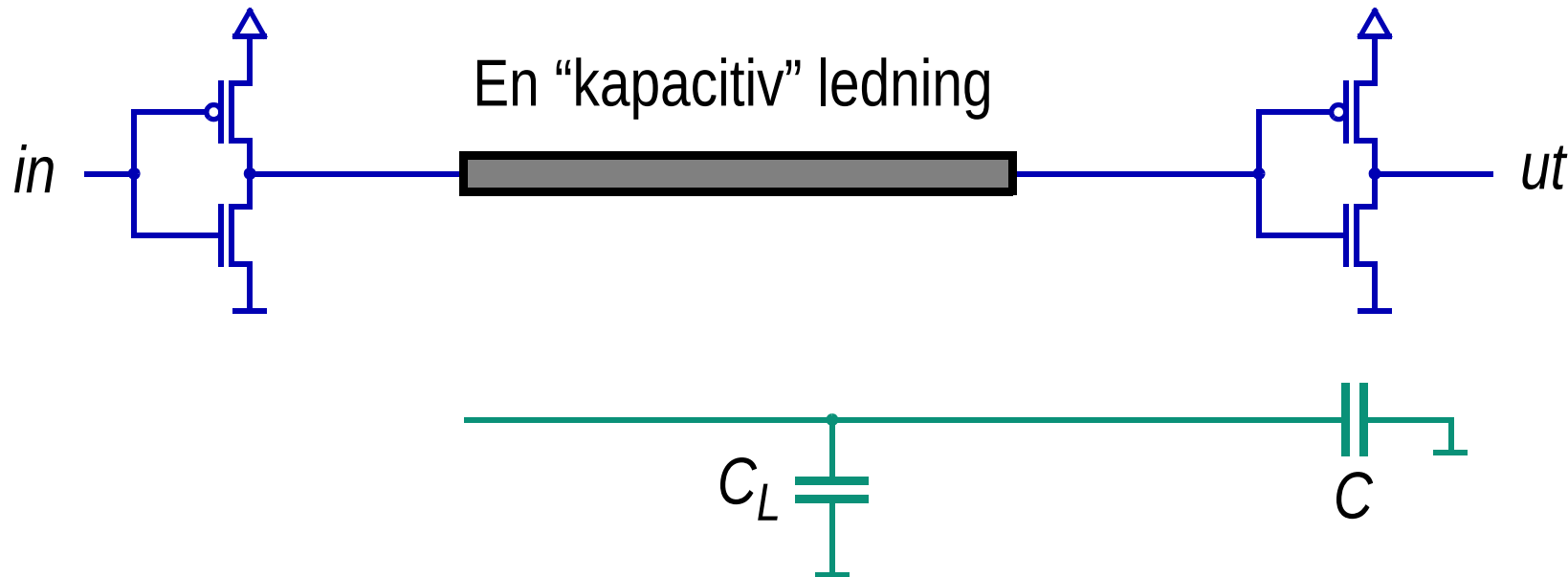


- ◆ Fördröjningen genom A: $t_d = \frac{C}{k \cdot V_{DD}}$,

där C är ingångskapacitansen hos B
och där k säger något om hur stark A är.

DEN KORTA CHIPSLEDNINGEN

- ◆ Ledningens extra kapacitans $\Rightarrow$ sämre stig- och falltider och fördröjning:



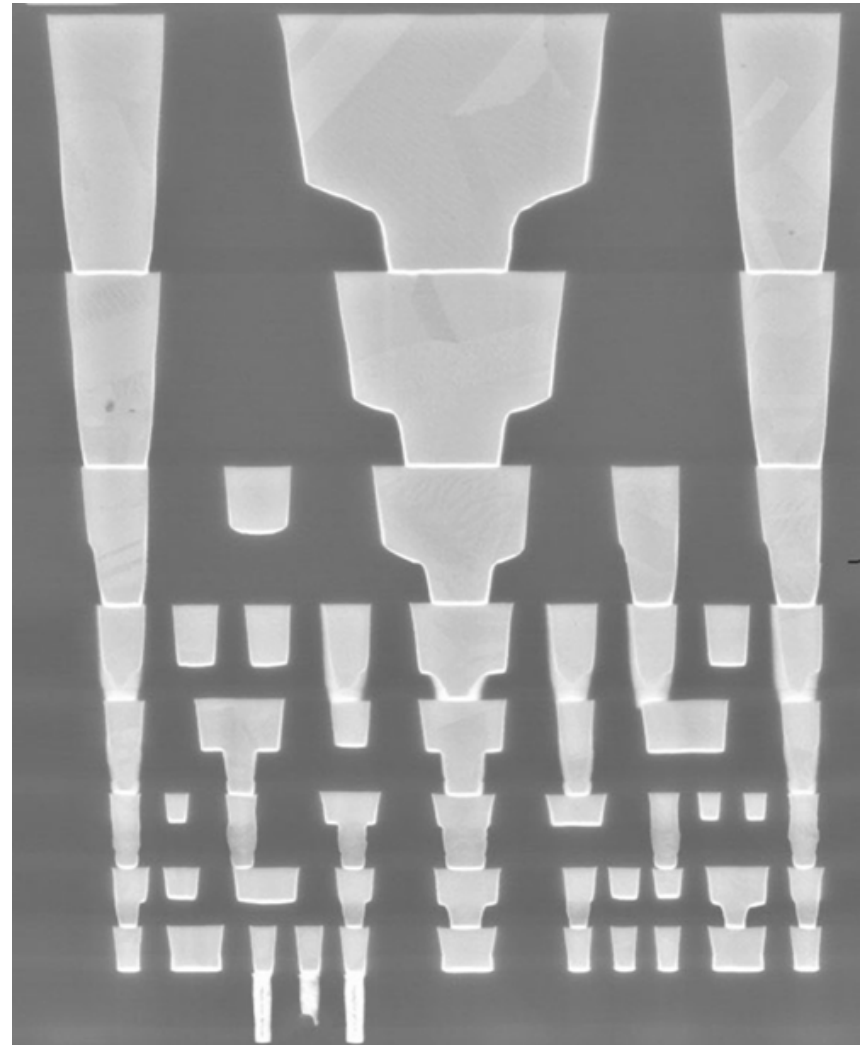
- ◆
$$t_d = \frac{(C + C_L)}{k \cdot V_{DD}}.$$

MODERN METALLSTRUKTUR - INTEL 65 NM

Inter-Layer Dielectric (ILD)

$$C = \varepsilon \cdot \frac{W}{t_{\text{oxid}}}$$

Lågt ε ger låga
kapacitanser!



