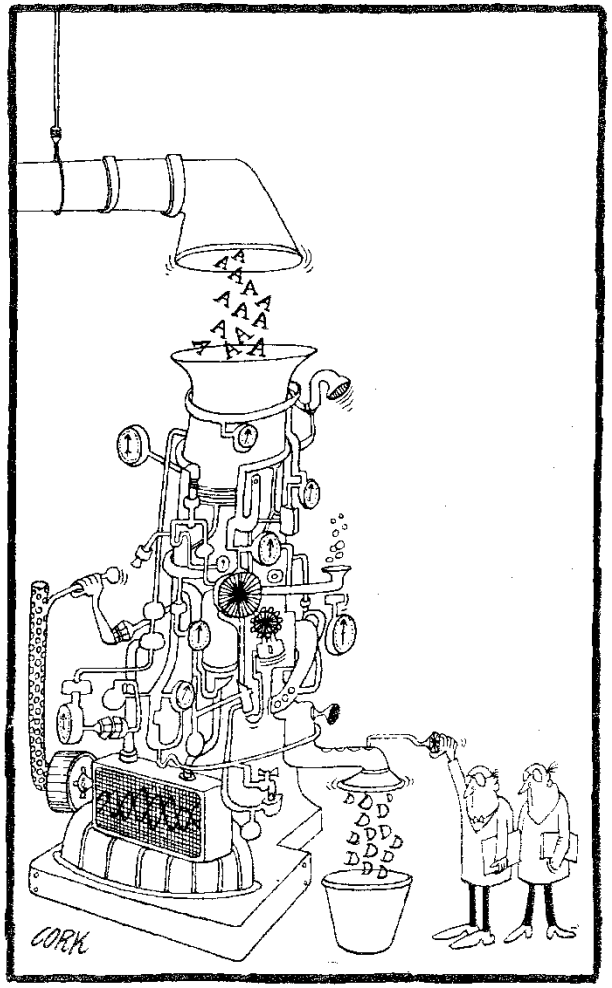

CORK

Analogt ↔ Digital

Erik Lind
Viktor Öwall
Bertil Larsson

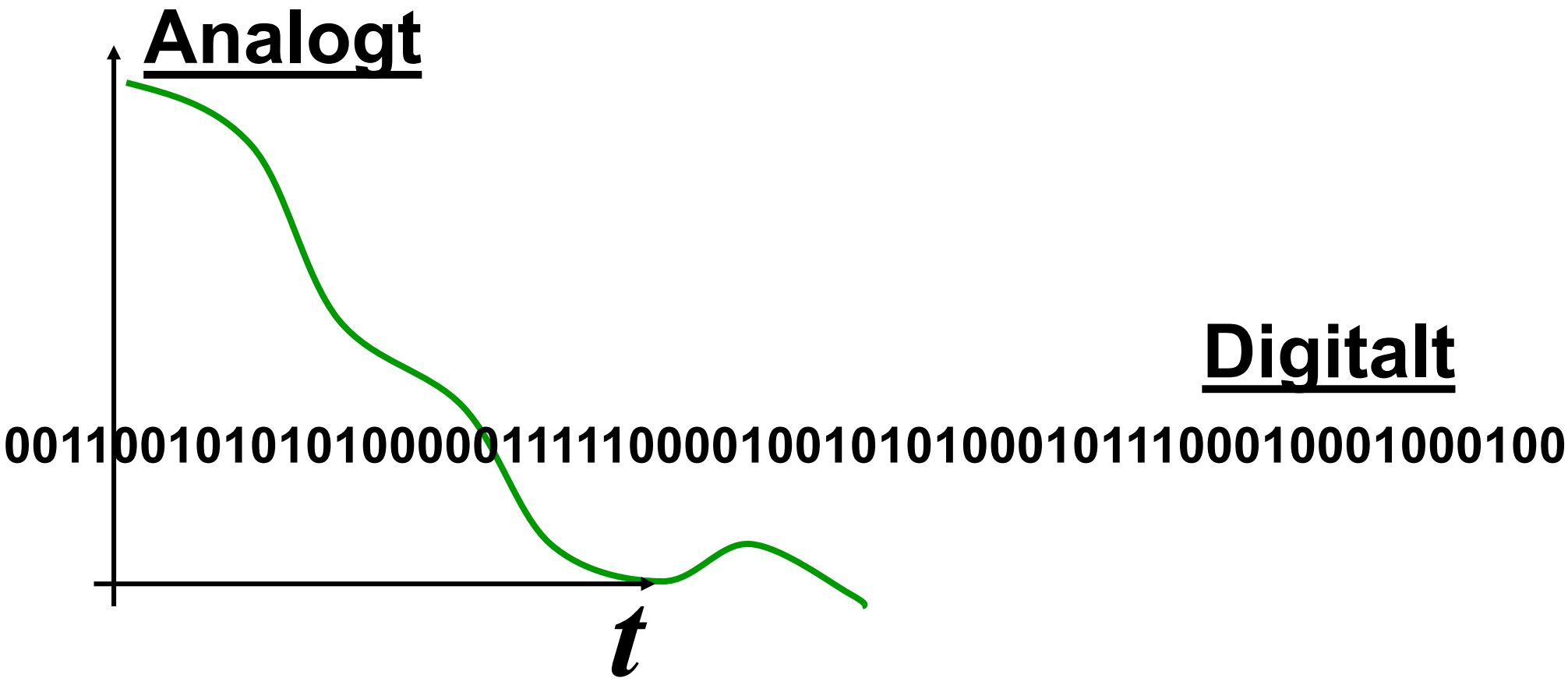
Analogt ↔ Digital

Hur kommunicerar digitala system (0101010) med analoga signaler $v_o(t)$?

Komplicerat! Kräver kunskap om *signalbehandling*, analog elektronik och *digitala system*.

Översikt & Laboration

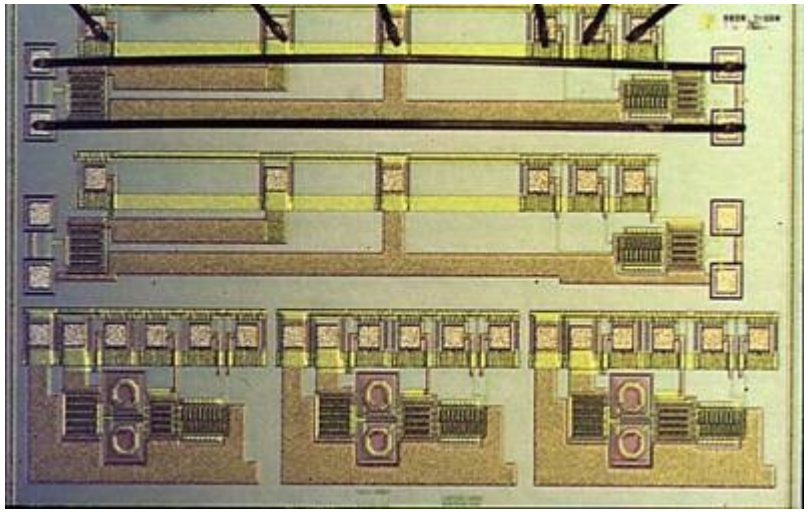
Analoga och Digitala Signaler



Analogt kontra Digitalt

Analogt

- få komponenter
- **höga frekvenser (GHz)**
- **Sensorer / Aktorer**
- *låg precision (1-10%)*



Digitalt

- Hög precision π: $\mathbf{10^{13}}$
- Mycker komplexare algoritmer
- Lagringskapacitet

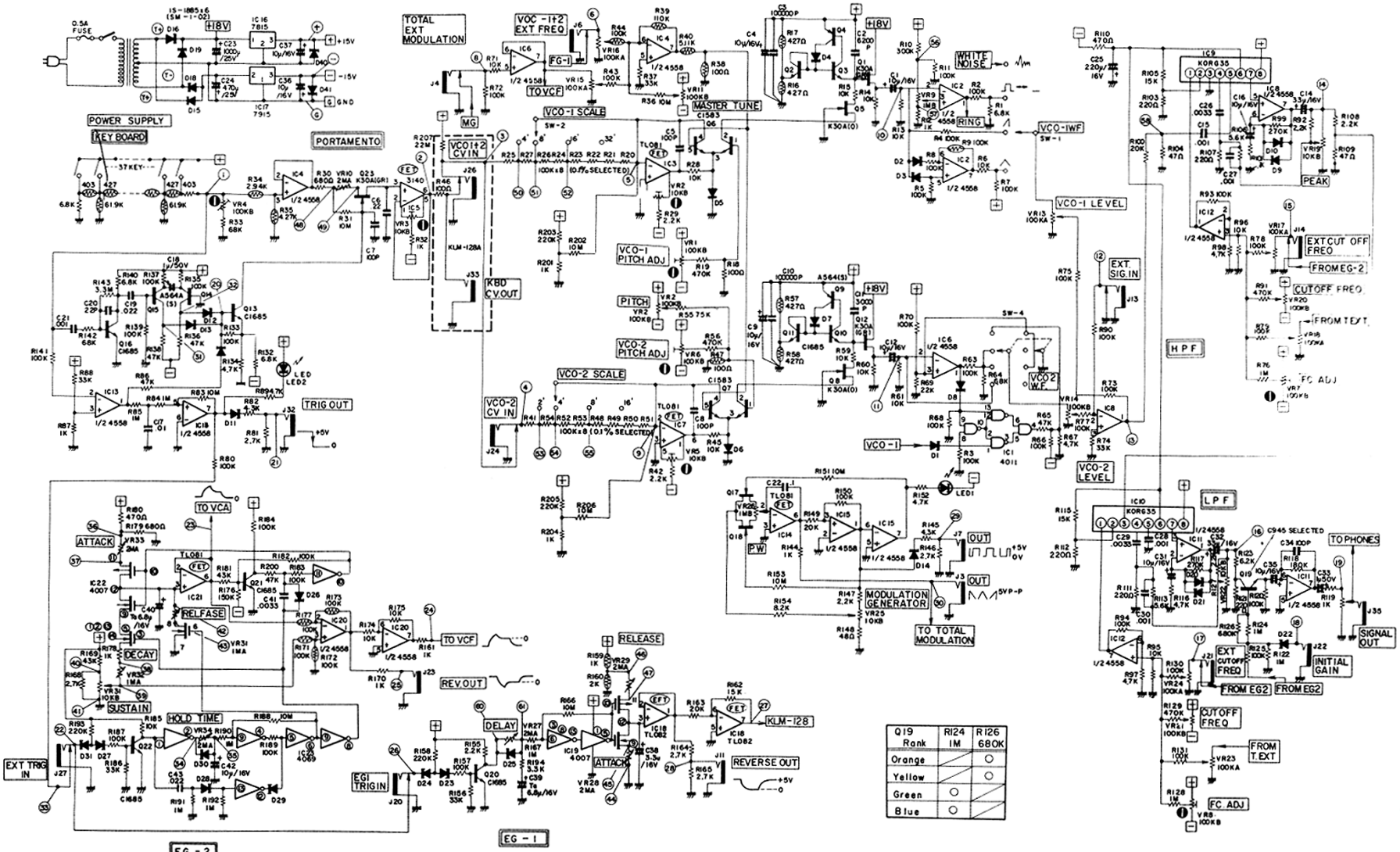
Elektronik + programmering

Analogt kontra Digitalt

KORG MS-20

KORG MS-20

3. CIRCUIT DIAGRAM (1)

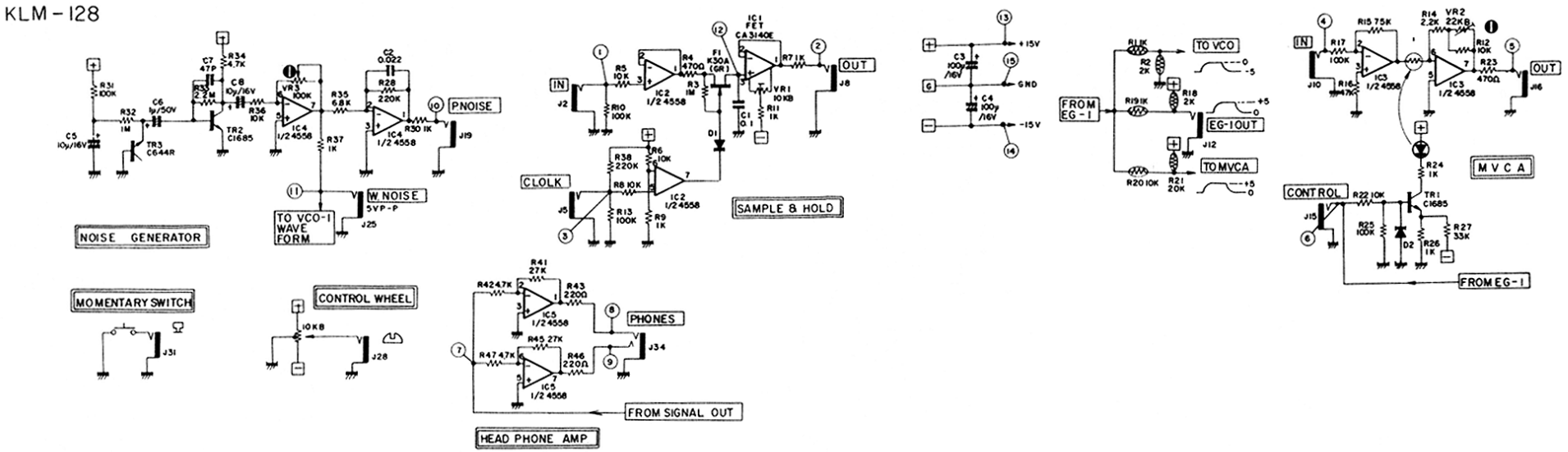


Q19 Rank	RI24 1M	RI26 680K
Orange		○
Yellow		○
Green	○	
Blue	○	

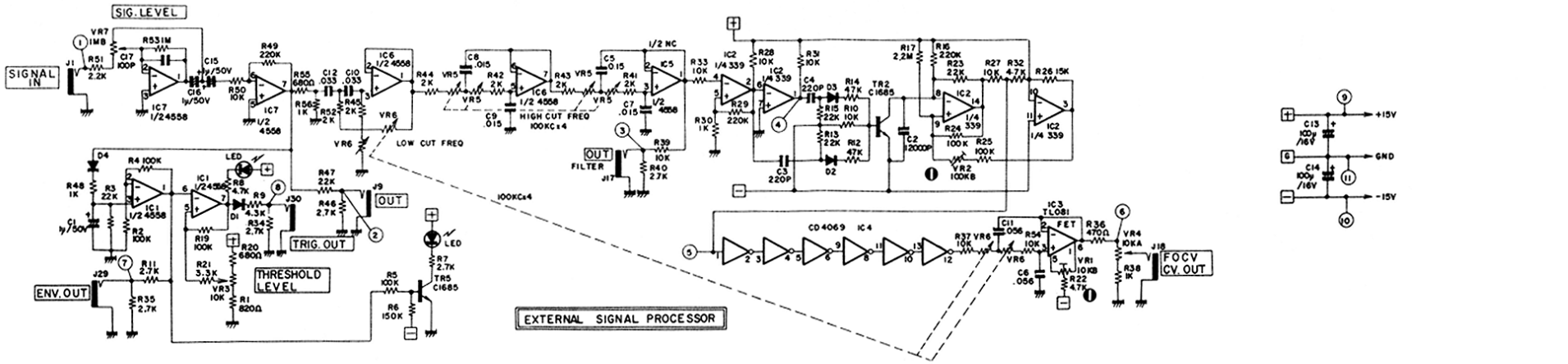
KORG MS-20

CIRCUIT DIAGRAM (2)

KLM-128



KLM-129



Analogt kontra Digitalt

200:-

10.000:-

20 Hz-20 kHz : Lätt att skapa med en processor på 1 GHz.

Minne

Digital Processning

1. 001001000110
2. 011001010010
3. 100100010010

AD-Omvandling

Förstärkning
Filtrering
Omvandling

Digital Processning

1. 001001000110
2. 011001010010
3. 100100010010

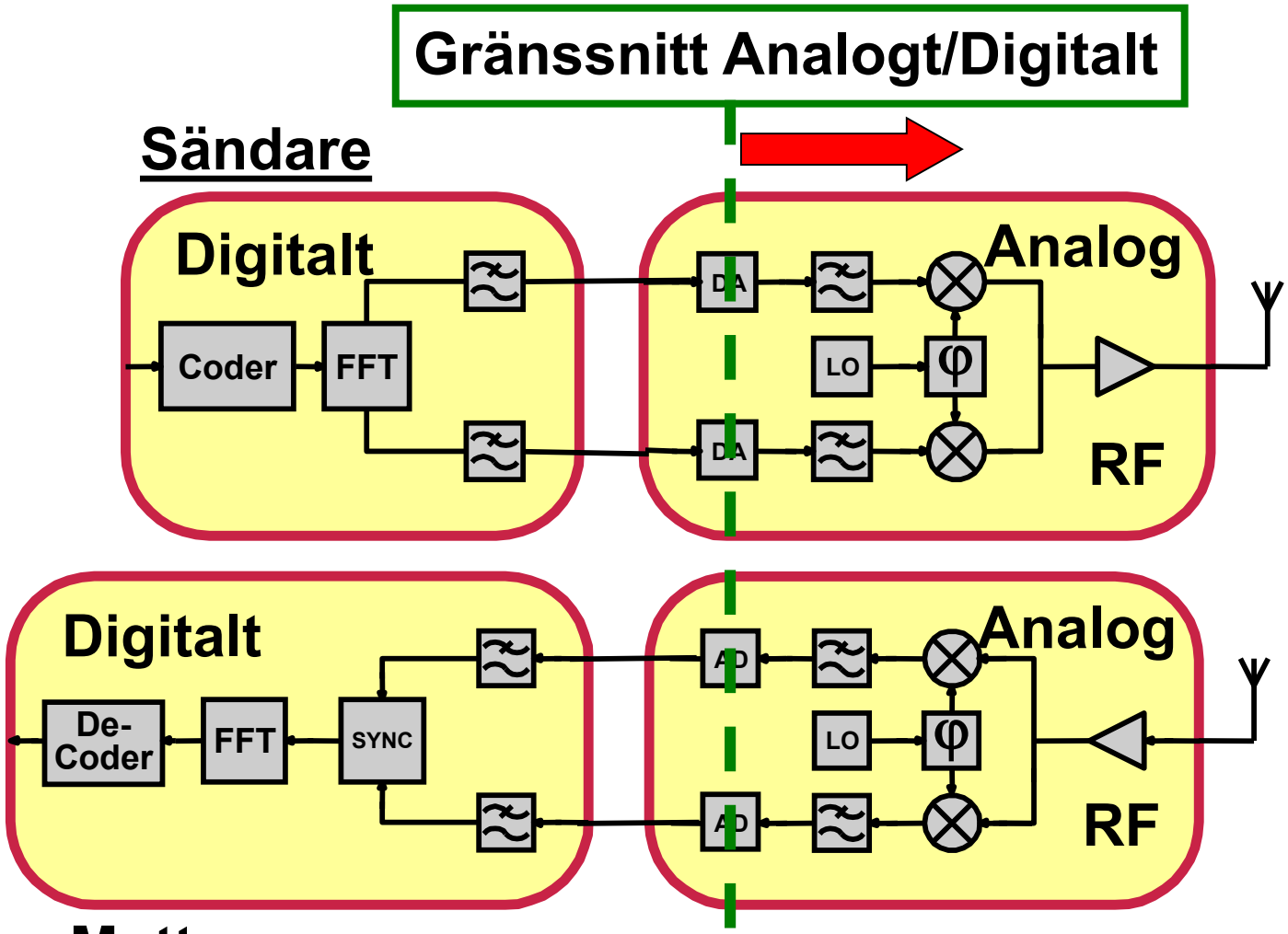
DA-Omvandling

Förstärkning
Filtrering
Omvandling

Sensor

Aktor

AD/DA i Trådlös Kommunikation



Där vi kan använda digital elektronik vill vi göra det!