MATERIAL MED LÅG “DIEL”-KONSTANT

- ◆ Man använder rutinmässigt bättre dielektrika än kiseldioxid.
- ◆ Intels första 90-nanometers process (omskrivna år 2002):

Koldopad kiseldioxid vilken får $\epsilon_r = 2,9 \Rightarrow$

en maxhastighet på 176 000 000 m/s $\Rightarrow$

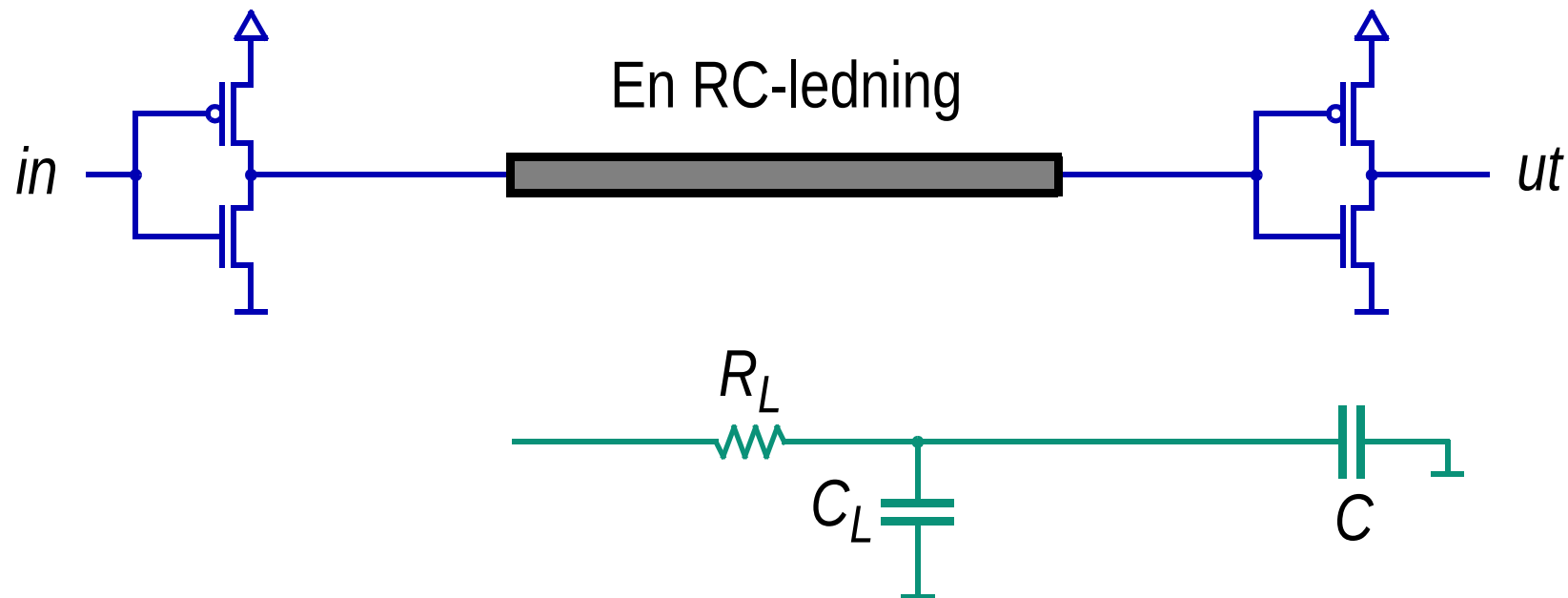
vår tänkta “P4-extreme ed”-signal kan nu
som mest nå 24 mm inom en klockcykel,
istället för de 20 mm som den nådde i vanlig kiseldioxid!

LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

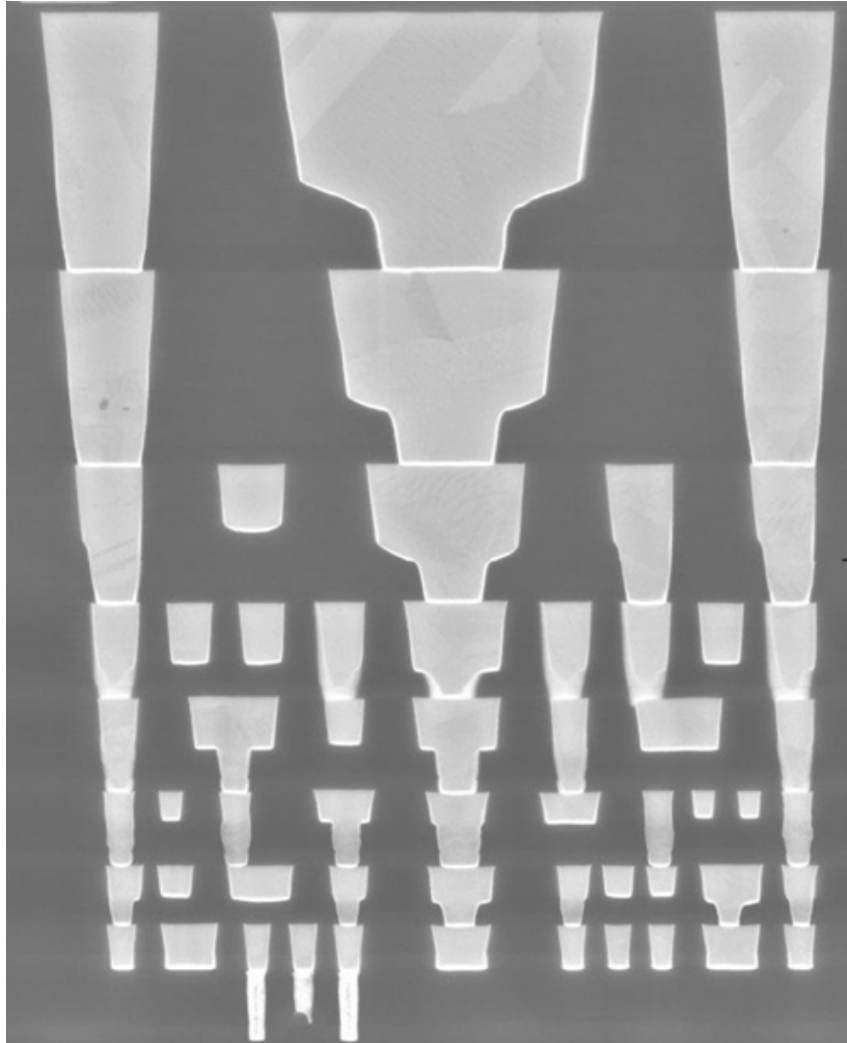
DEN LITE LÄNGRE CHIPSLEDNINGEN

- ◆ De lägre metallagren har liten tvärsnittsytta:



- ◆ Viktigt: Signalen etableras först vid ledningens ingång men sedan dröjer det innan signalen dyker upp på utgången.

INTEL 65 NM - IGEN

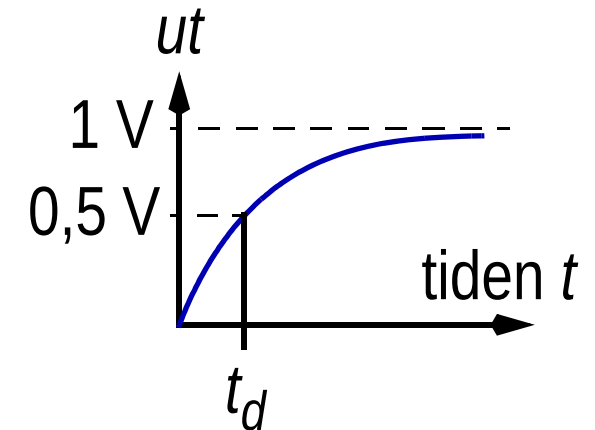
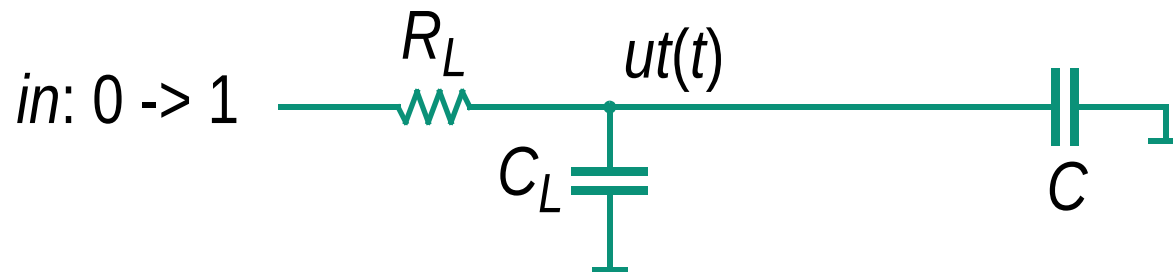


Notera att
ledningarna längst ned
har mycket liten
tvärsnittsyta.

De har därför hög resistivitet!

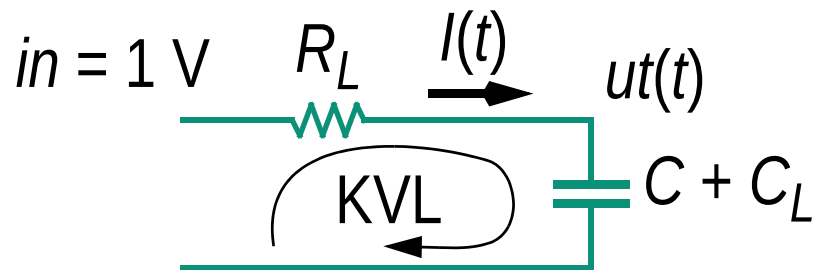
DEN LITE LÄNGRE CHIPSLEDNINGEN

- ◆ Resistansen i modellen leder till en bortskärmning av kapacitanserna.



MODELL FÖR DEN LITE LÄNGRE CHIPSLEDNINGEN

u_t initialt tom
på laddning



KVL medurs:

$$1 - I(t) R_L - u_t(t) = 0 \Rightarrow$$

$$(C + C_L) \frac{d}{dt} u_t R_L + u_t(t) = 1:$$

$$u_t(t) = 1 - e^{-\frac{t}{R_L (C + C_L)}}$$

Ledningsfördröjning:

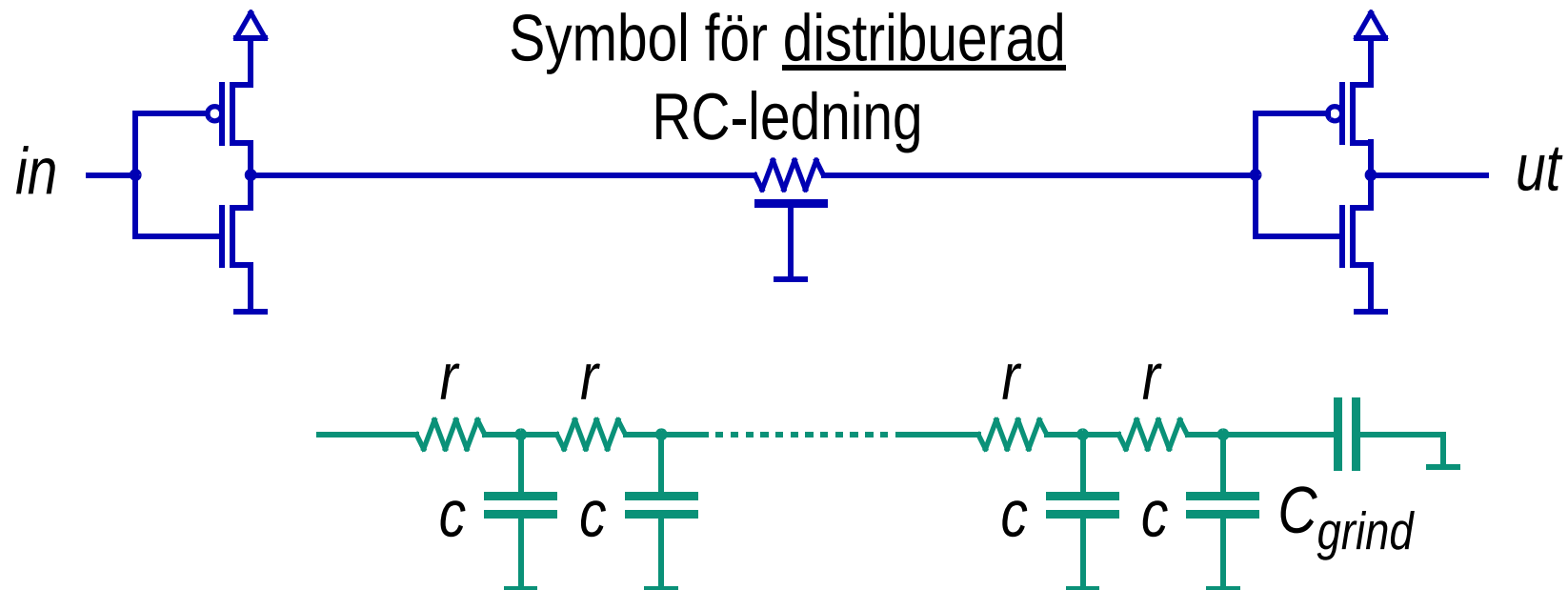
$$t_d = 0,7 R_L (C + C_L)$$

LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

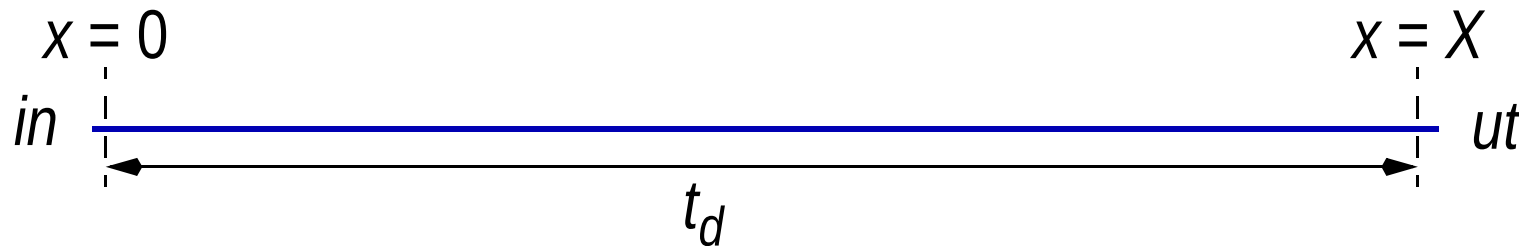
- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ **Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).**
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

TRANSMISSIONSLEDNINGAR

- ◆ Under vissa omständigheter uppvisar ledare ett s.k. distribuerat beteende (*långa ledningar!*) $\Rightarrow$ transmissionsledning
- ◆ Exempel på en transmissionsledning med förluster ges nedan:



MED KORTARE STIG- OCH FALLTIDER ...