Binära Talsystemet

Varje tal representeras av en uppsättning *bitar*

En bit är antingen 0 eller 1

N antal bitar: 2^N möjliga kombinationer (*ord*)

Binära Talsystemet - Exempel

MSB =
Most Significant Bit

LSB =
Least Significant Bit
Minsta förändringen

2^2	2^1	2^0	
0	0	0	(0)
0	0	1	(1)
0	1	0	(2)
0	1	1	(3)
1	0	0	(4)
1	0	1	(5)
1	1	0	(6)
1	1	1	(7)

0V

V_{fs}

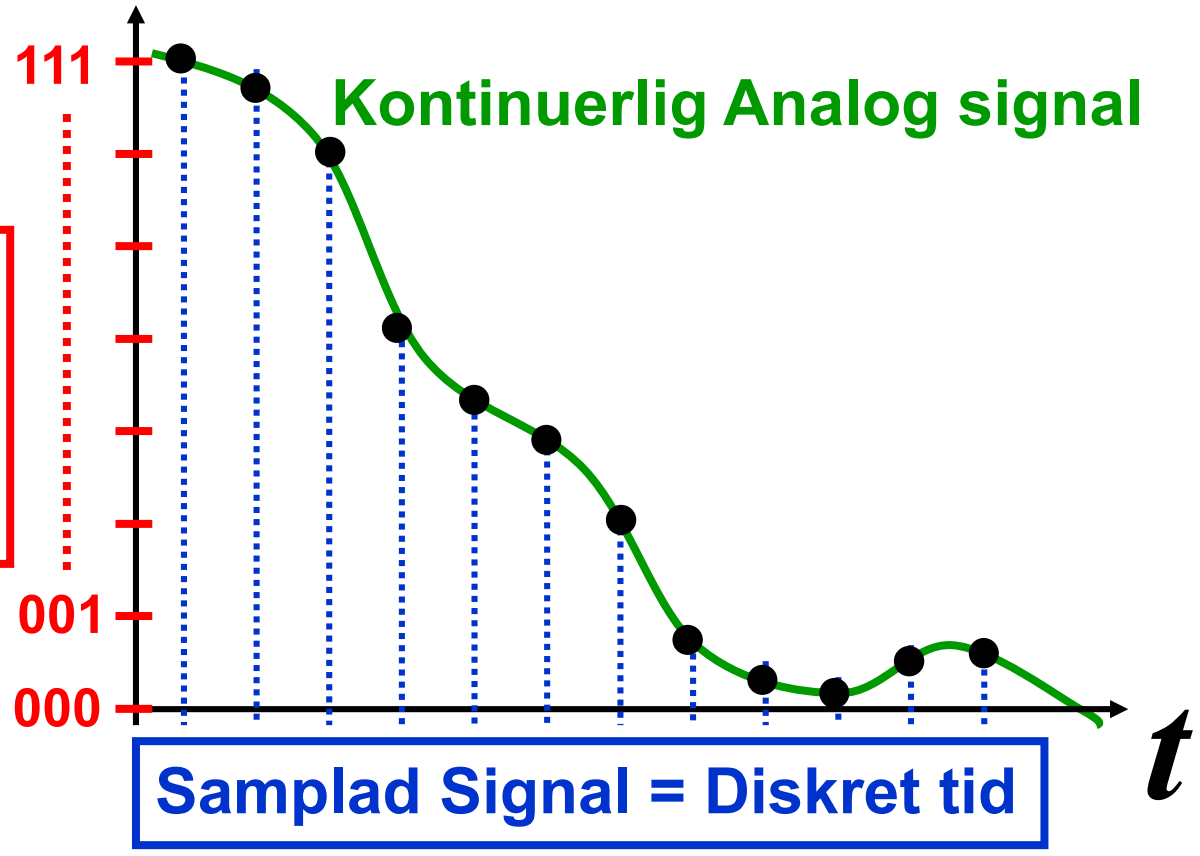
3 bitar

2^3 = 8 ord

V_{fs} =
V full scale =
1LSB*2^N
(Med denna definition kan inte V_{fs} nås)

$V_{outmax} = V_{LSB}(2^N-1)$

Digitala Signaler

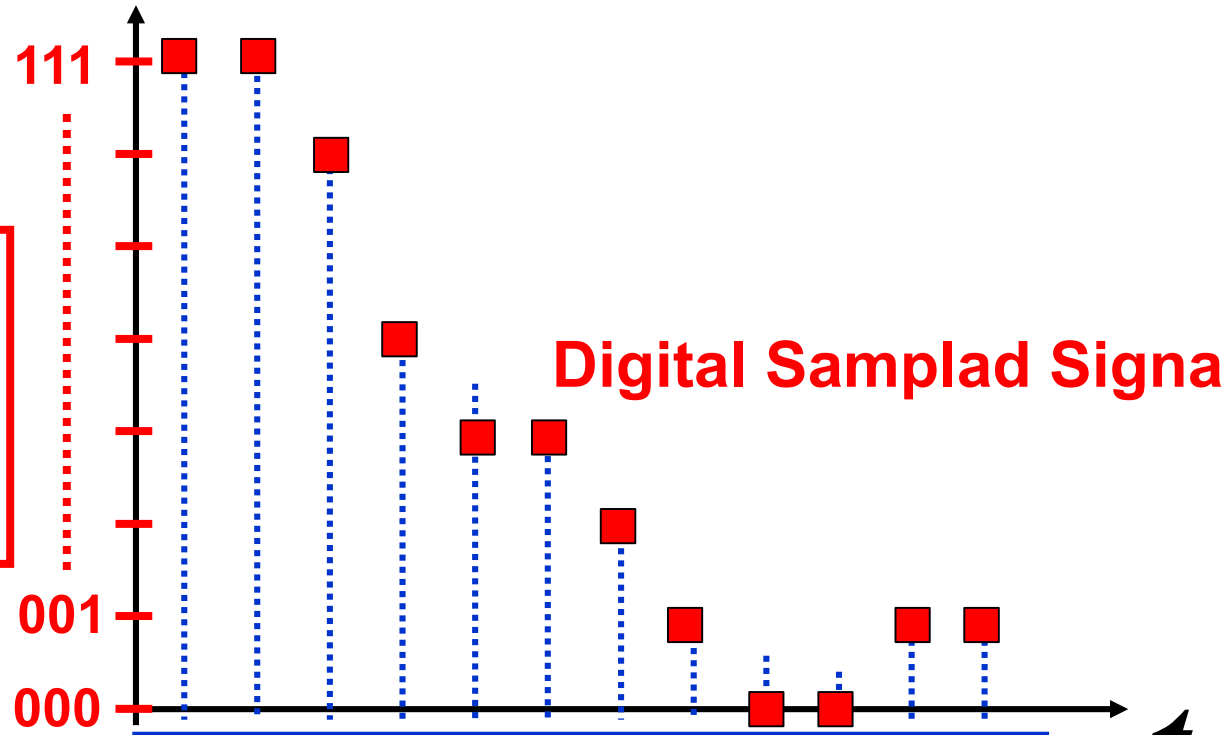


Kvantisering =
Begränsat antal
nivåer =
Diskret Amplitud

Samplad Signal = Diskret tid

Digital Signal = Diskret tid och amplitud

Digitala Signaler



Kvantisering =
Begränsat antal
nivåer =
Diskret Amplitud

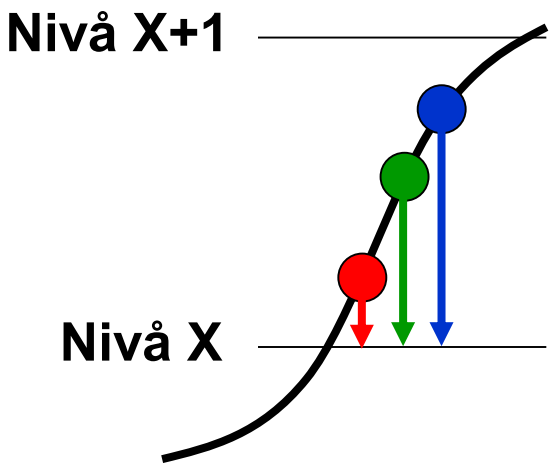
1. 111
2. 111
3. 110
4. 101
5. 011
6. 011
7. 010
8. 001
9. 000
10. 000
11. 001
12. 001

Digital Signal = Diskret tid och amplitud

Dynamik och Upplösning

Antal bitar	Antal Intervall	Upplösning V_{fs}=0.5V	Dynamik $20log(2^N)$
4	16	0.03125 V	24dB
8	256	2 mV	48dB
12	4096	0.12 mV	72dB
16	65 536	7.6 μV	96dB
24	16 777 216	29.8 nV	144dB

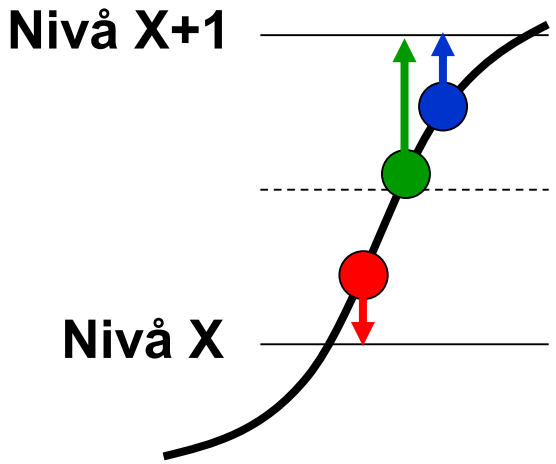
Kvantiseringsfel



Trunkering

Alla värden mellan två nivåer approximeras åt samma håll

Maximalt fel = 1LSB



Avrundning

Värden approximeras antingen upp eller ner

Maximalt fel = 1/2 LSB

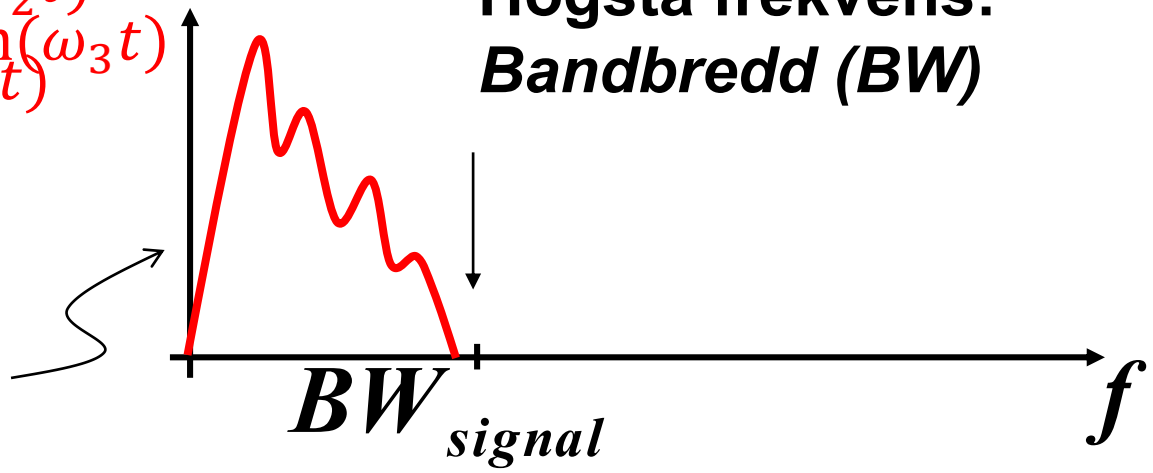
Sampling

Bandbredd hos signal

Alla verkliga signaler kan uttryckas som en serie av cosinustermer med olika frekvens.

Nicola Kuperus, Adult.

$$A_1\sin(\omega_1 t)$$
$$A_2\sin(\omega_2 t)$$
$$A_3\sin(\omega_3 t)$$
$$A_4\sin(\omega_4 t)$$
$$\ldots$$



Audio: BW 20Hz – 20 kHz

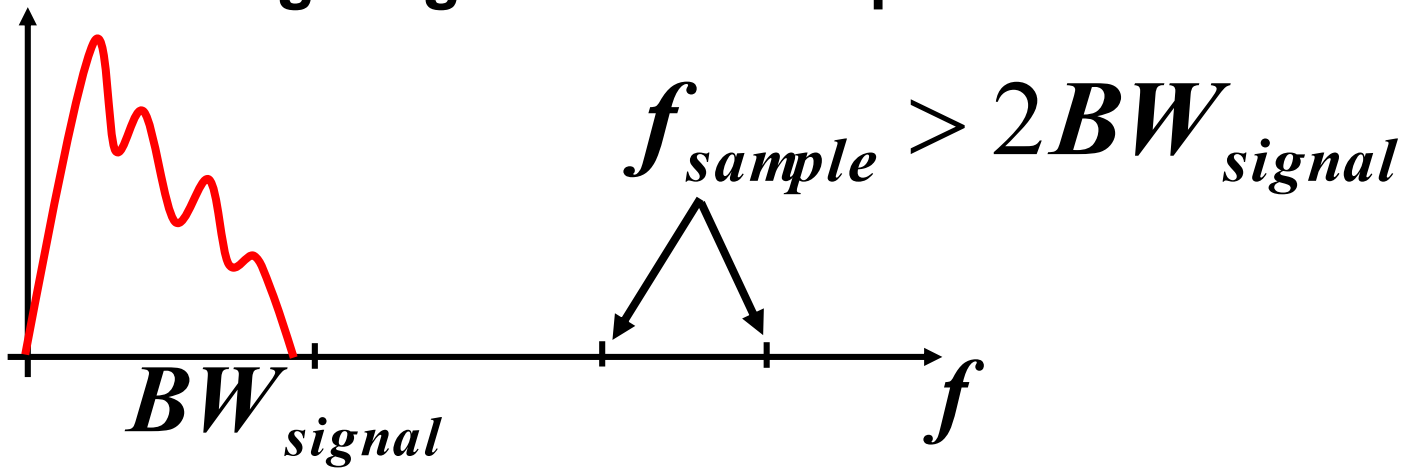
System & Transformer

Nyquists Samplingsteorem

Om man samplar en analog signal med en bandbredd, BW_{signal}, med en samplingsfrekvens

$$f_{sample} > 2BW_{signal}$$

kan den analoga signalen återskapas.



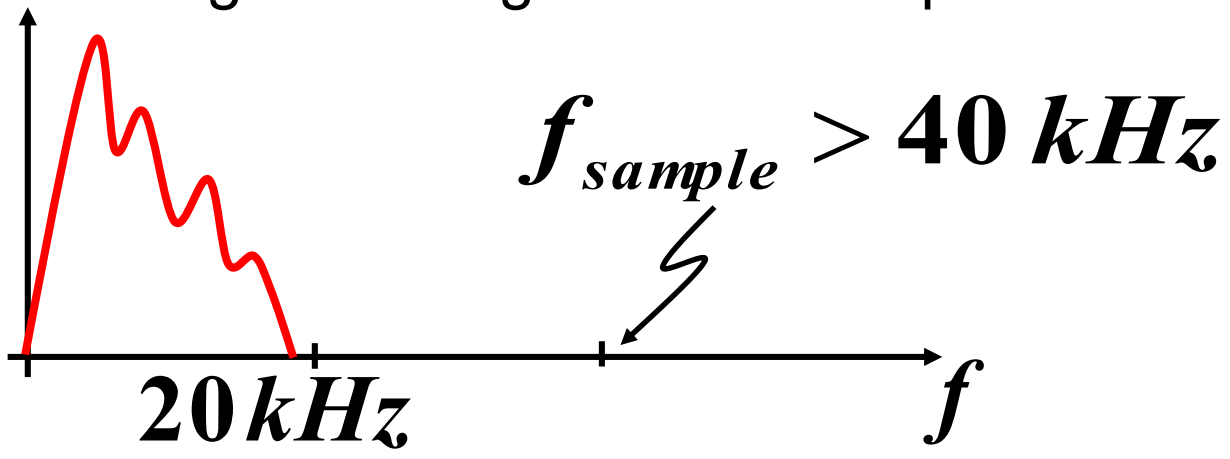
Mer om detta i Digital Signalbehandling

Nyquists Samplingsteorem - Audio

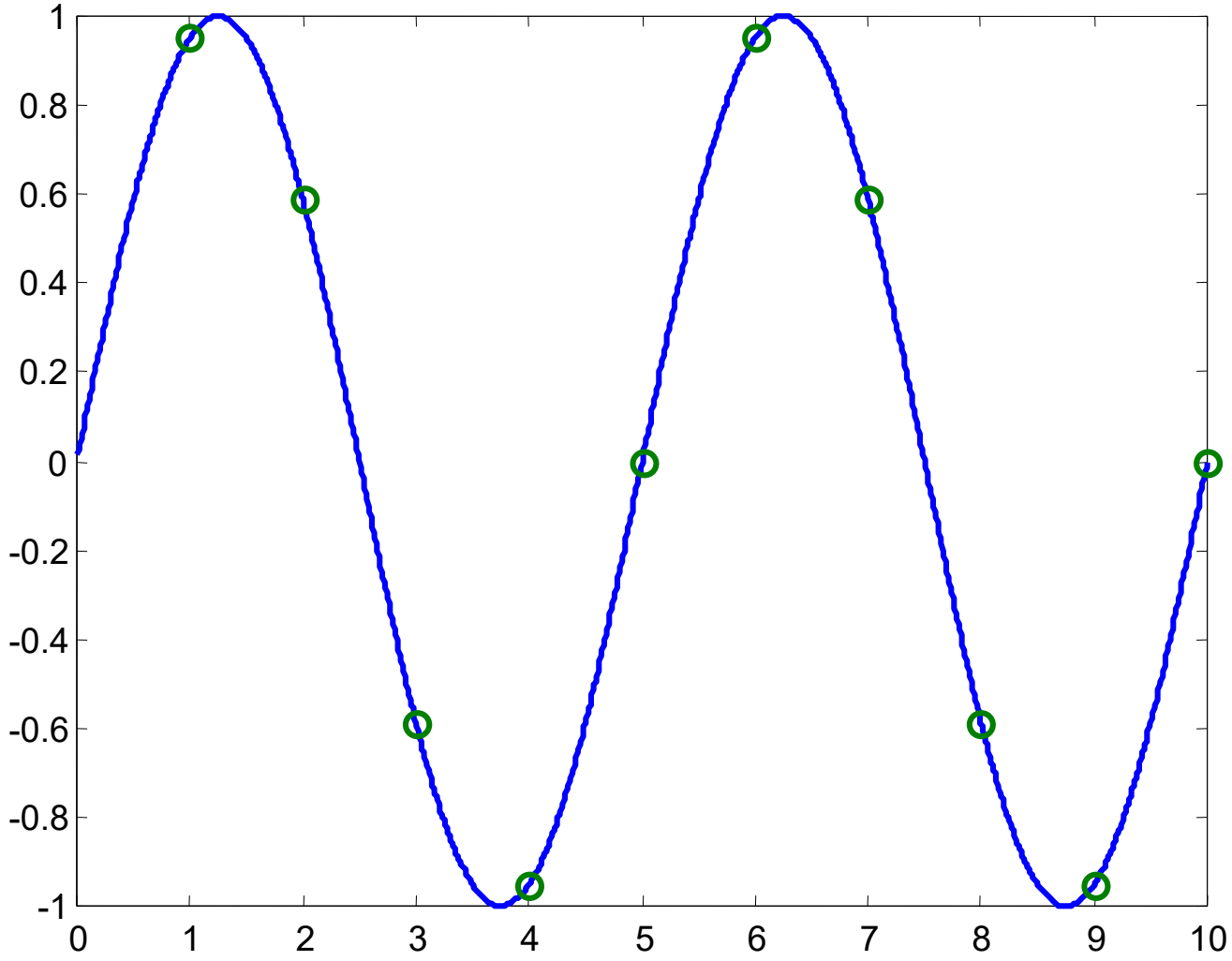
Det mänskliga örat har en bandbredd 20Hz-20kHz, om