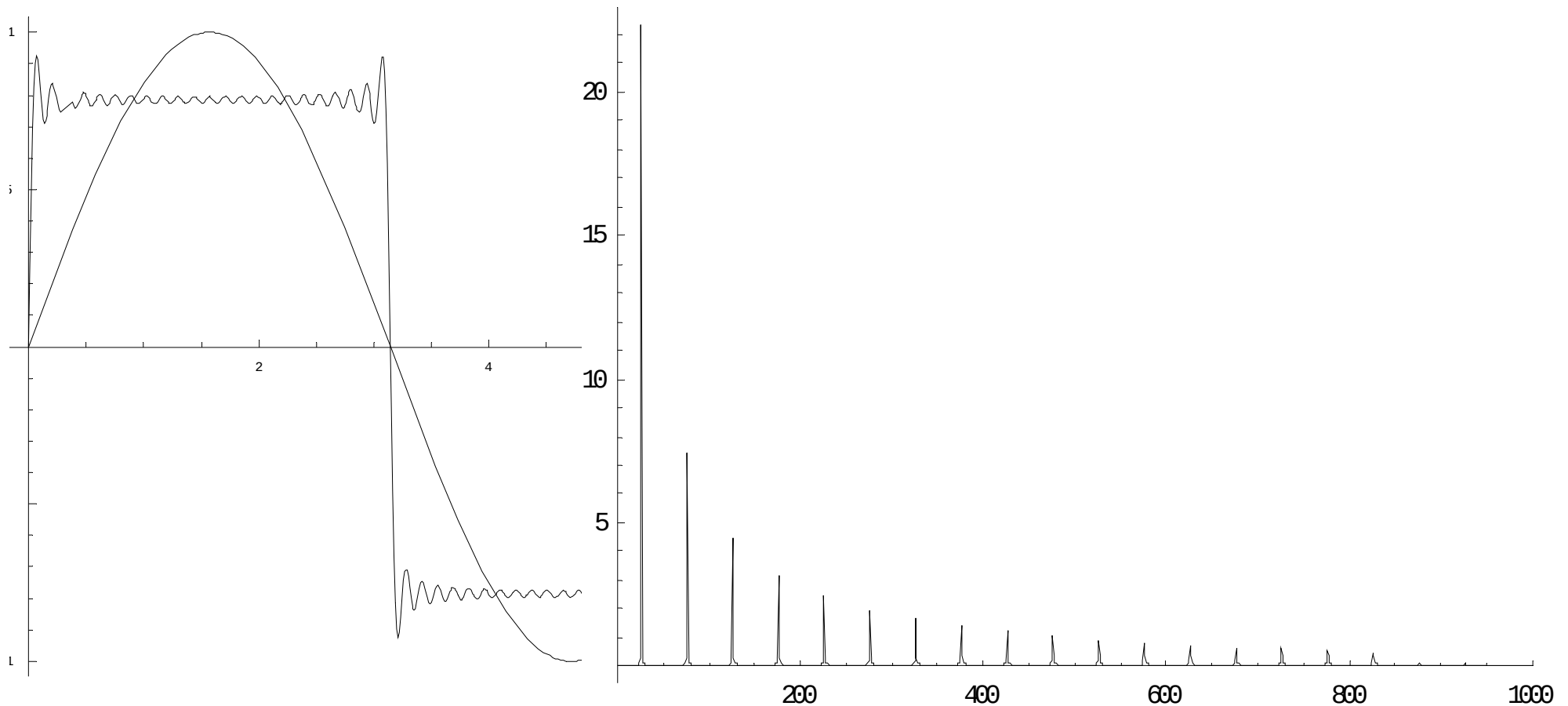


- ◆ När stig- och falltider är korta, upplevs ledningen som lång av signalflanken $\Rightarrow$ transmissionsledning.
- ◆ Tumregel: När stigtiden $t_r < 2,5 t_d$ beter sig ledningen distribuerat:

För $c/1,7$ och stigtider kring 10 ps $\Rightarrow$

ledningar längre än $> \frac{c}{1,7} \cdot 4 \text{ ps} = 0,7 \text{ mm}$ beter sig distribuerat.

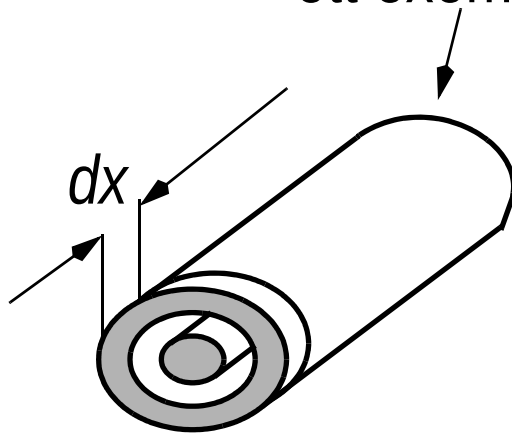
DET HANDLAR OM FREKVENSSINNEHÅLL !



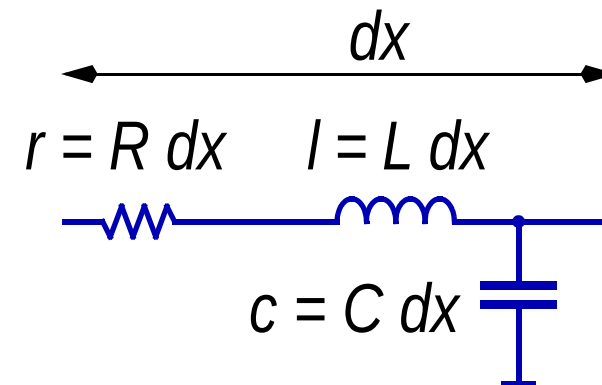
Relationen mellan stig/falltid och löptid avgör ledningens egenskaper!

EN MODELL AV ETT LEDNINGSSEGMENT

Koaxialkabel är
ett exempel

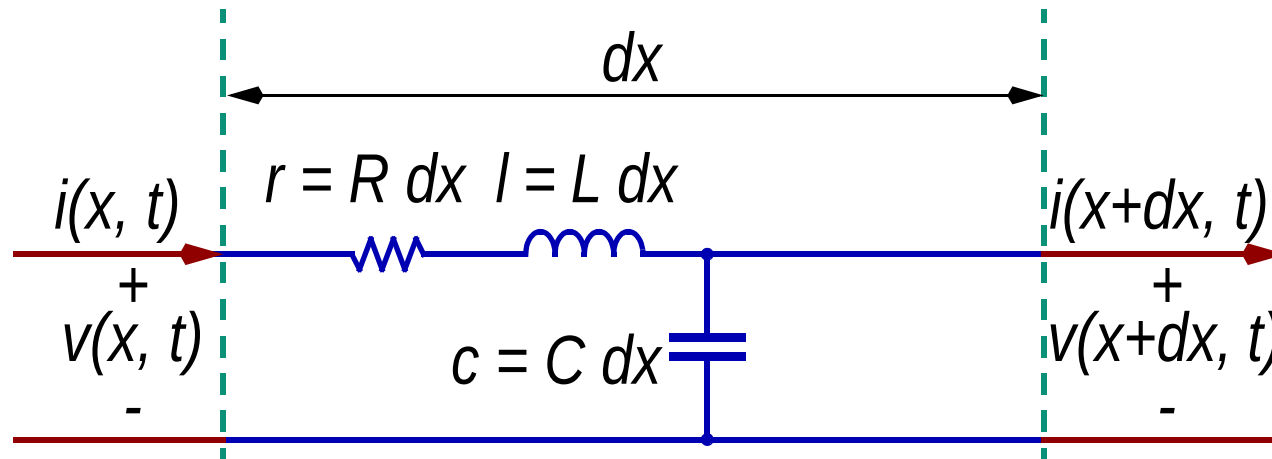


Notera: R , L och C ges
alla per längdenhet



- ◆ Olika typer av transmissionsledningsmodeller:
RC-ledningen har induktans $L = 0$, medan LC-ledningen har $R = 0$.
- ◆ När $R = 0$ kallas modellen förlustfri, annars har ledningen förluster.

EKVATIONS DAGS! TELEGRAFEKVATIONERNA 1(2)



$$v(x + dx, t) - v(x, t) = -[R dx] i(x, t) - [L dx] \frac{\partial}{\partial t} i(x, t)$$

$$i(x + dx, t) - i(x, t) = -[C dx] \frac{\partial}{\partial t} v(x + dx, t)$$

TELEGRAFEKVATIONERNA 2(2)

- ◆ Använd Taylorutveckling omkring x , d.v.s. vi låter $dx \rightarrow 0$.
- ◆ Nu erhåller vi telegrafekvationerna:

$$\frac{\partial}{\partial x} v(x, t) = -\left(R + L \frac{\partial}{\partial t}\right) i(x, t).$$

$$\frac{\partial}{\partial x} i(x, t) = -\left(C \frac{\partial}{\partial t}\right) v(x, t).$$

LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ **Transmissionsledningar med förluster.**
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

TELEGRAFEKVATIONERNA FÖR RC-LEDNINGEN

- ◆ $L = 0 \Rightarrow$ bara R och C finns kvar i modellen:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x, t) = RC \frac{\partial}{\partial t} v(x, t).$$

- ◆ Distribuerade ledningar med förluster är svåranalyserade ...

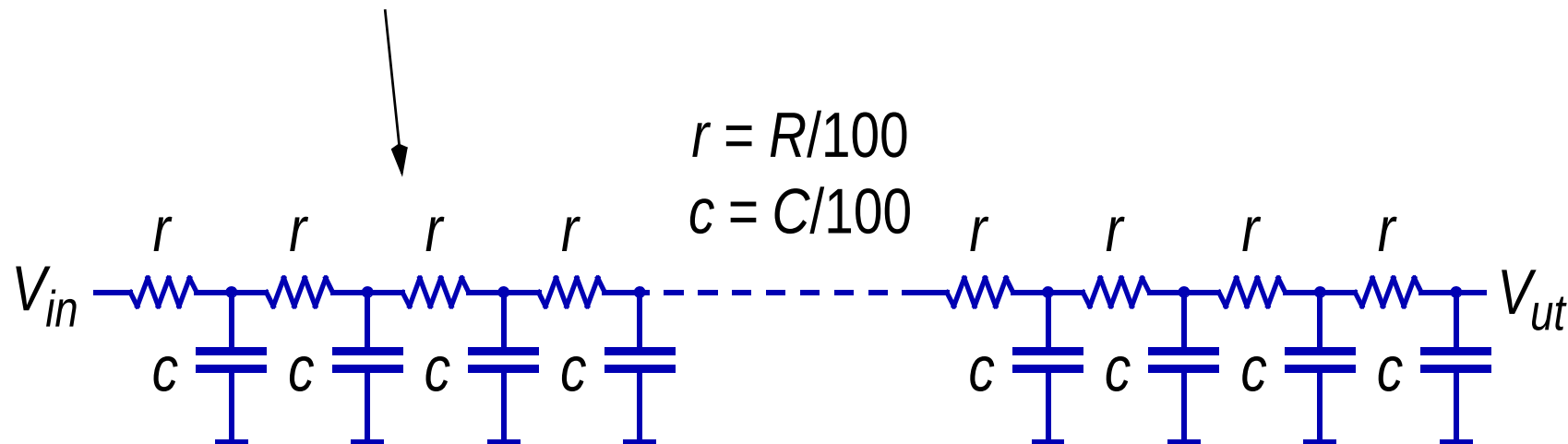
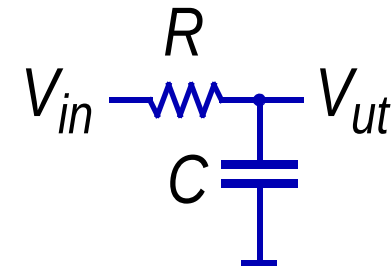
$$v(x, t) = \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2} \cdot \sqrt{\frac{RC}{t}}\right) \text{ är lösningen.}$$

- ◆ Låt oss hellre ta en simulator till hjälp ...

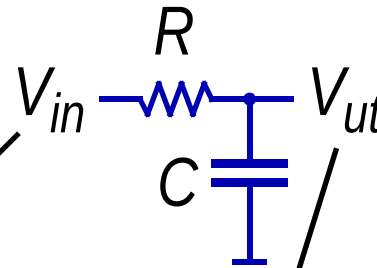
LÅT OSS KONTROLLERA FÖRDRÖJNINGEN

◆ Genom simulering jämför vi två RC-modeller:

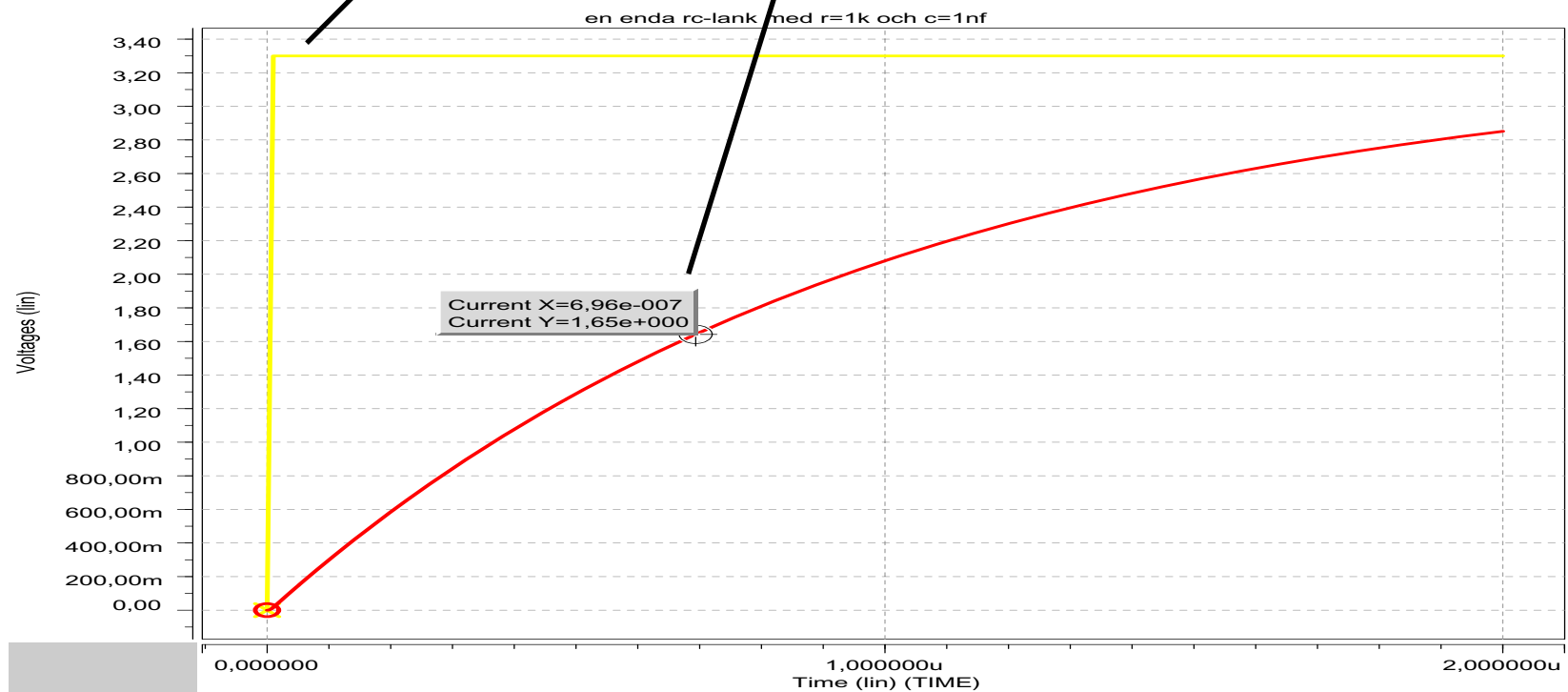
1. den enkla RC-modellen.
2. den distribuerade RC-modellen (efterliknas m.h.a. 100 korta segment).