$$f_{sample} > 2 \times 20kHz = 40kHz$$

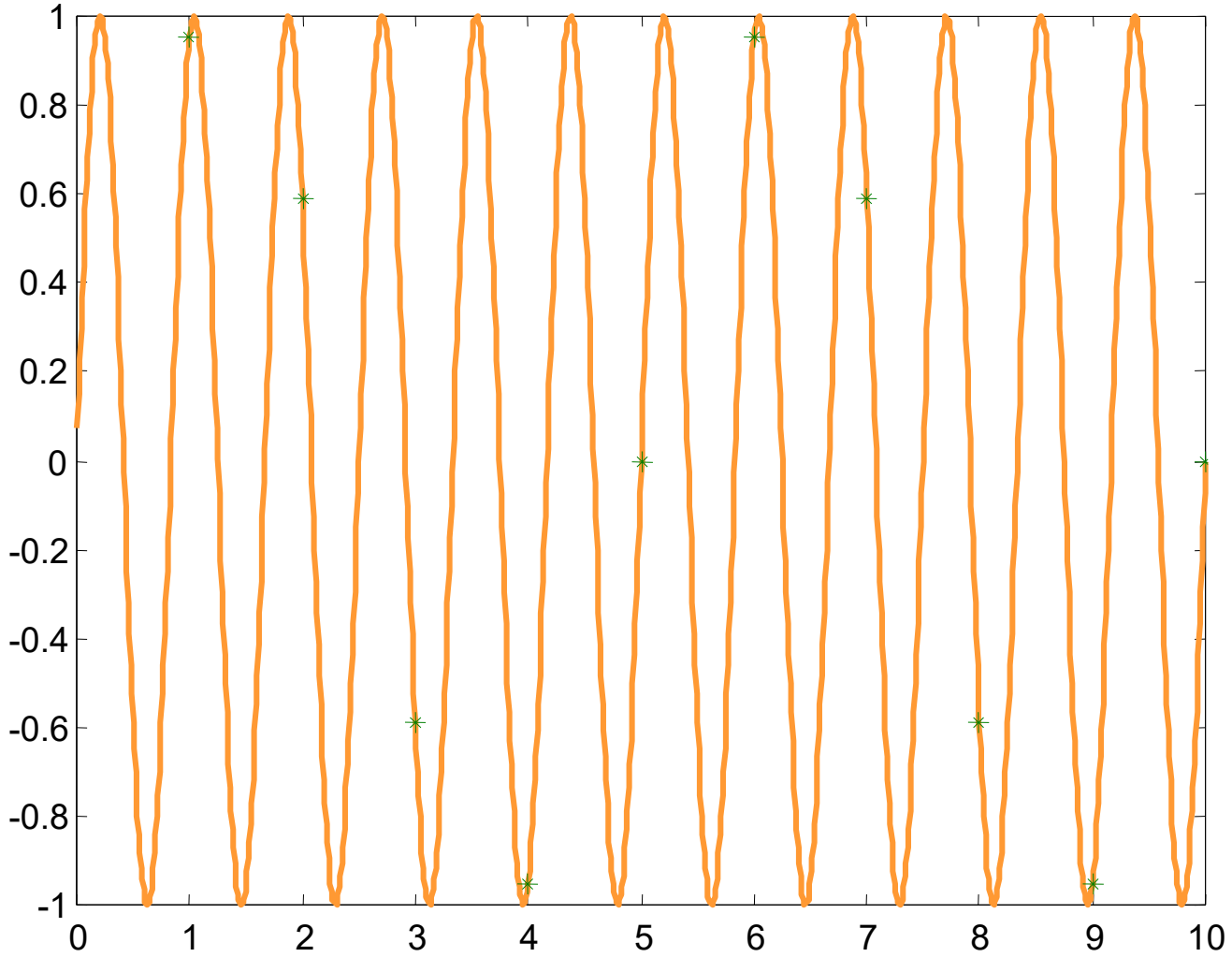
kan den analoga audiosignalen återskapas.



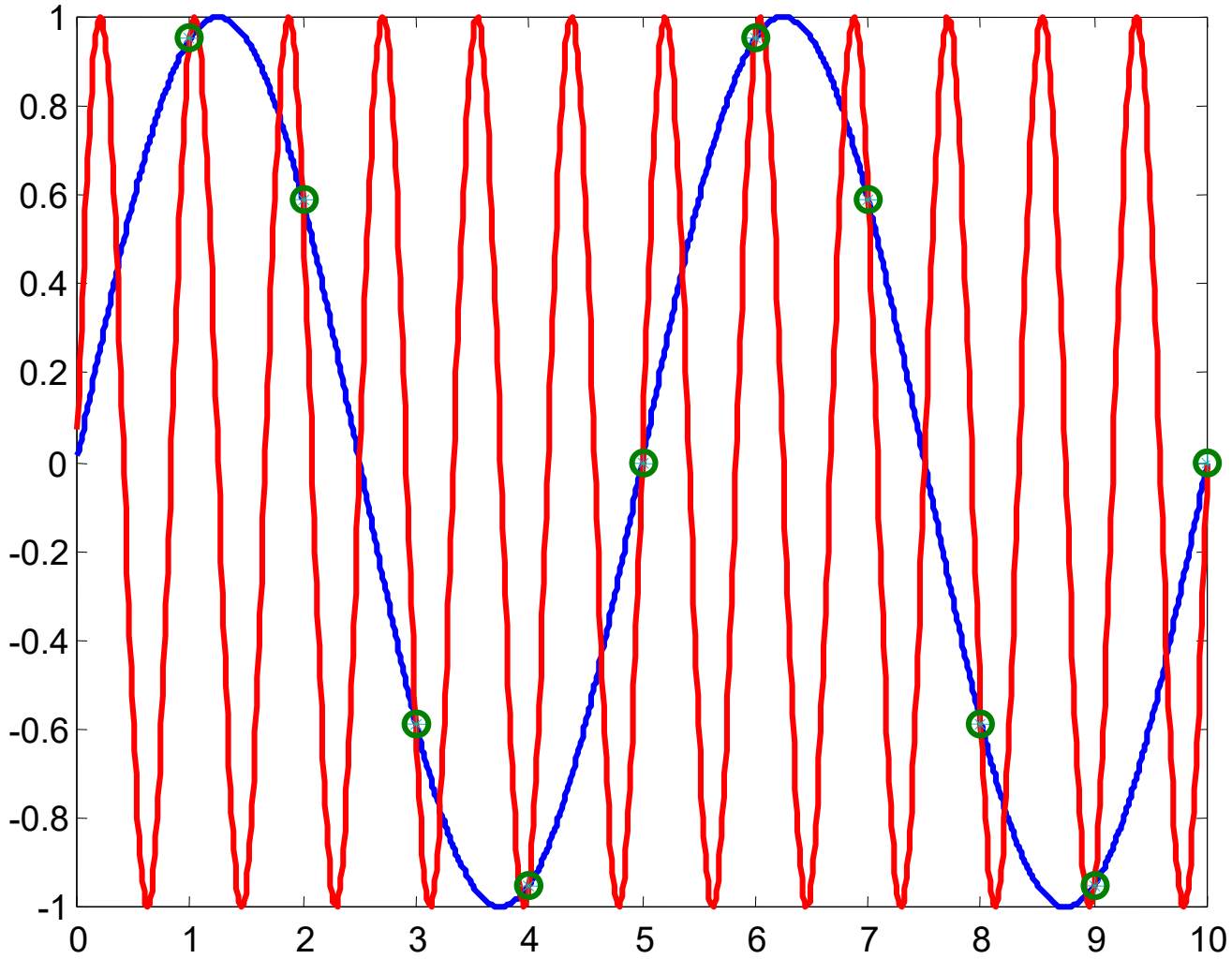
Sampling – $f_s > 2f_{signal}$



Sampling – $f_s < 2f_{signal}$

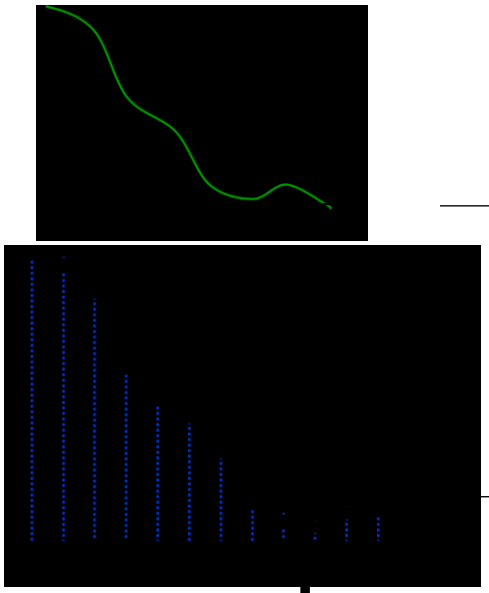


Signalerna kan förväxlas - vikning

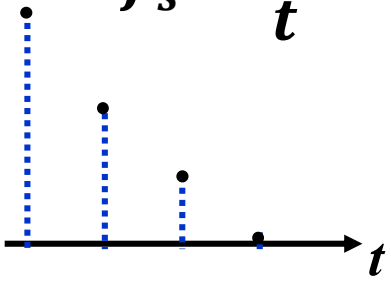


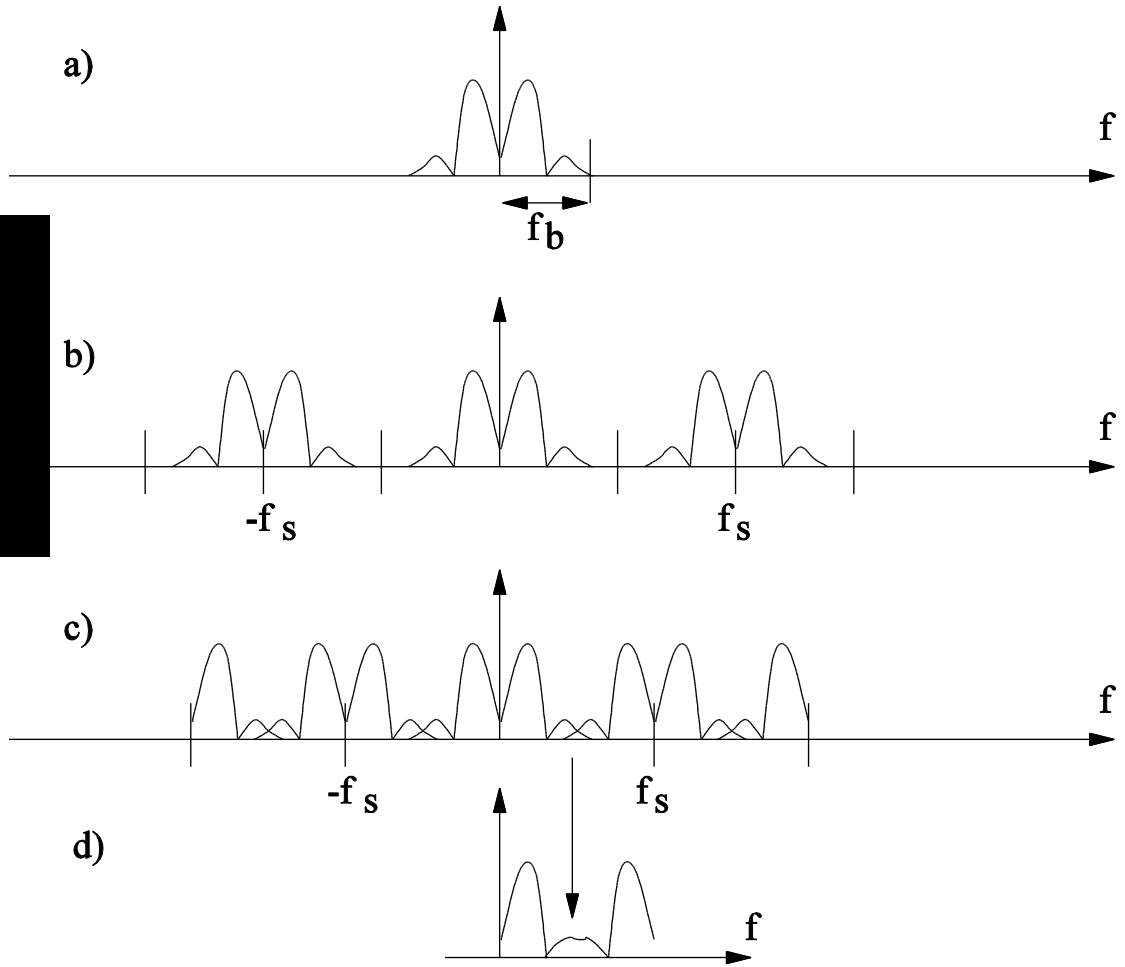
Optisk vikning - Moire

Matematik - vikning vid $f_s < 2f_b$



$$\longleftrightarrow f_s = \frac{1}{t}$$





Negativa frevkenser kommer från komplex representation.

CD kontra FLAC

Specification	CD Audio	FLAC
Sampling Rate	44.1 kHz	<655 kHz
Sampling Accuracy	16-bit	<32-bit
Number of Possible Output Levels	65,536 (96 dB)	$<4.295\times10^{9}$ (192 dB)

Hörsel – Dynamik 130 dB

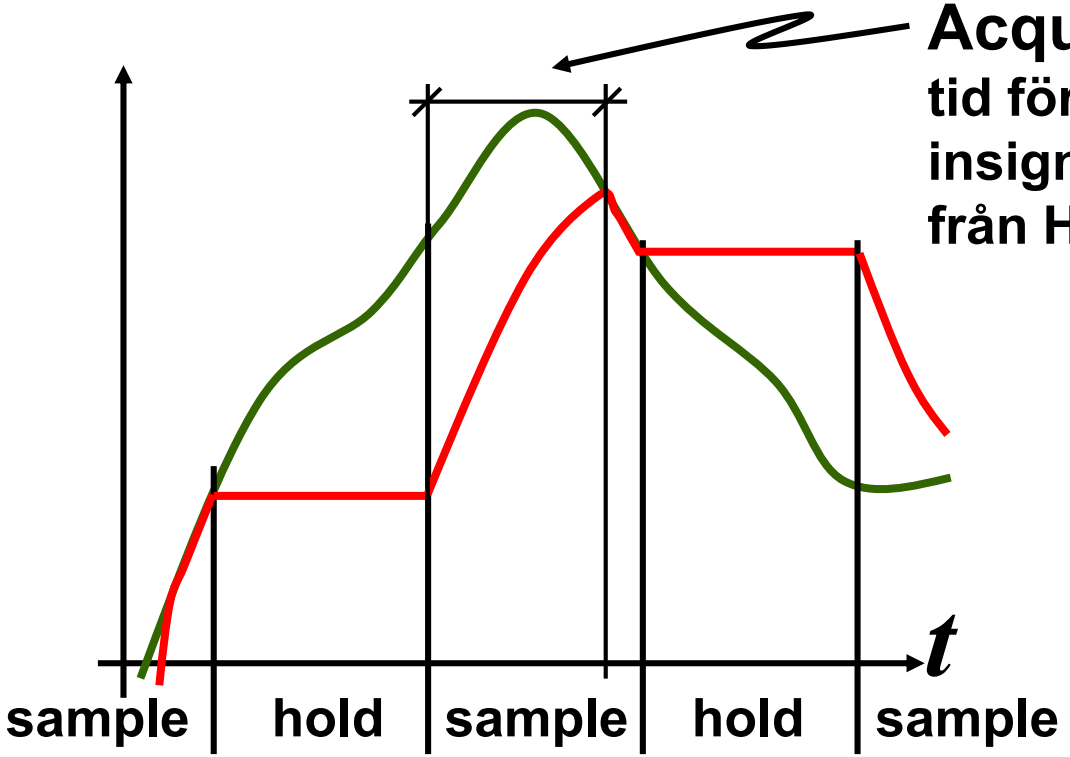
LP – Dynamik ~65 dB

Sample & Hold

Det tar en viss tid att omvandla en analog signal till ett digitalt ord

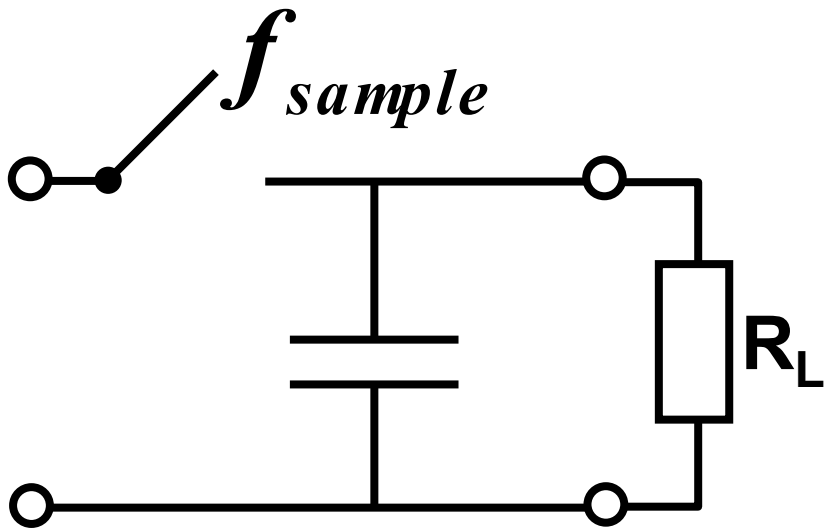
Sample & Hold

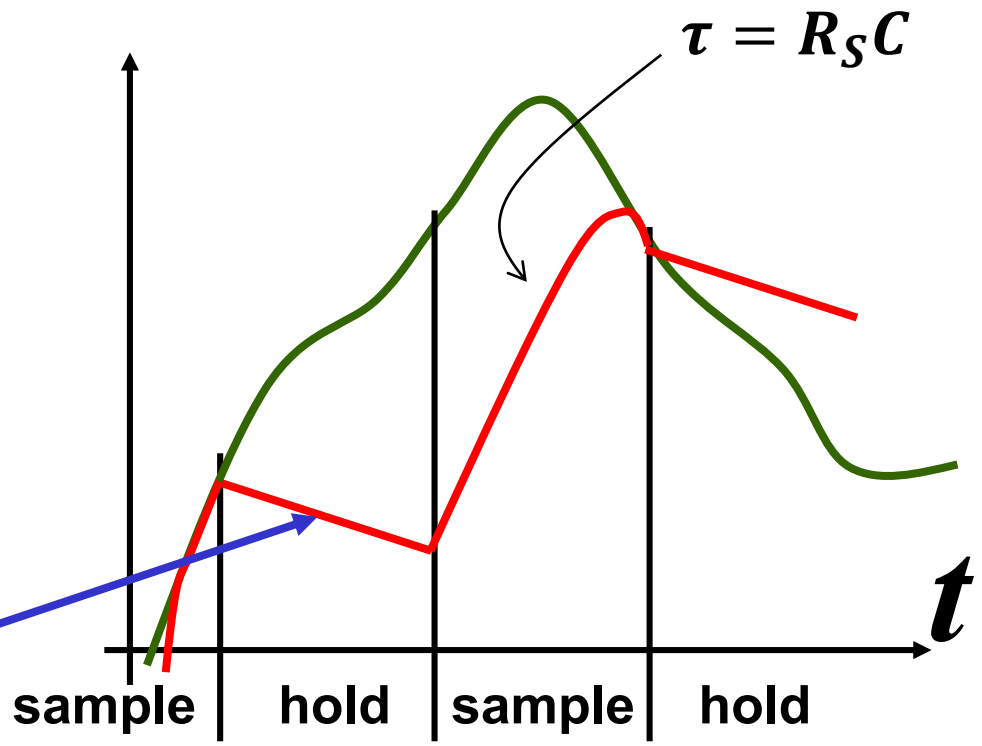
Under AD-omvandlingen får inte det analoga värdet ändras ➡ **Sample & Hold krets**



Sample & Hold

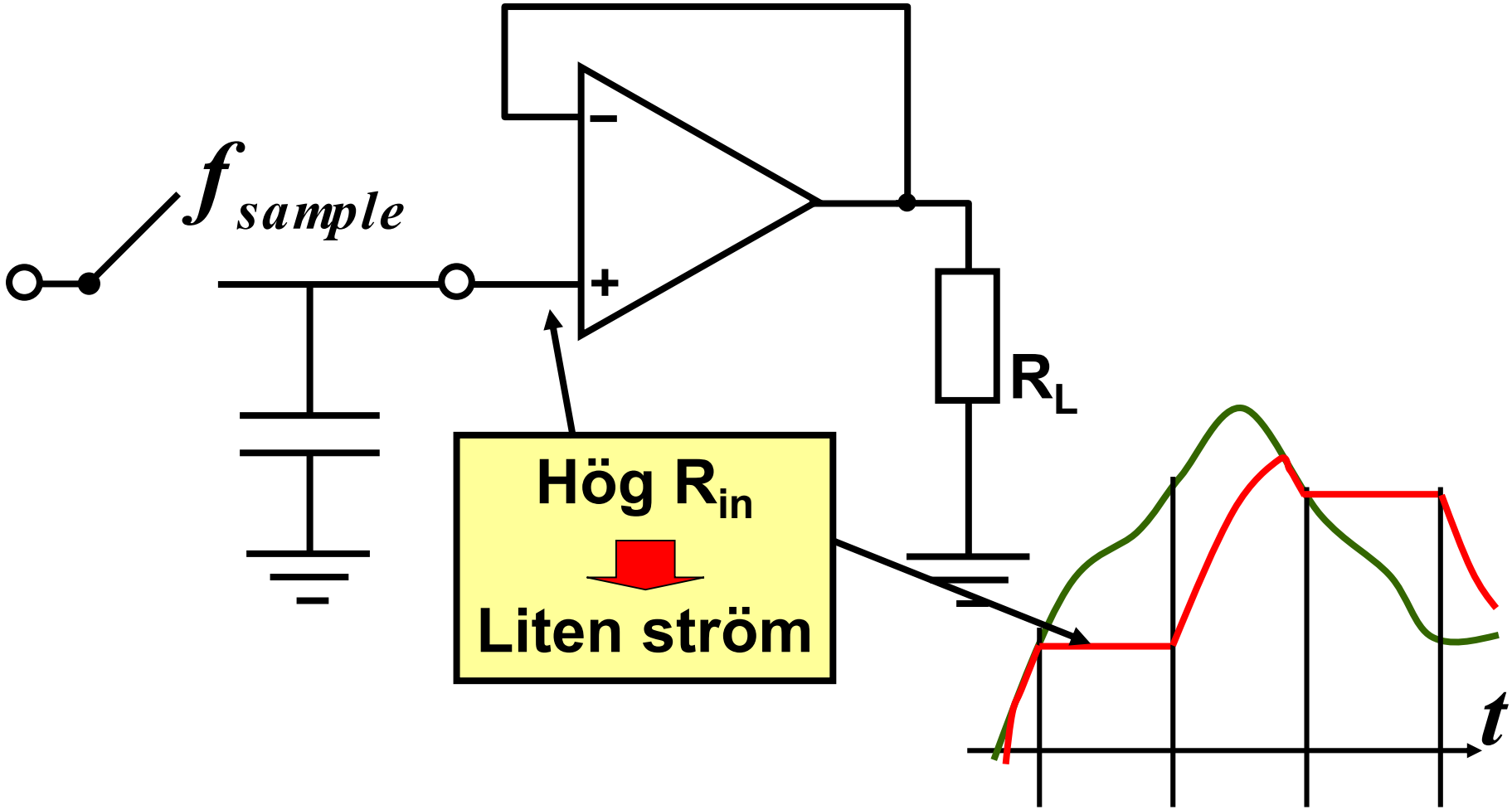
Spara ett analogtvärde ➡ **Kondensator**