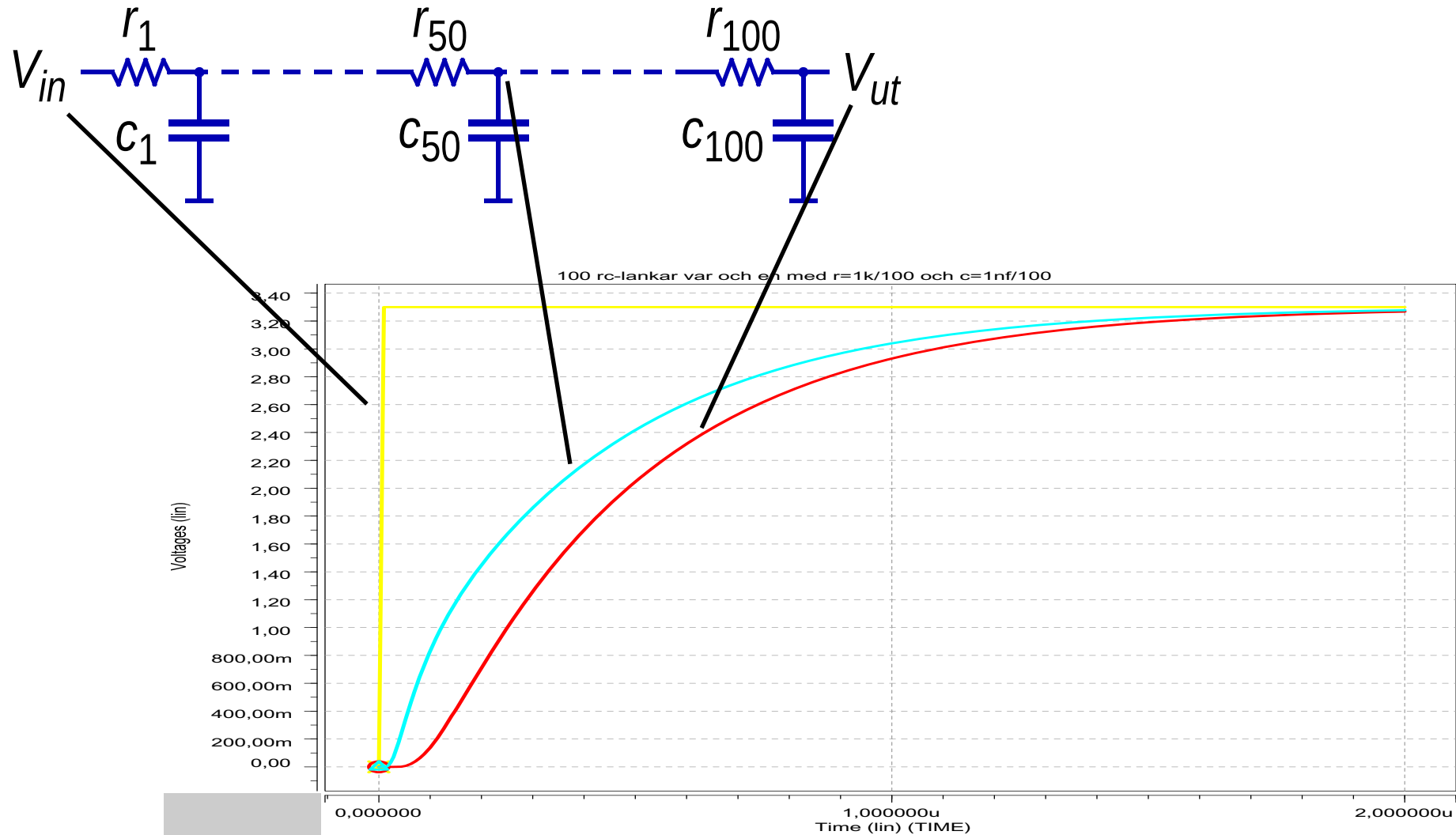
DEN ENKLA RC-MODELLEN



$$V_{ut}(t) = V_{DD} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

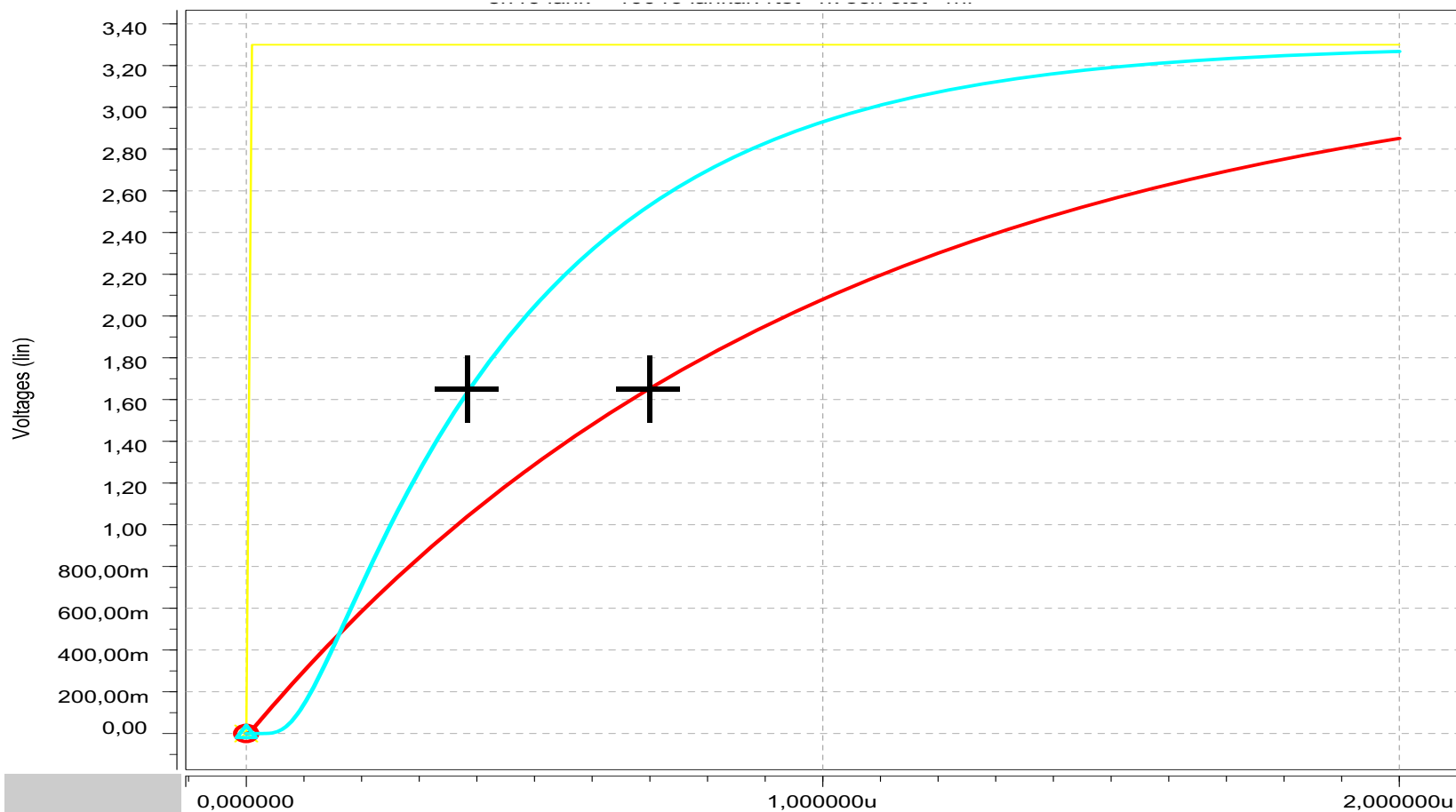


DEN "DISTRIBUERADE" RC-MODELLEN



JÄMFÖRELSE AV UTGÅNGARNAS FÖRDRÖJNING

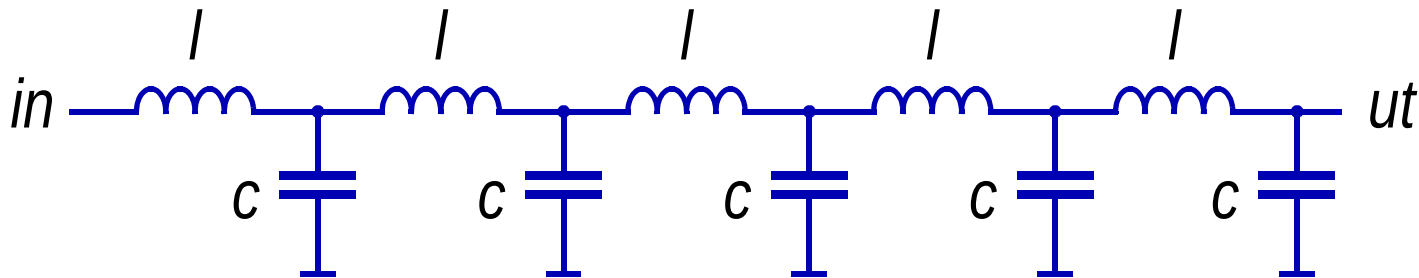
- ◆ Den enkla modellens V_{ut} är röd, den "distribuerades" V_{ut} turkos:



LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

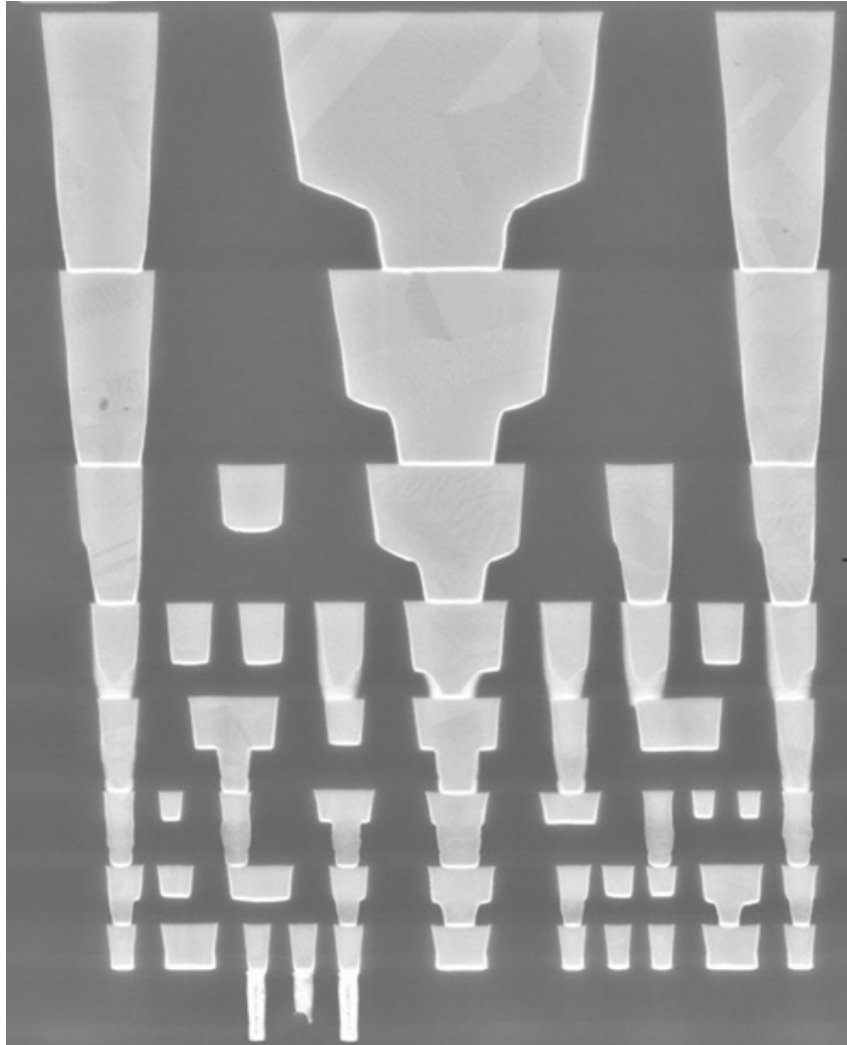
- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

LC-LEDNINGEN



- ◆ Induktansen dominerar resistansen; och modellen får $R = 0$.
- ◆ LC-ledningsmodellen lämpar sig för kretskortsledningar samt långa ledningar i de övre metallagren av ett chips.

INTEL 65 NM - IGEN



Notera att
ledningarna längst upp
har mycket stor tvärsnittsytta.

Vi säger (förenklat) att
dessa ledningar
inte har några förluster.

TELEGRAFEKVATIONERNA FÖR LC-LEDNING

- ◆ Med $R = 0$ får vi en s.k. vågekvation:

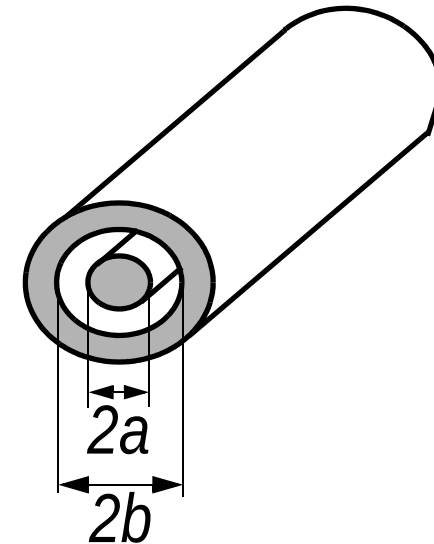
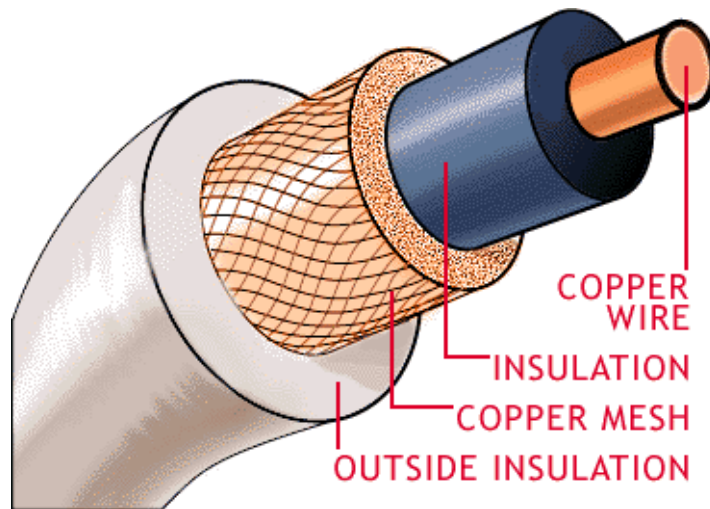
$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} v(x, t) = LC \frac{\partial^2}{\partial t^2} v(x, t).$$

- ◆ Lösningen till vågekvationen innehåller variabeln $t - x/v_p$,

där $v_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ är utbredningshastigheten på signalen.

- ◆ *Men vi har ju sysslat med hastighet förut; kan vi räkna fram v_p ?*

ETT EXEMPEL MED KOAXIALKABEL 1(2)



- ◆ En koaxialkabel fungerar som en LC-ledning. Alltså är $v_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot c}}$.
- ◆ I en koaxialkabel fås $L = \frac{\mu_r \mu_0 \cdot \ln b/a}{2\pi}$ och $c = \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln b/a}$.