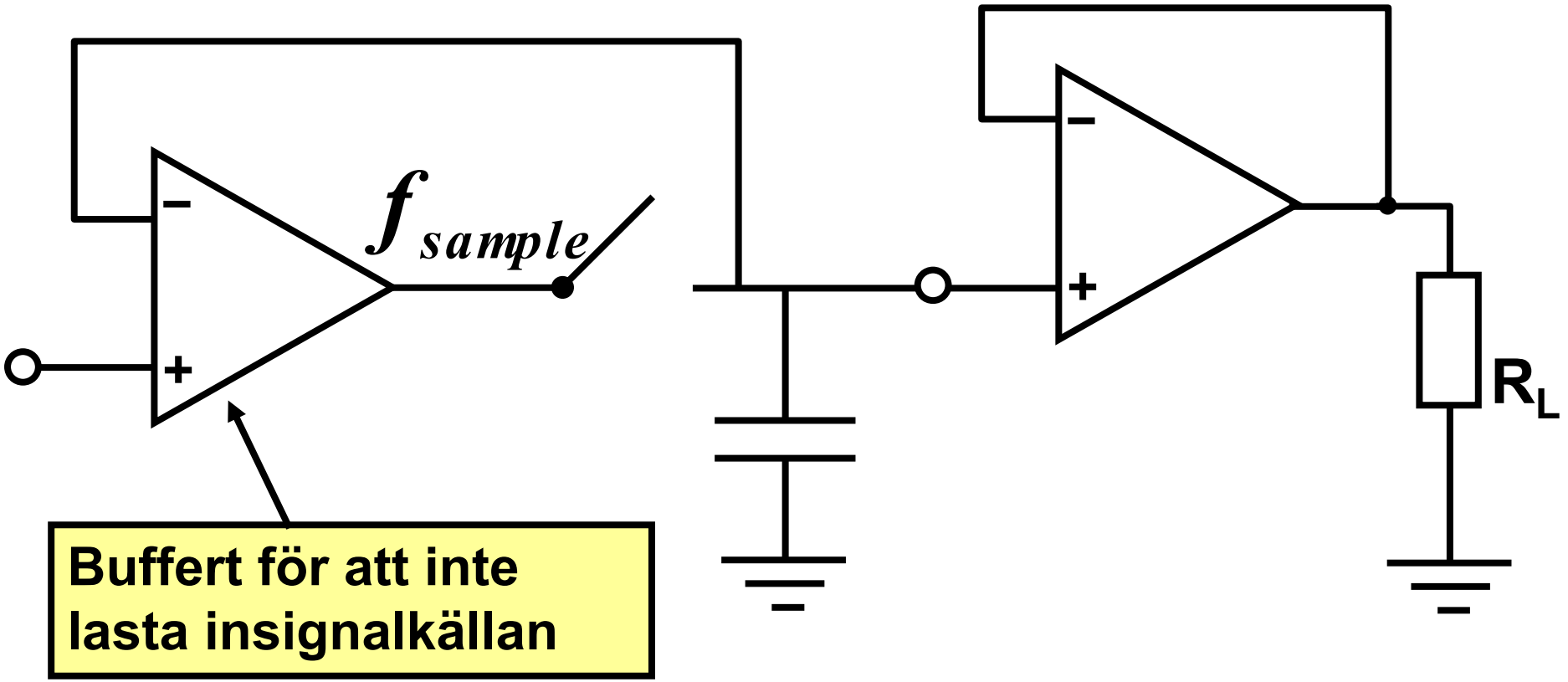


Droop rate = Kondensatorn laddas ur

Sample & Hold med Buffer

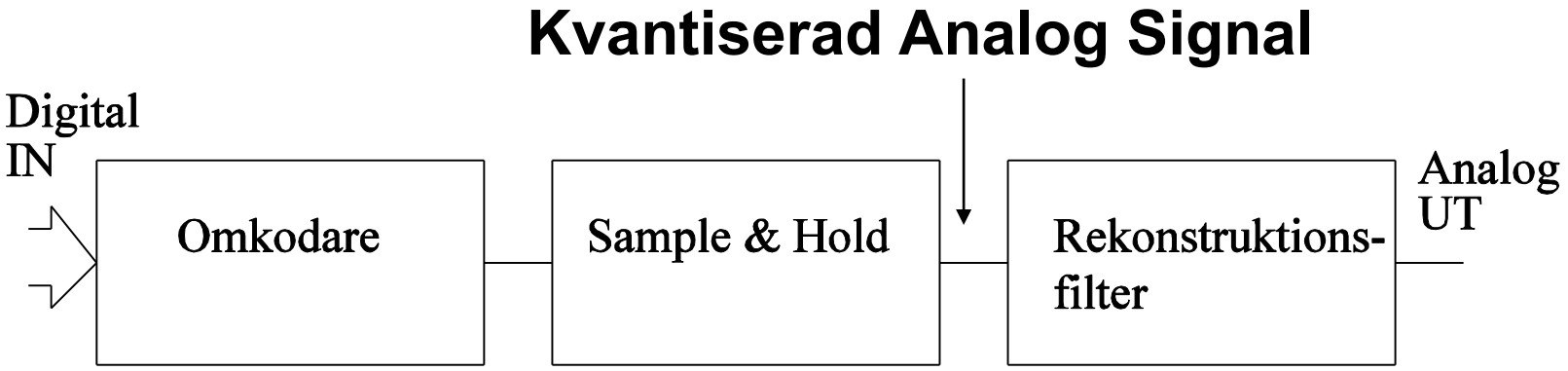


Sample & Hold med Buffer

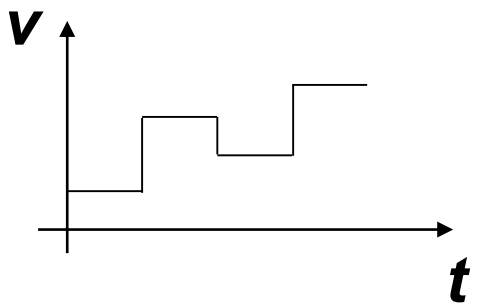


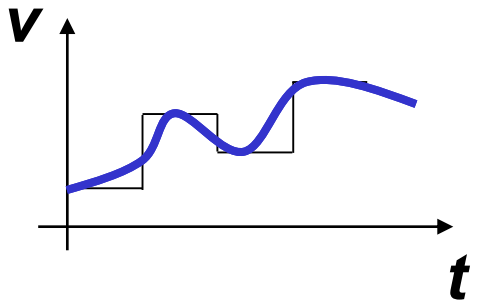
Digital till Analog omvandling

Princip för DA-omvandling

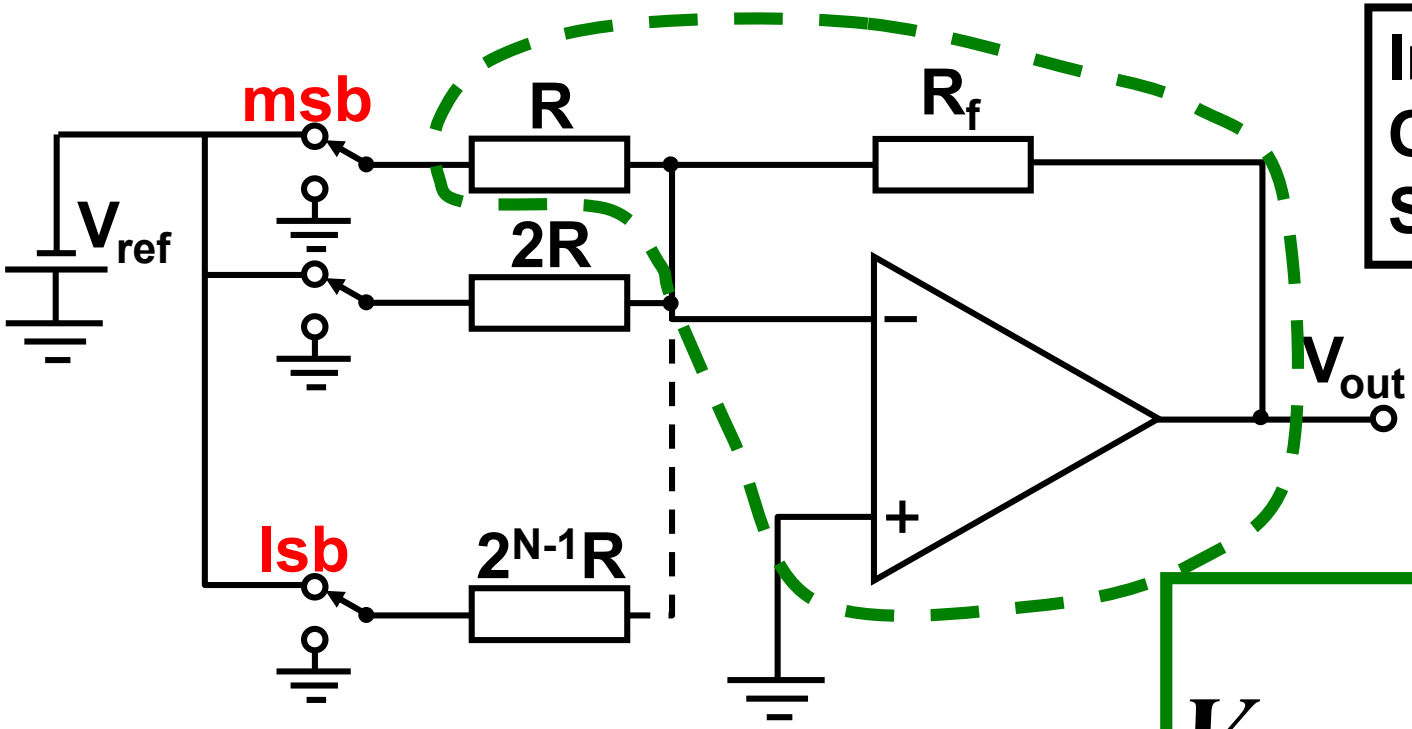


1. 01001001
2. 01001001
3. 00110010
4. 10000100
5. …





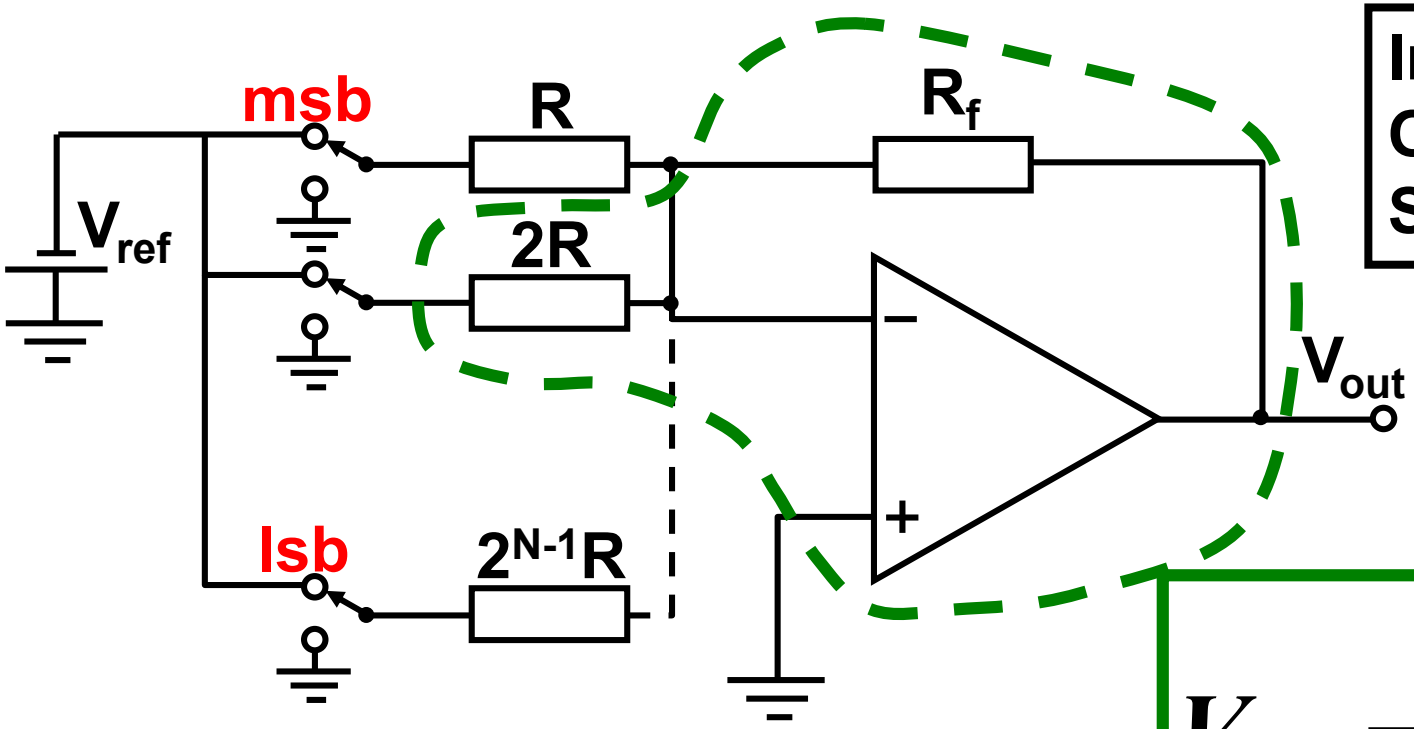
Digital till Analog Konvertering



Inverterande OP-koppling = Summatorn

$$V_{out} = \frac{R_f}{R} V_{ref}$$

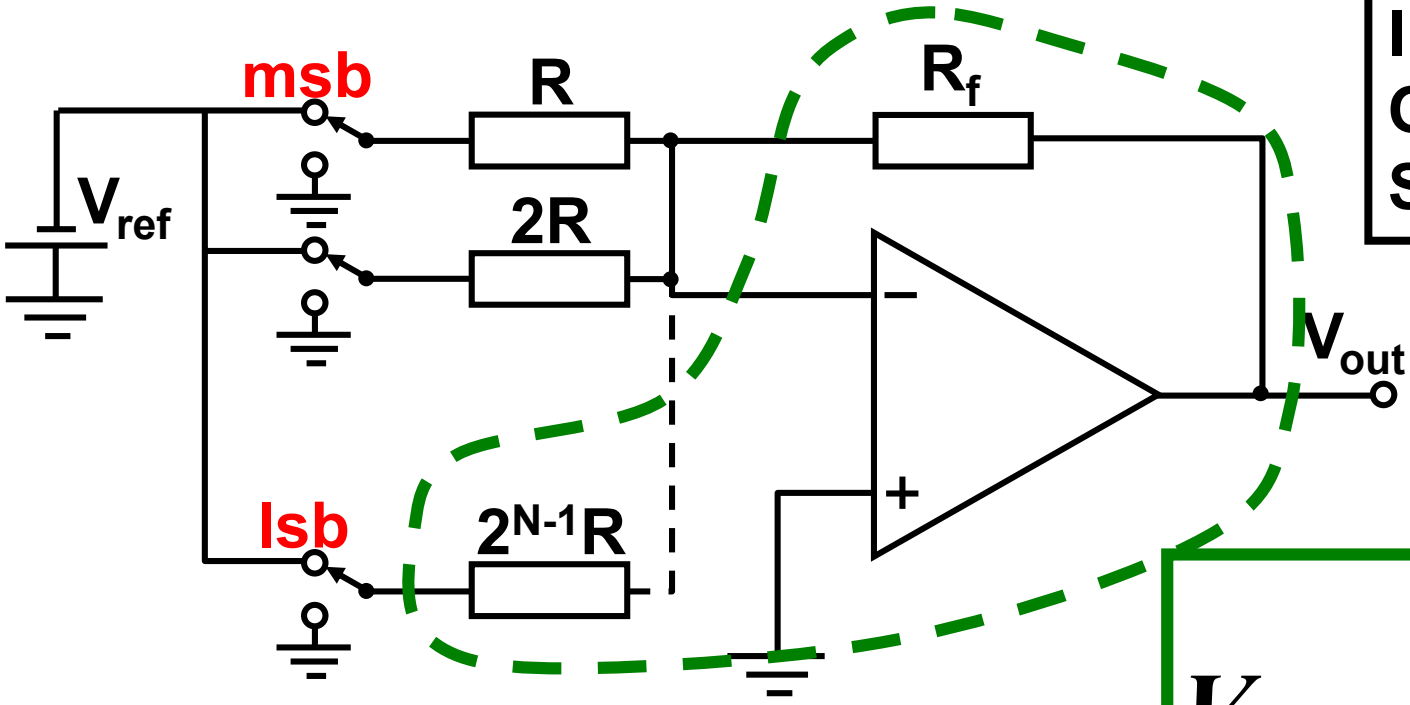
Digital till Analog Konvertering



Inverterande OP-koppling = Summatorn

$$V_{out} = \frac{R_f}{2R} V_{ref}$$

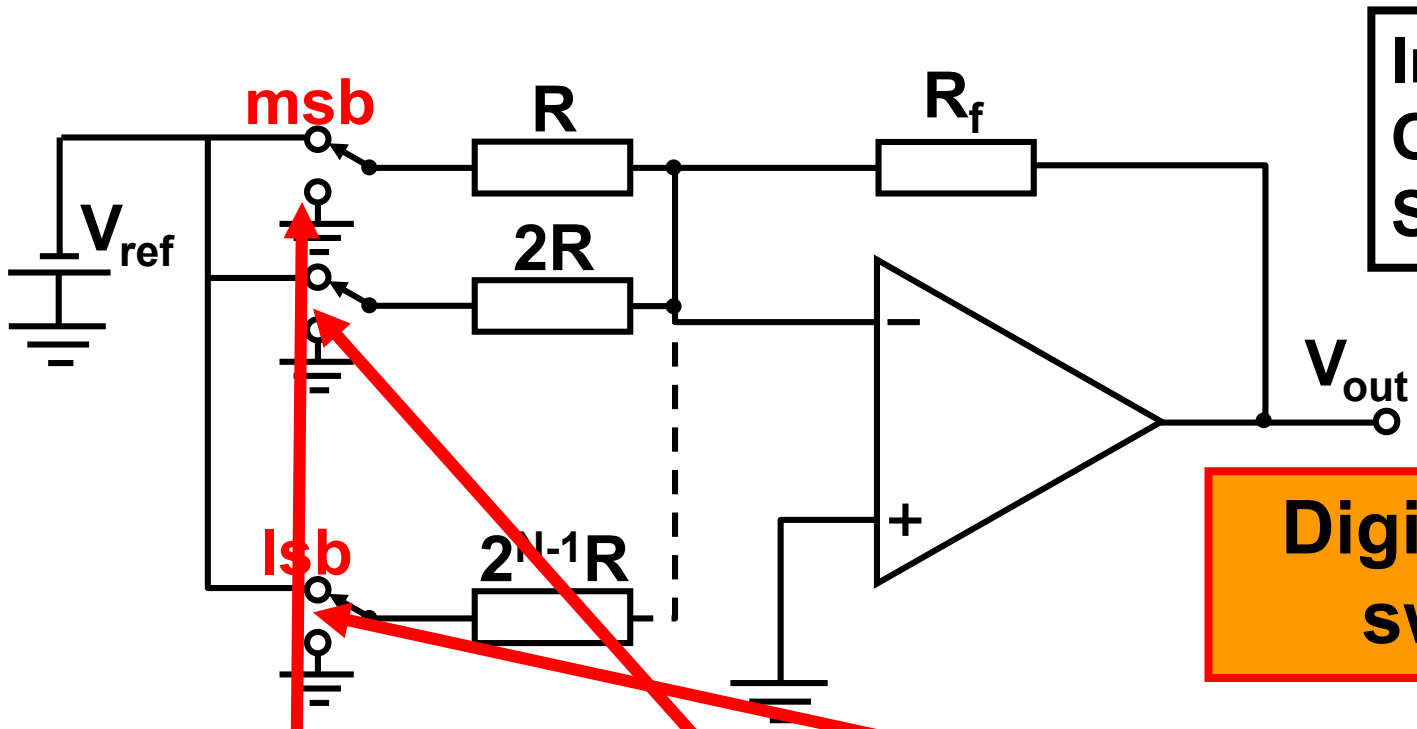
Digital till Analog Konvertering



Inverterande OP-koppling = Summatorn

$$V_{out} = \frac{R_f}{2^{N-1}R} V_{ref}$$

Digital till Analog Konvertering

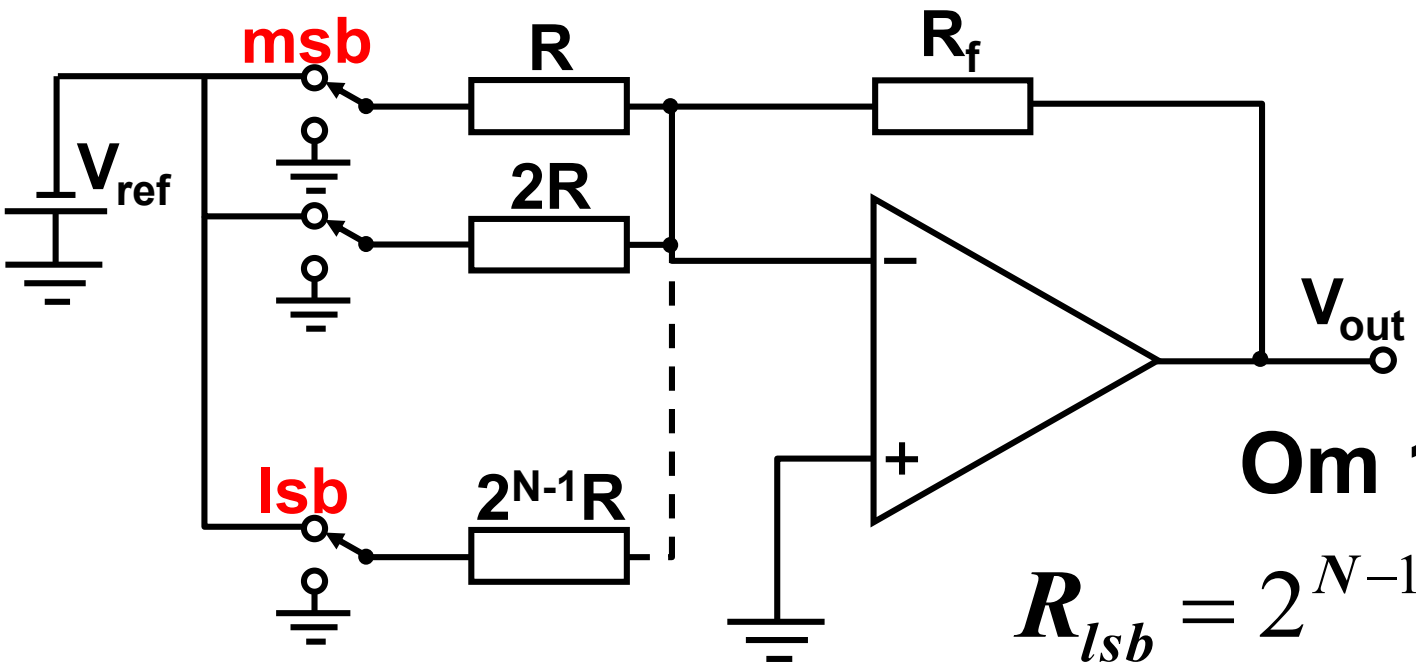


Inverterande OP-koppling = Summatorn

Digitalt ord styr switcharna

$$V_{out} = \left(msb\frac{R_f}{R} + (msb-1)\frac{R_f}{2R} + \ldots + lsb\frac{R_f}{2^{N-1}R} \right) V_{ref}$$

Digital till Analog Konvertering

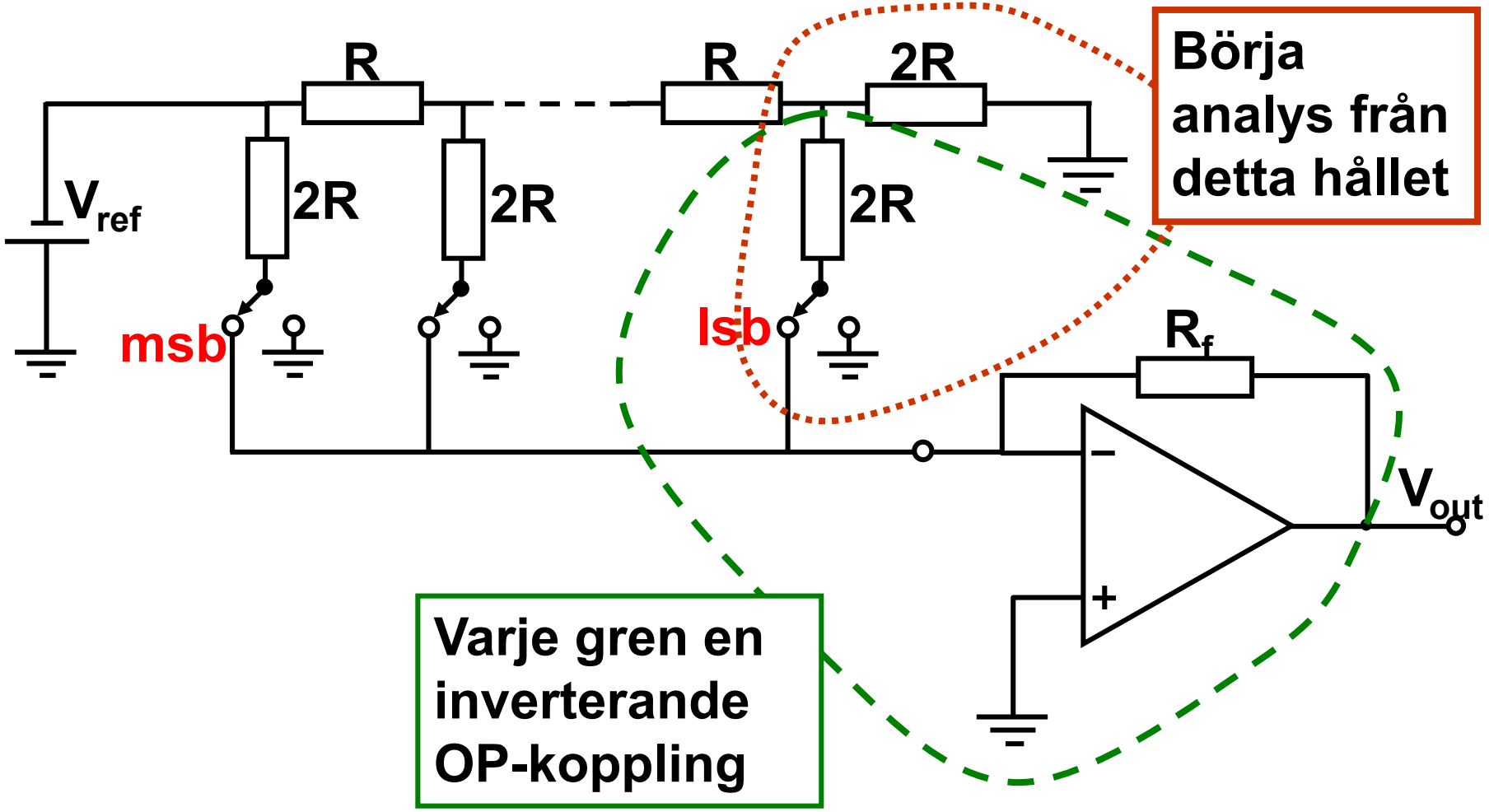


Om 16 bitar

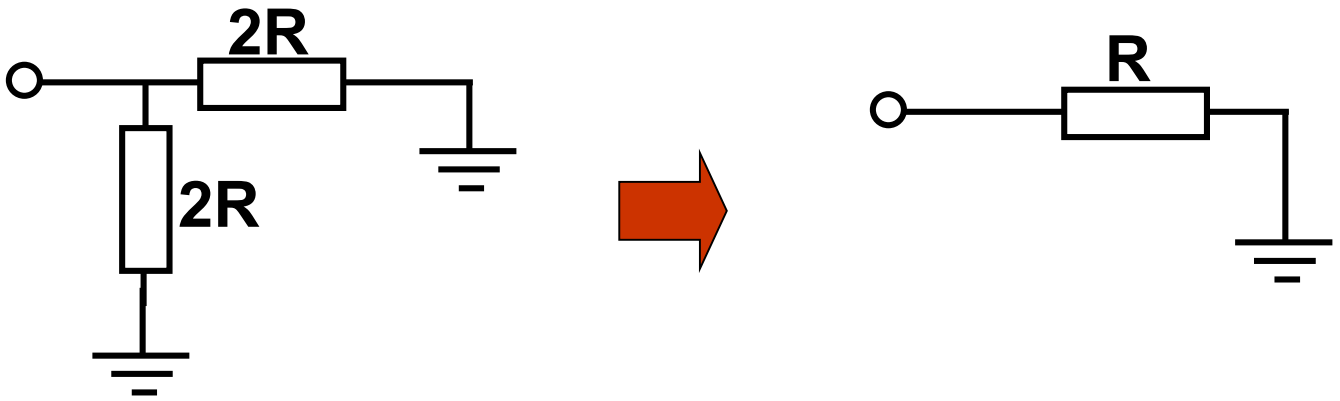
$$R_{lsb} = 2^{N-1} R = 32678\, R$$

Svårt med så stora motståndsvärden!
Litet antal bitar med relativt låga krav.

DA-omvandling - R/2R Stege



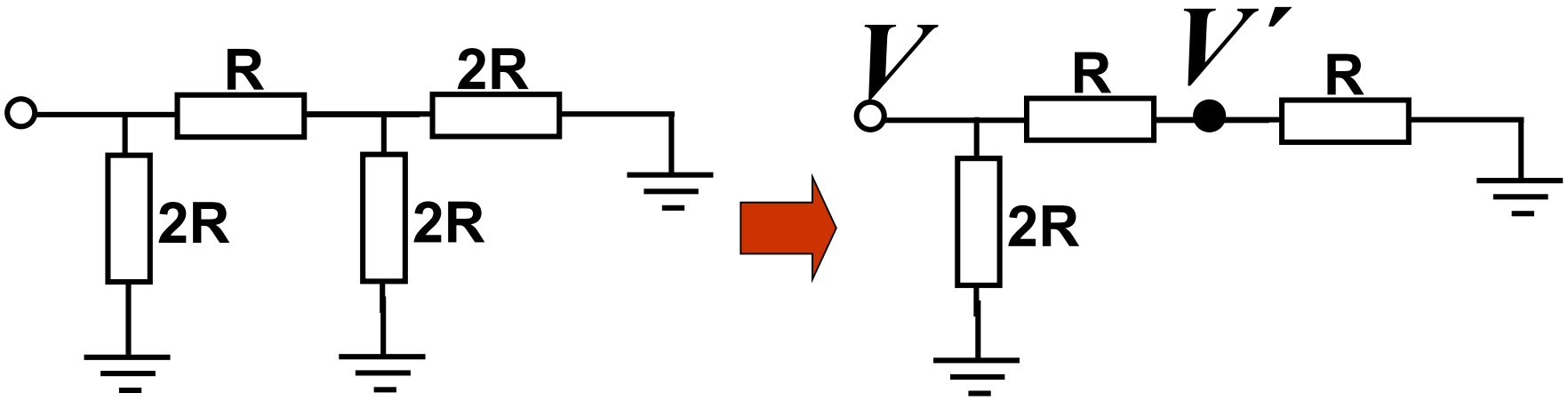
DA-omvandling - R/2R Stege



Parallellkoppling av motstånd

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_N}$$

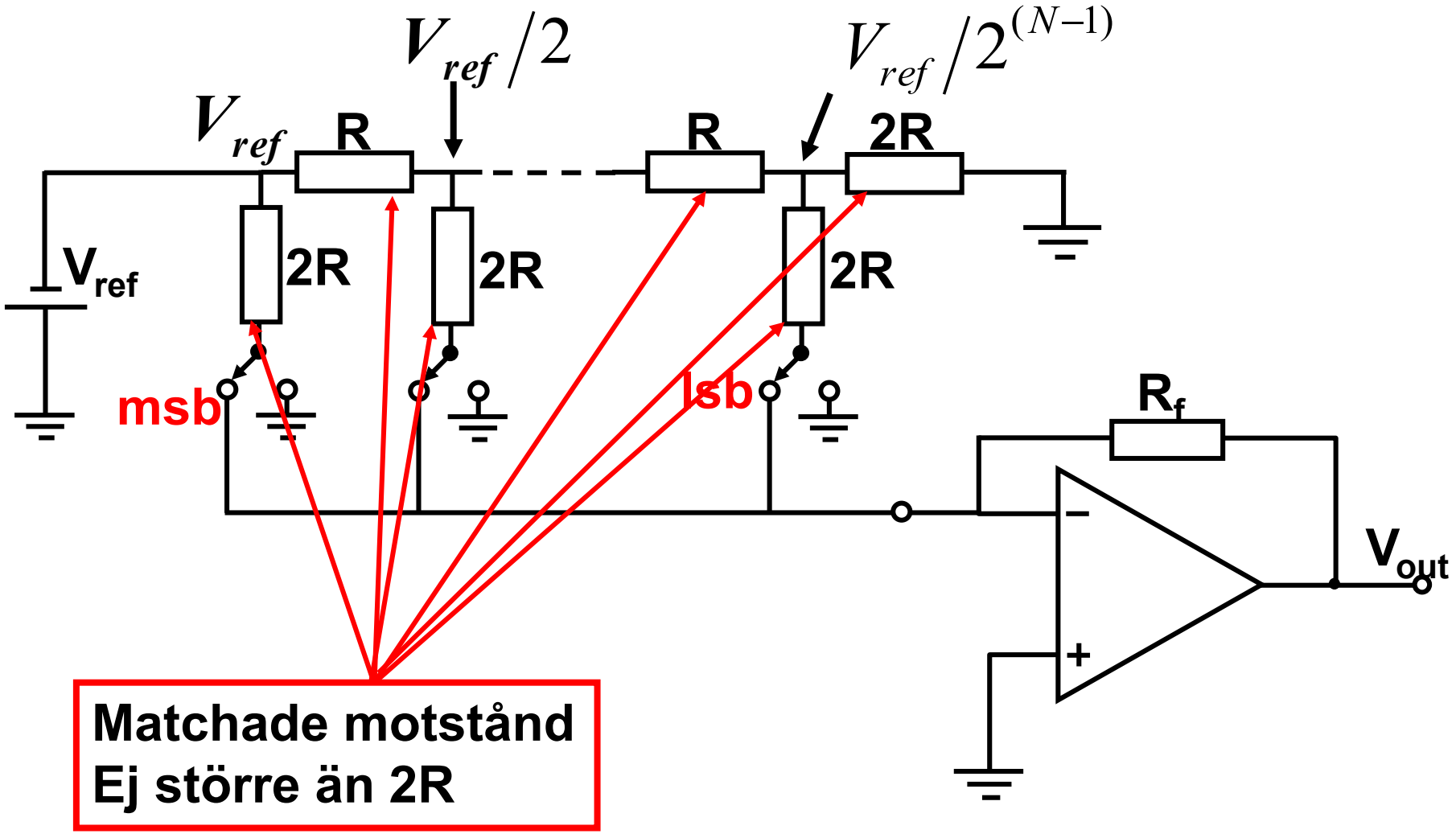
DA-omvandling - R/2R Stege



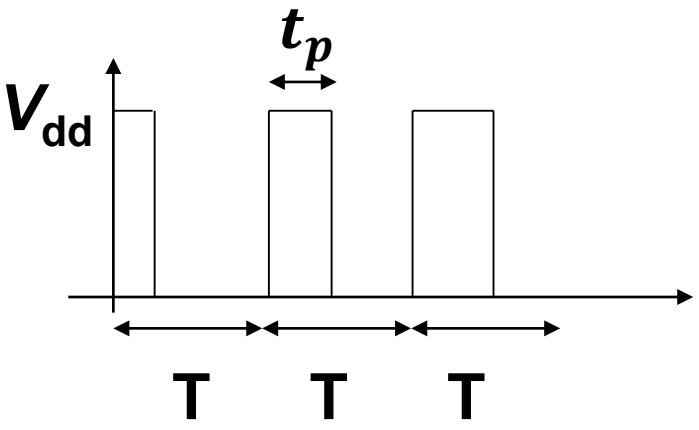
Spänningshalvering i varje steg

$$V' = \frac{R}{R+R} V = \frac{V}{2}$$

DA-omvandling - R/2R Stege

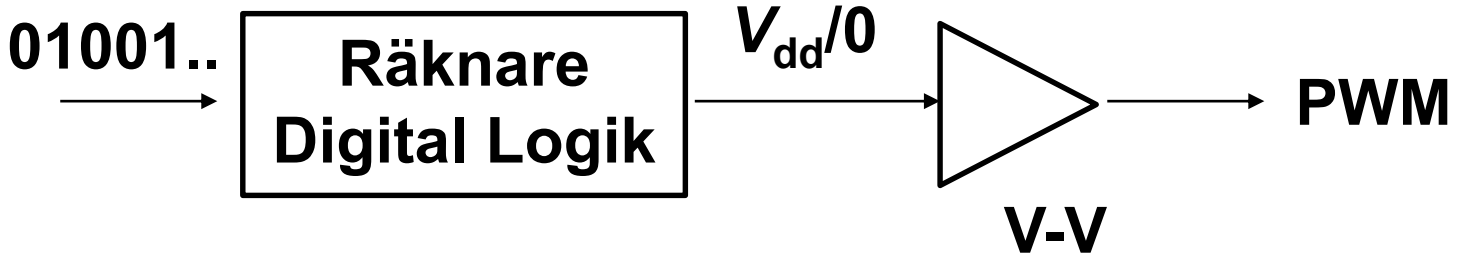


DAC - Pulse Width Modulation (PWM)

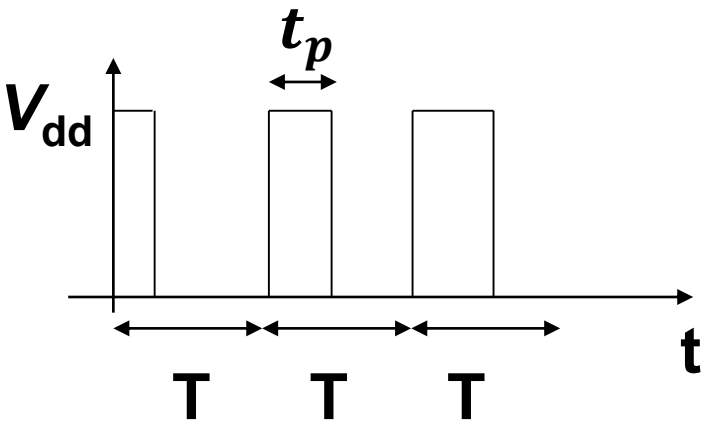


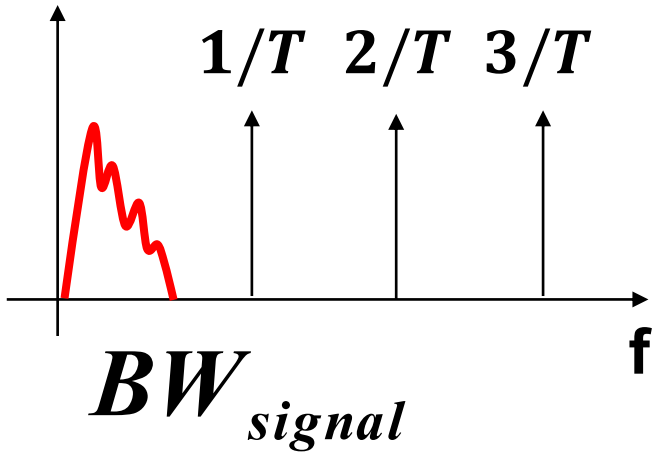
Set av pulser med fix tid T
Digital elektronik genererar olik a pulslängder
Amplitud väljs genom t_p

$$\overline{v_{ut}(t)} = \frac{V_{dd}\, t_p(t)}{T}$$



DAC - Pulse Width Modulation (PWM)





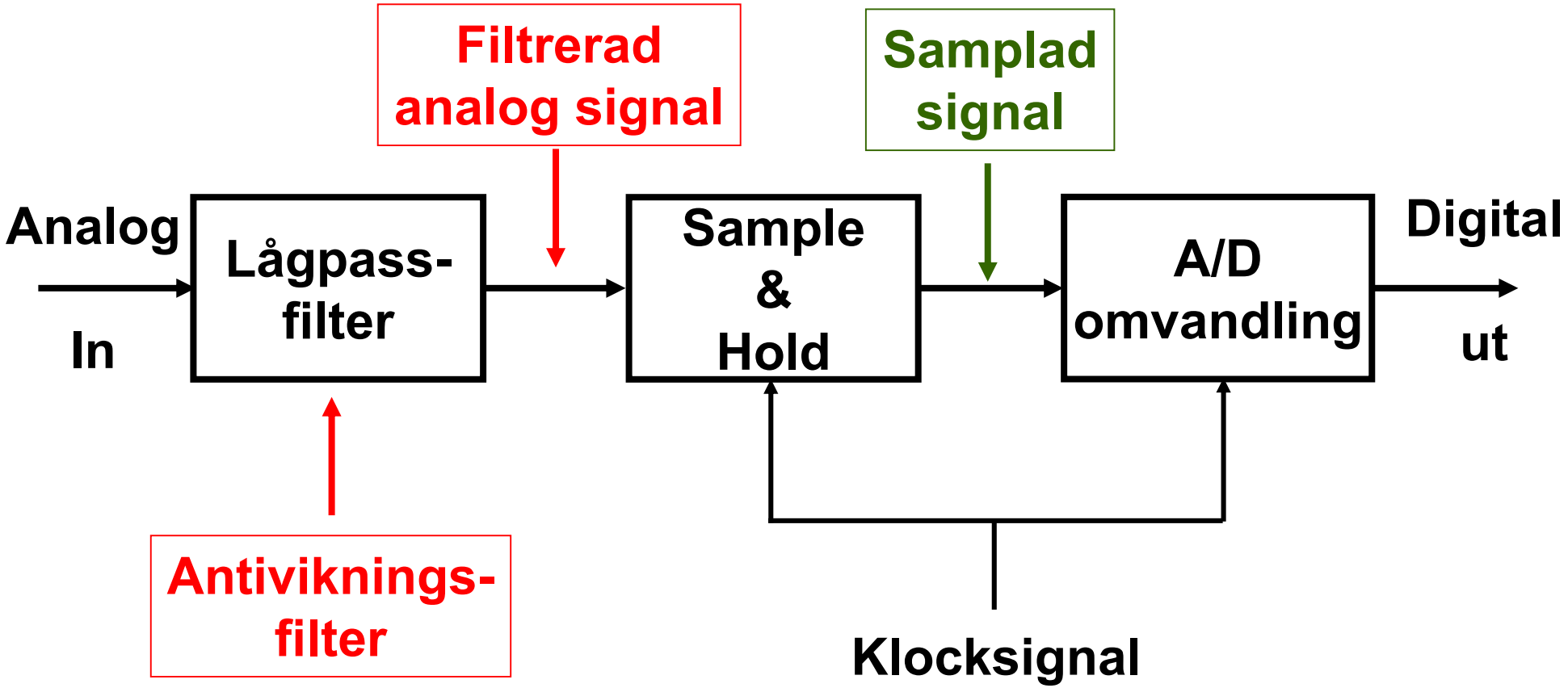
Set av pulser med fix tid T
Skapar övertoner vid frekvenser på 1/T,2/T, 3/T…
Dessa måste filtreras bort - lågpassfilter

- $\frac{1}{T} \gg BW_{signal}$

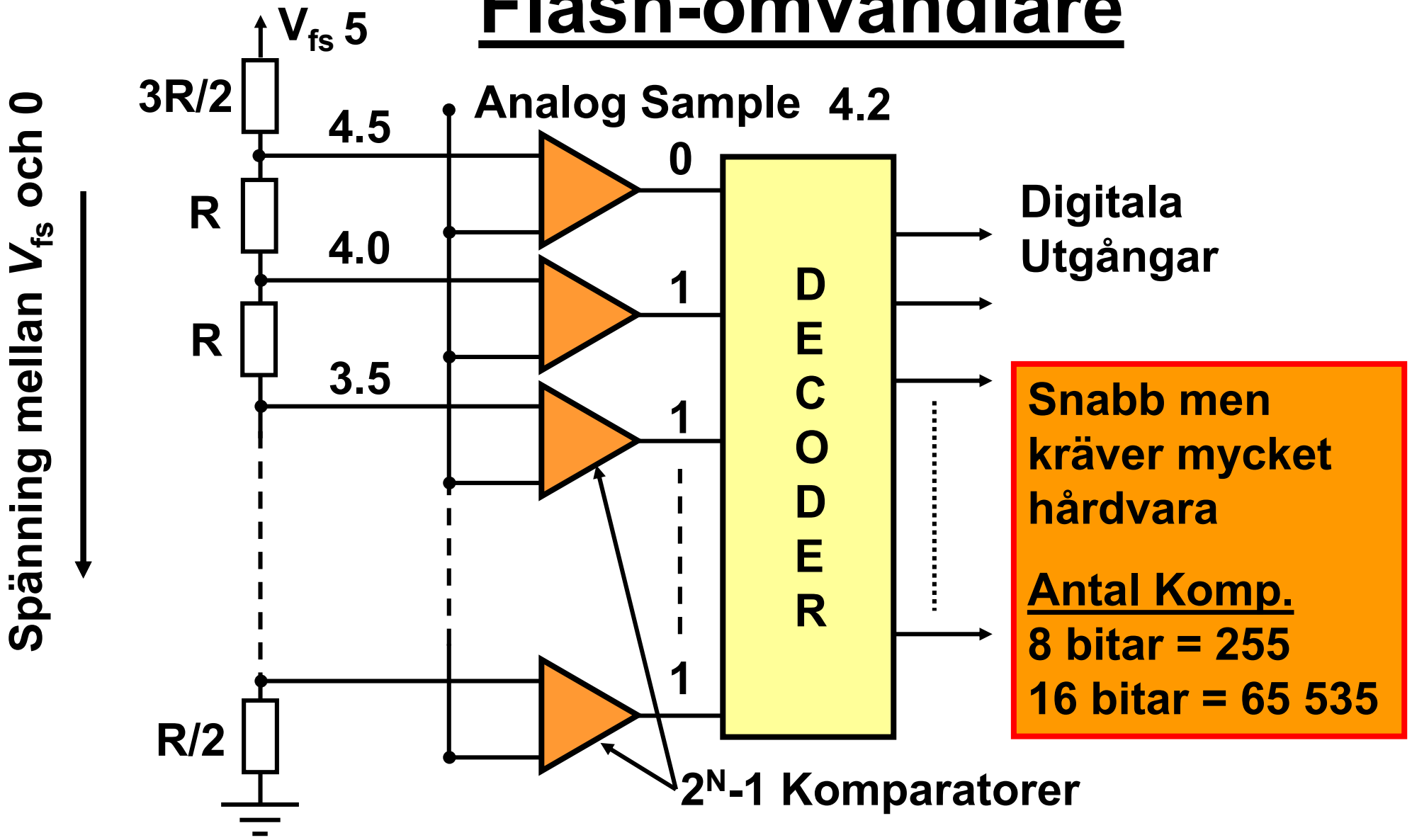
Enkel & Billig
PWM är en ‘vanlig’ analog output från en microcontroller. (ex. Arduino)