ETT EXEMPEL MED KOAXIALKABEL 2(2)

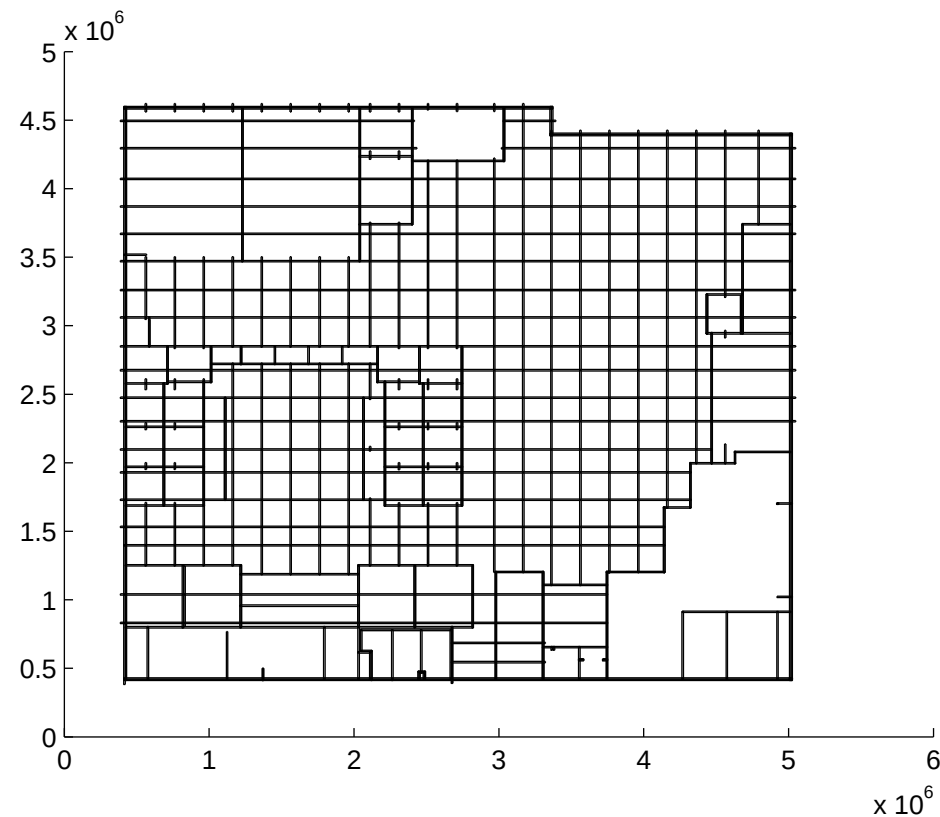
- ◆ Vi får nu $v_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_r \mu_0 \cdot \ln b/a}{2\pi} \cdot \frac{2\pi \epsilon_r \epsilon_0}{\ln b/a}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_r \epsilon_0}},$
ty $\mu_r \approx 1$ för icke-ferromagnetiska material.
- ◆ Men på sidan 16 såg vi ju att $v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}.$
- ◆ Det visar sig att $v_p = \frac{1}{\sqrt{l \cdot c}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$ och att $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} !$

LEDNINGAR PÅ INTEGRERADE KRETSAR/CHIPS

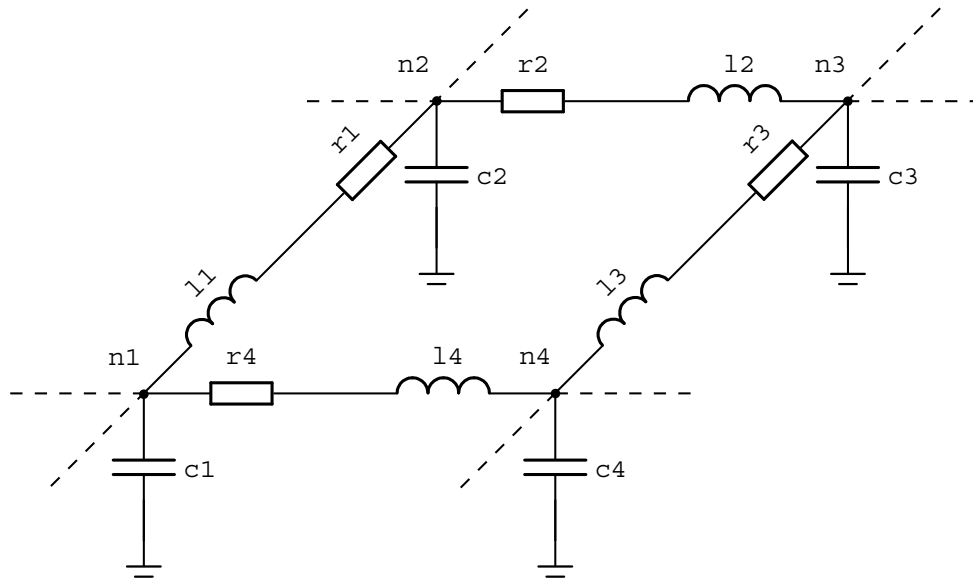
- ◆ Varför spelar ledningarna roll?
- ◆ Den korta chipsledningen.
- ◆ Den lite längre chipsledningen.
- ◆ Transmissionsledningar (den långa chipsledningen).
- ◆ Transmissionsledningar med förluster.
- ◆ Transmissionsledningar utan förluster.
- ◆ Kraftförsörjning i processor.

KRAFTFÖRSÖRJNING I PROCESSOR

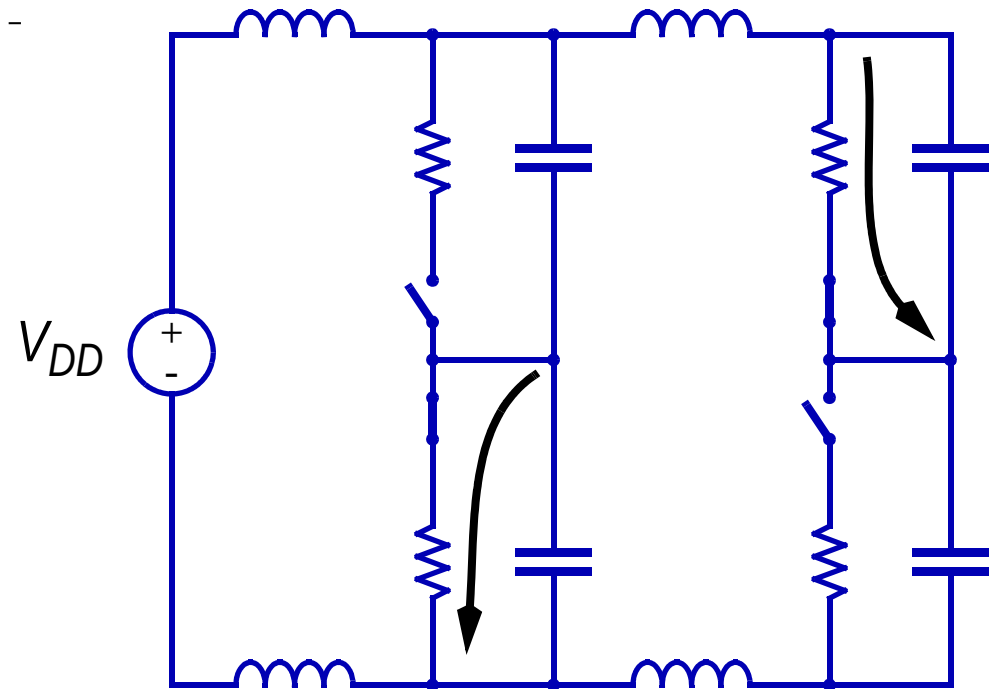
- ◆ 25 mm² 200 MHz AVR-processor med 2 miljoner grindar.



MODELL AV "POWER GRID"



$$\Delta V = -L \frac{dI}{dt} - R \cdot I$$



- ◆ Strömstötarna i en processor beror av både vilka grindar och vilken mjukvara som används!

SAMMANFATTNING

- ◆ Ledningarna bidrar ...
 - inte till beräkningsarbetet, utan ger bara ...
 - prestandaförsämring och effektökning.
- ◆ Förstår vi hur ledningarna påverkar våra kretsar ...
 - kan vi bygga modeller, och med dessa ...
 - kan vi ta hänsyn till ledningar när vi konstruerar elektroniksystem.