Analog till Digital omvandlare

Analog till Digital omvandling



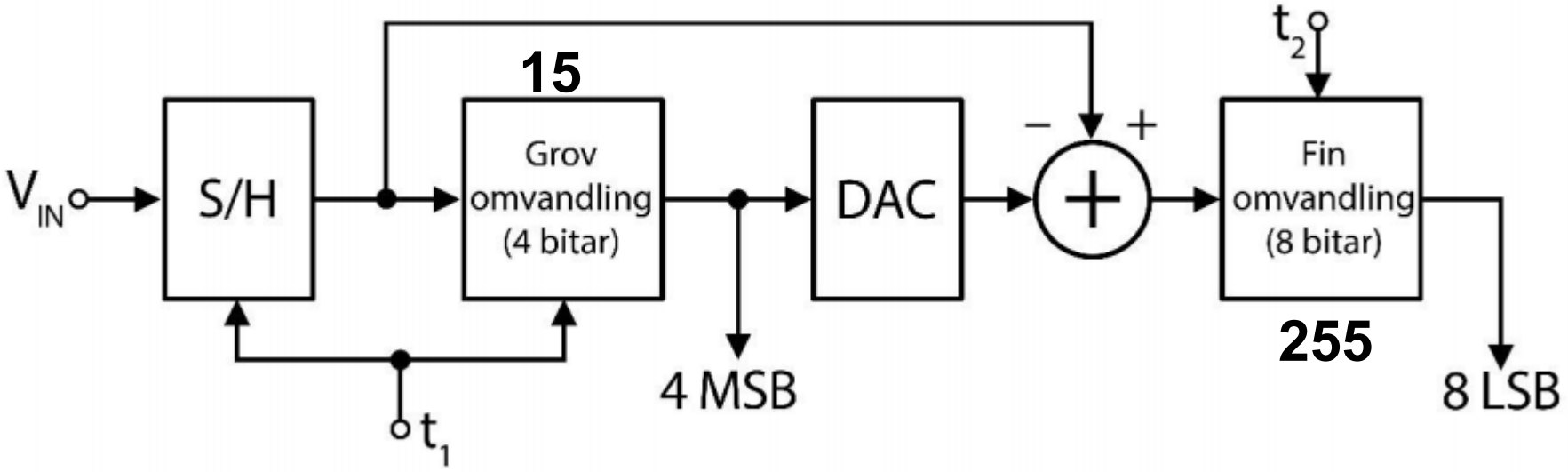
Flash-omvandlare



Snabb men kräver mycket hårdvara

Antal Komp.
8 bitar = 255
16 bitar = 65 535

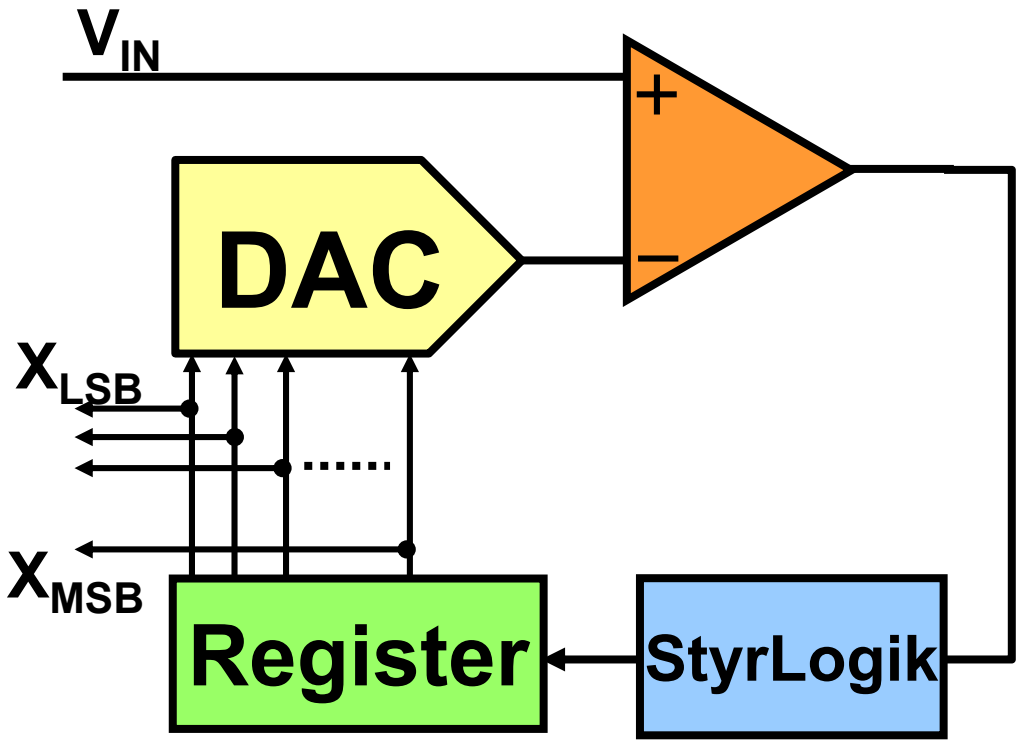
Tvåstegsomvandlare

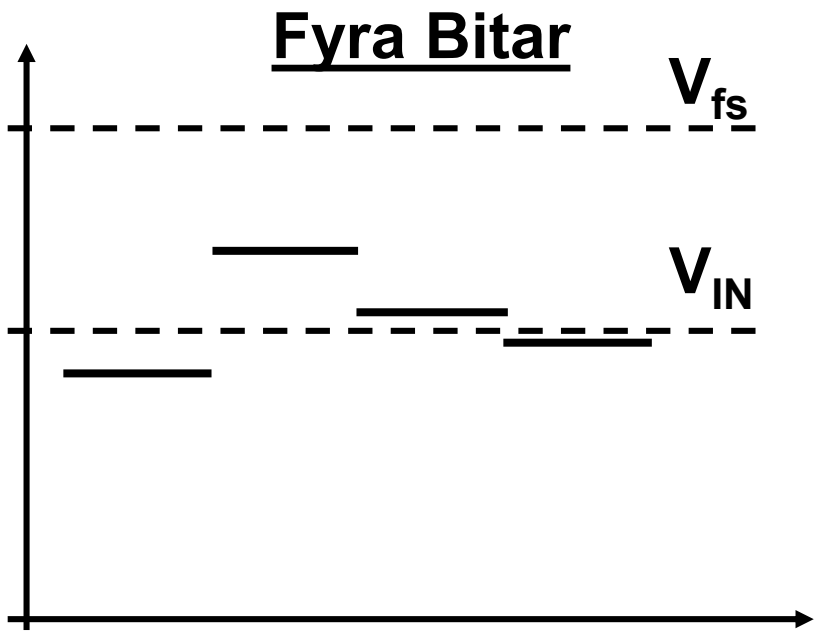


- **Flash ADC (<8 bitar)**
- **Dela upp i två steg – först en *grov* omvandling (MSB:s)**
- **Sedan en *fin* omvandling (LSB:s)**
- **Kräver två ADC-steg**

Antal Komp.
12 bitar = 4095
4+8 bitar = 270

Succesivapproximation

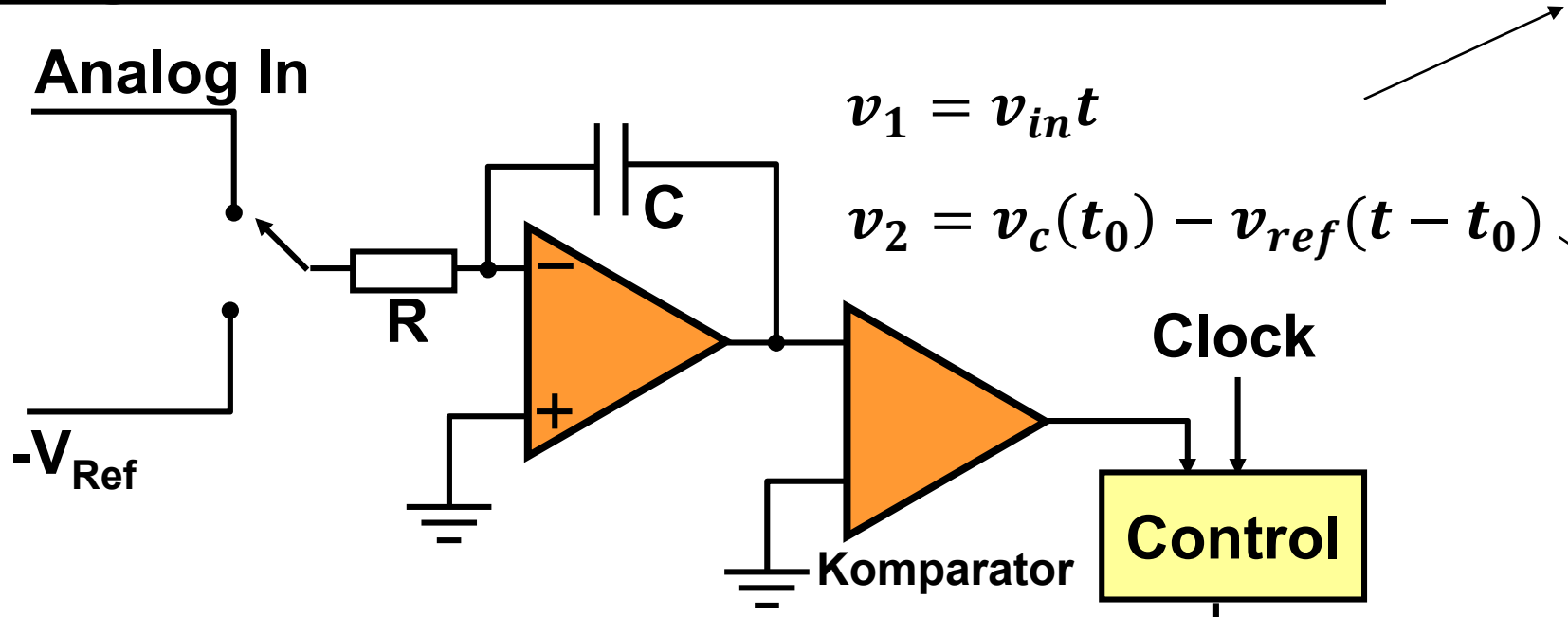




Binär Sökning
Alltid samma Omvandlingstid
N bitar ⇨ N jämförelser

Förslag	1000	1100	1010	1001
Test	OK	NEJ	NEJ	OK
Utvärde	1000	1000	1000	1001

Integrerande Omvandlare, Dual Slope



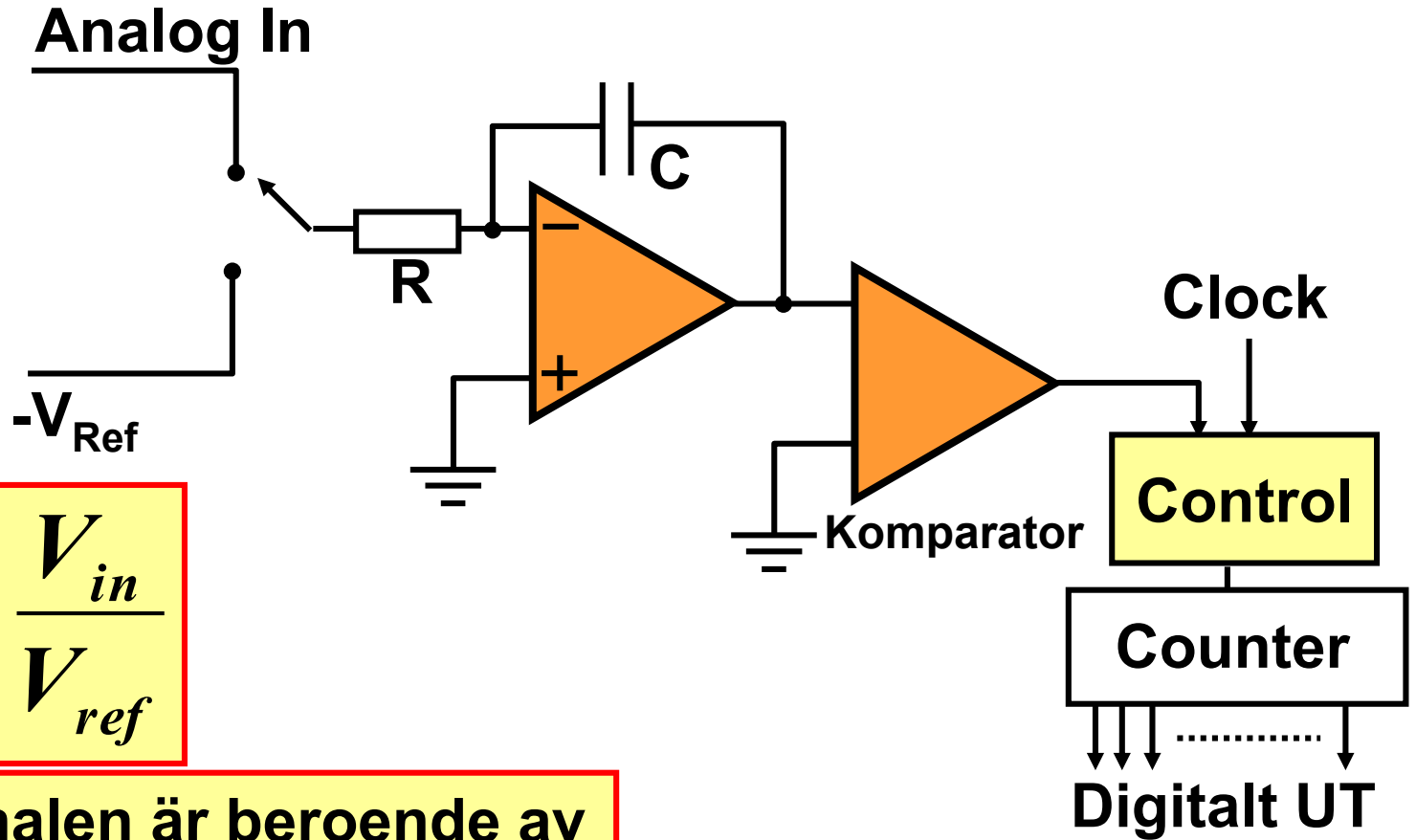
$$v_1 = v_{in}t$$

$$v_2 = v_c(t_0) - v_{ref}(t - t_0)$$

1. Kondensatorn laddas upp med Analog IN medan räknaren går till max

2. Kondensatorn laddas ur med V_{ref} , räknarvärdet vid omslag mått på analoga spänningen

Integrerande Omvandlare, Dual Slope



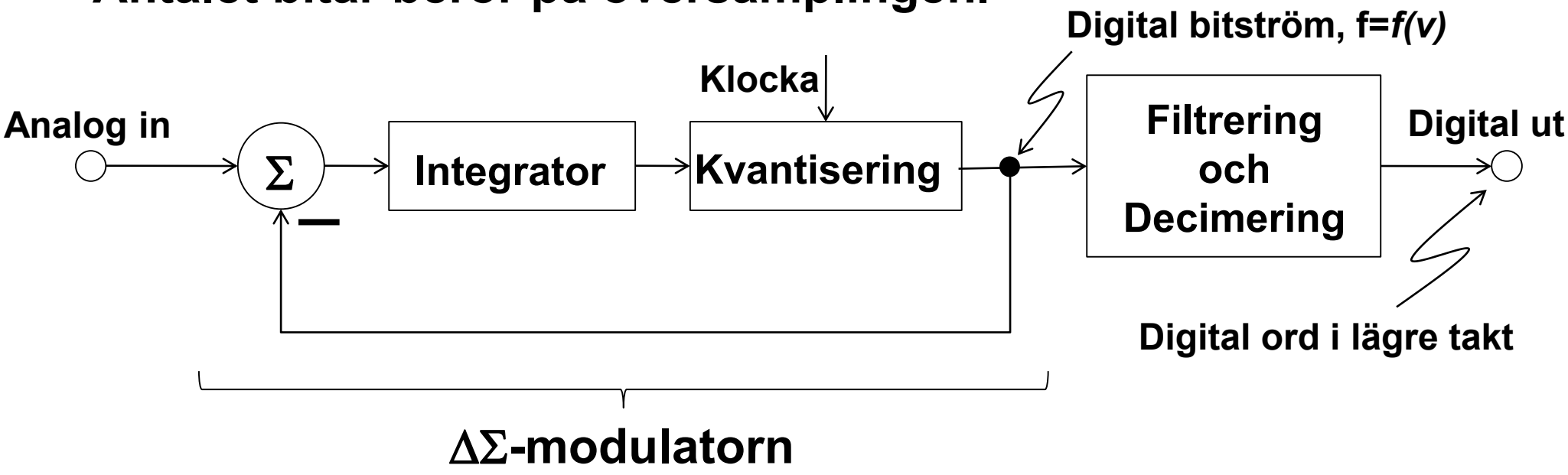
$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_{in}}{V_{ref}}$$

Utsignalen är beroende av både upp- och urladdning men EJ av C och R.

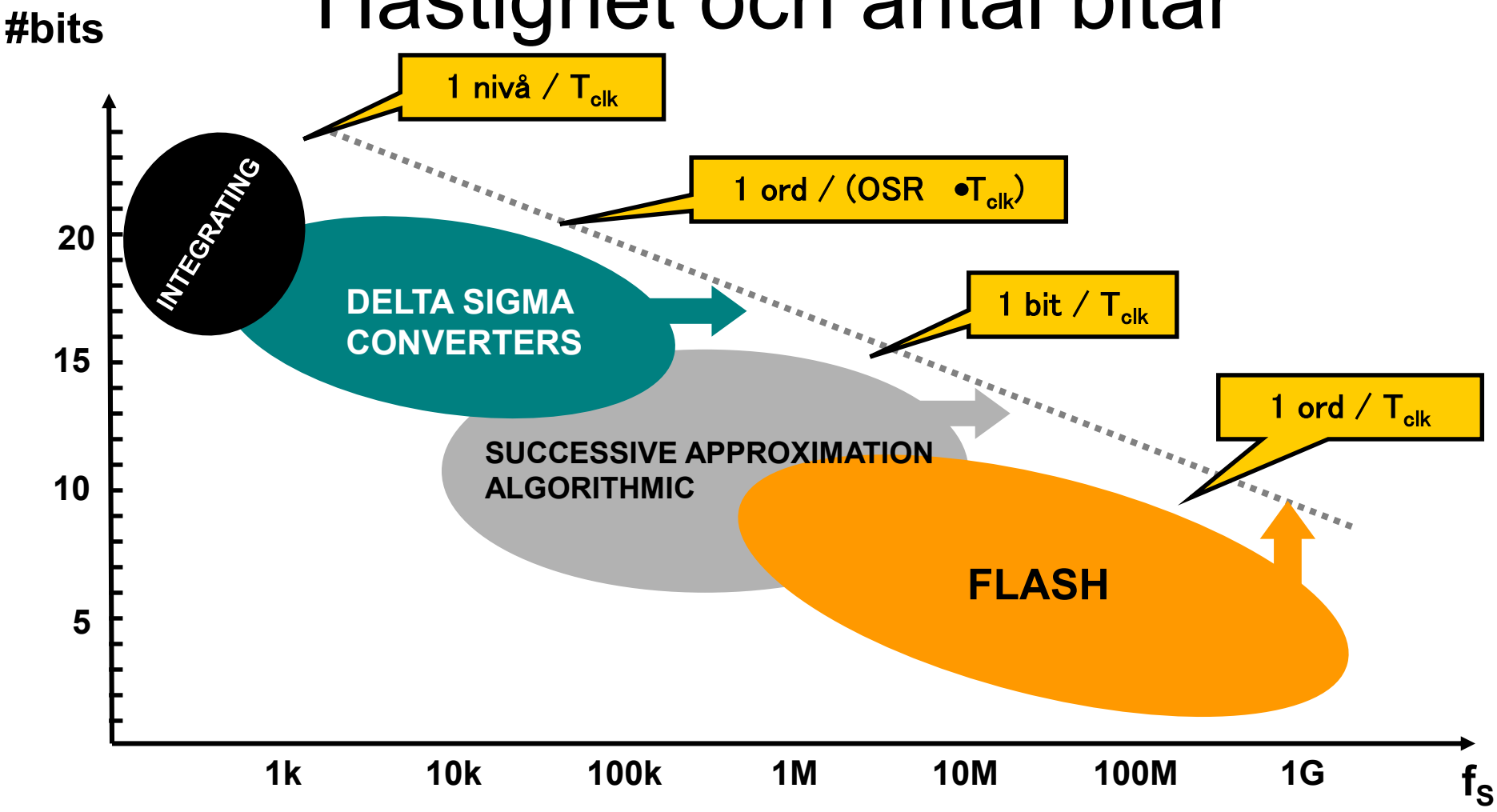
Ej känslig för drift i klockfrekvens och variationer i R och C

Kort om ΔΣ-omvandlare

Bygger på att vi översamplar signalen och får en bitström med betydligt högre takt än vår Nyqvist-samplingstakt. Därefter filtreras och decimeras (minskas) sampeltakten och vi får ut digitala ord med hög upplösning. Antalet bitar beror på översamplingen.



Hastighet och antal bitar

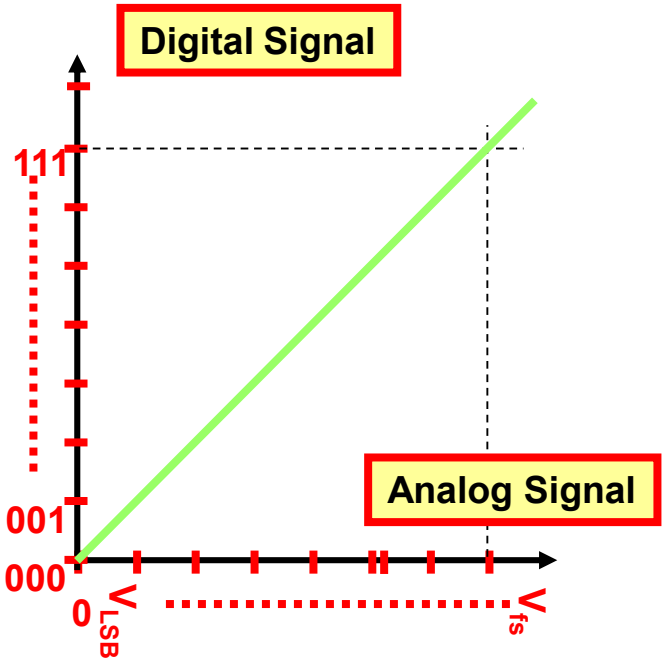


OSR = Over Sampling rate

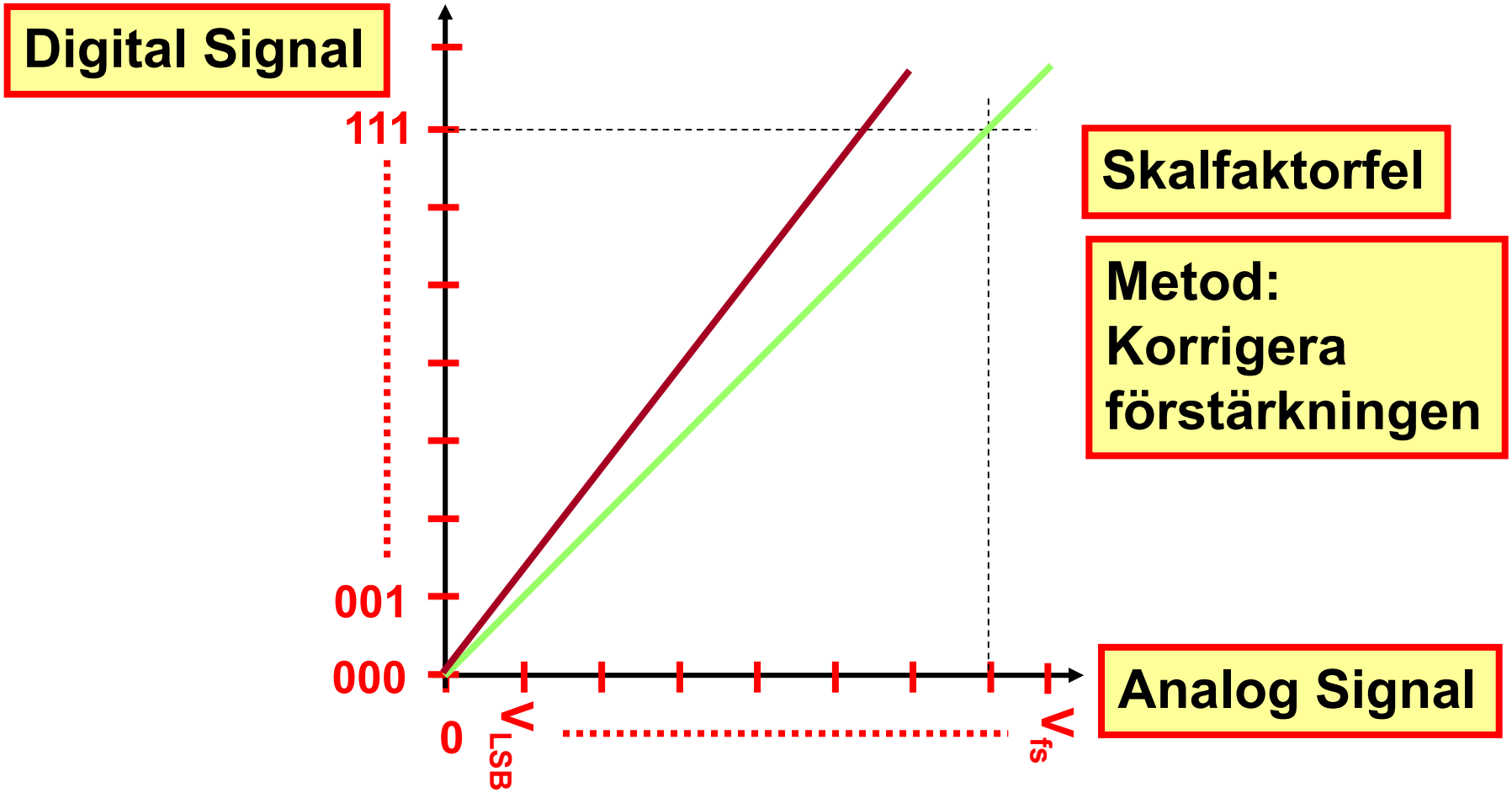
Original från Piero Andreani

AD- och DA-omvandling

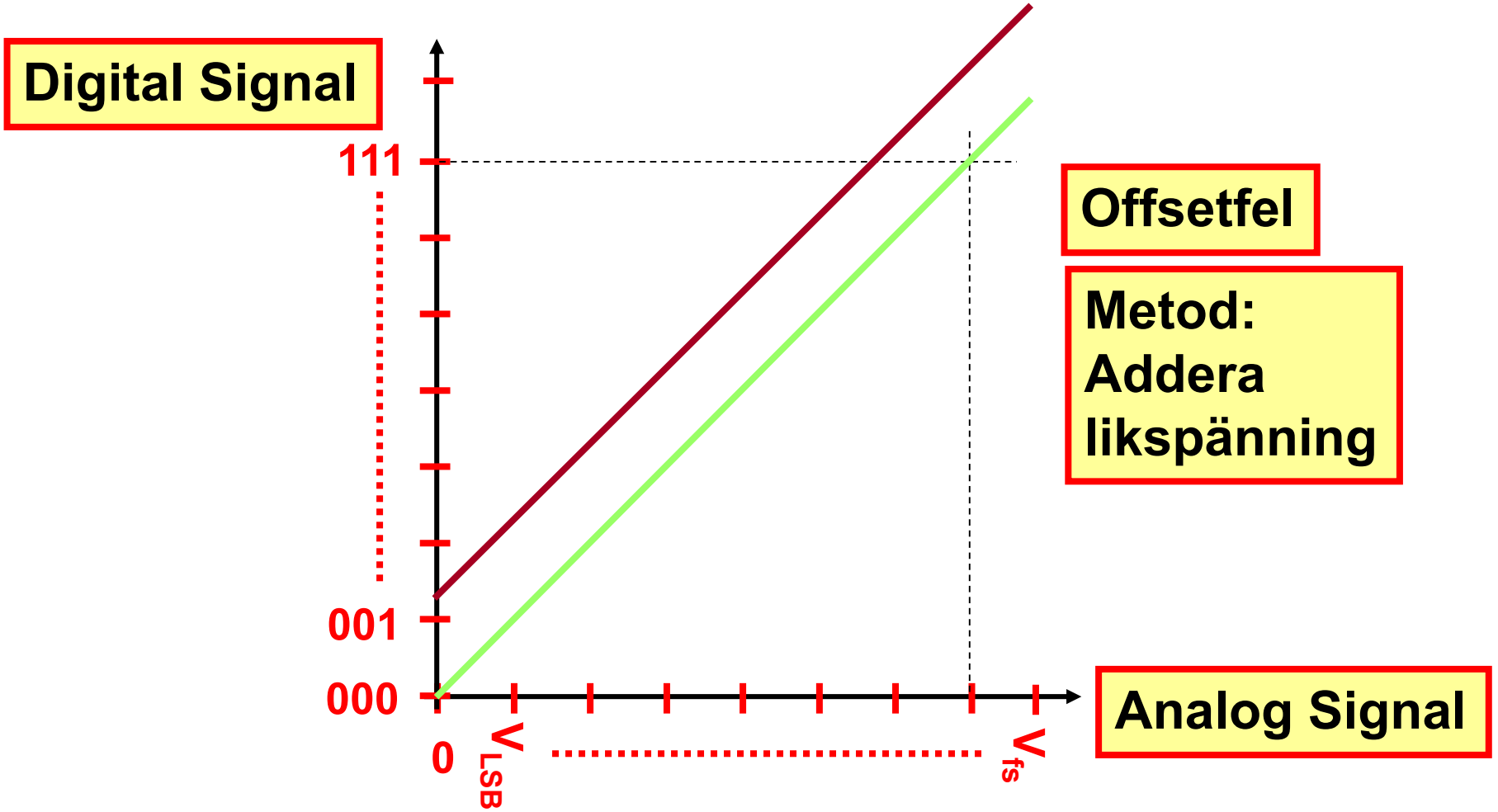
- Överföringen skall vara linjär dvs.
  $y = k*x$ där k är konstant,
  y är den digitala och
  x är den analoga signalen
- En verklig omvandlare
  har fel i överföringen:
  $y = k(x)*x + m$ där $k(x)$
  varierar och m är nollfel



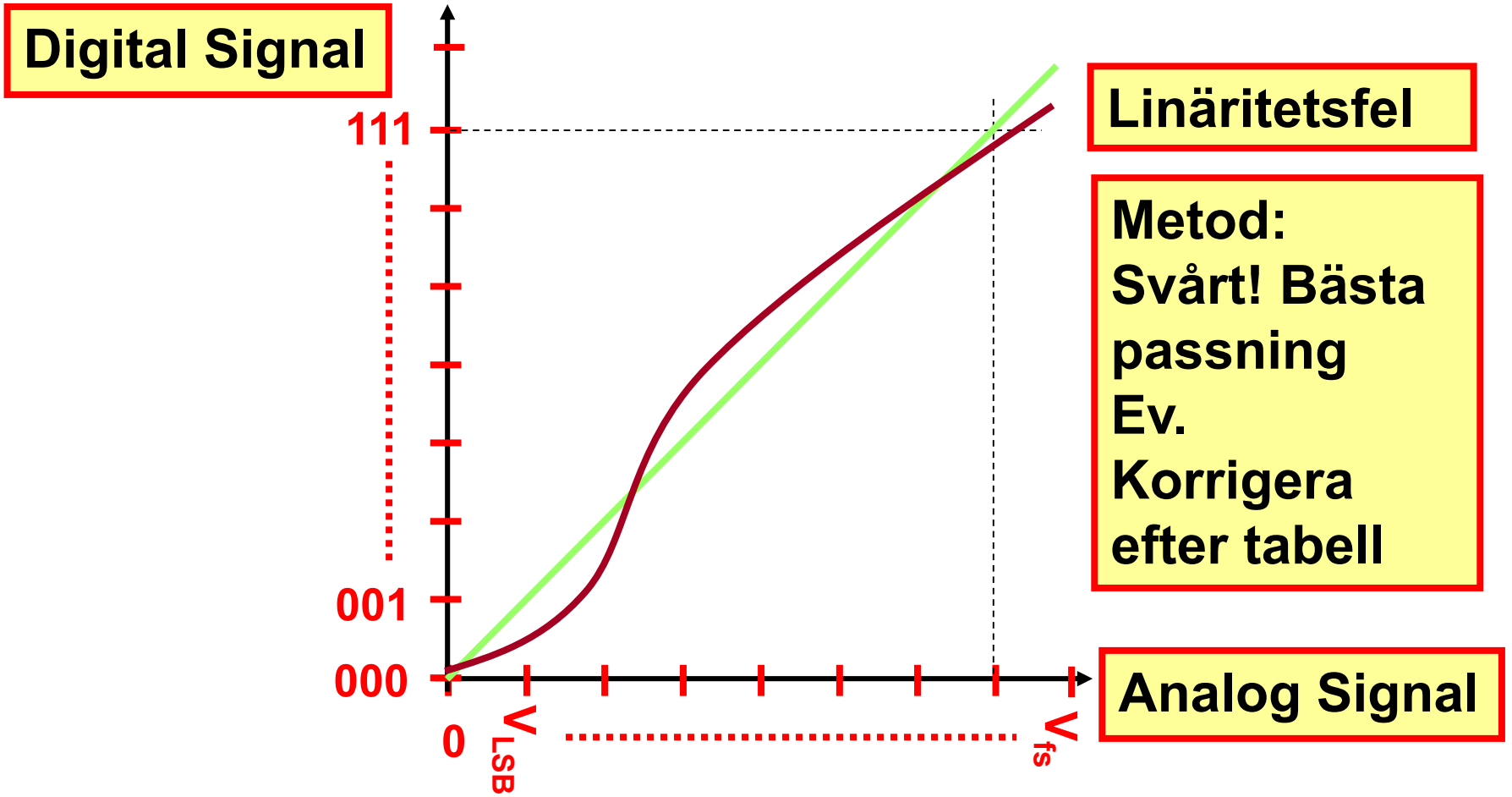
Fel i AD-omvandling



Felkällor i AD- och DA-omvandling

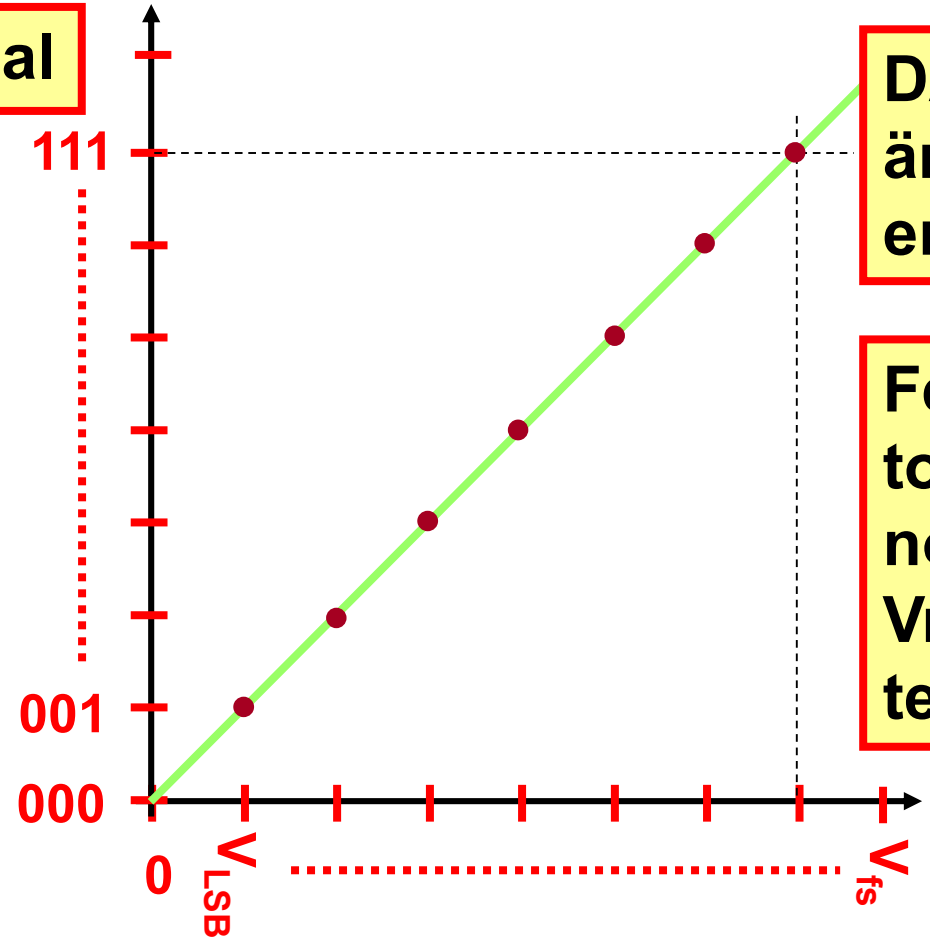


Felkällor i AD- och DA-omvandling



Fel i DA-omvandling

Digital Signal



DA-omvandling är i teorin en entydig operation

Fel pga brus, toleranser och noggrannhet i: Vref, komponenter, OPförstärkare

Analog Signal

Laboration 6

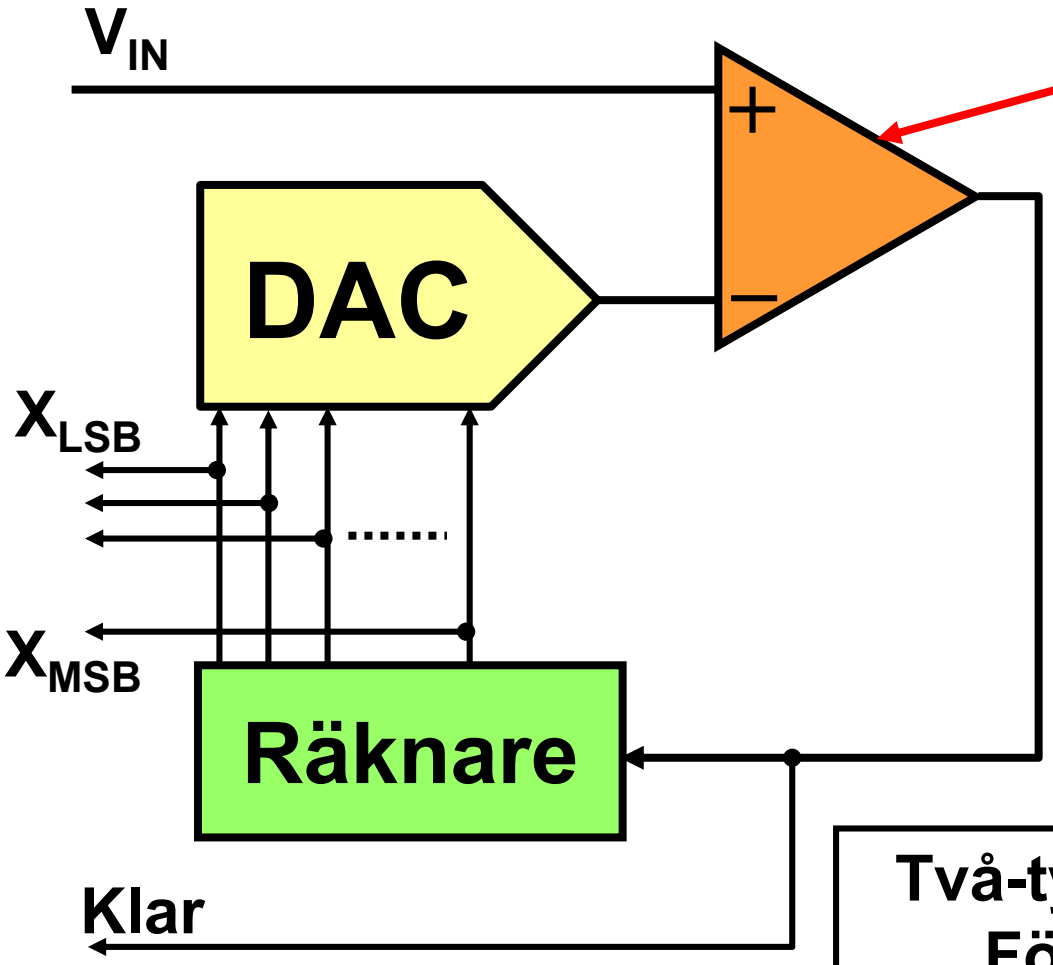
- Praktiska mätningar på en AD/DA omvandlare
- Hambley 340-342 & dessa slides!
- Labinstruktioner med förberedelseuppgifter på nätet

That’s all!

Andra AD-omvandlare (kursivt)

- **Räknarebaserade**

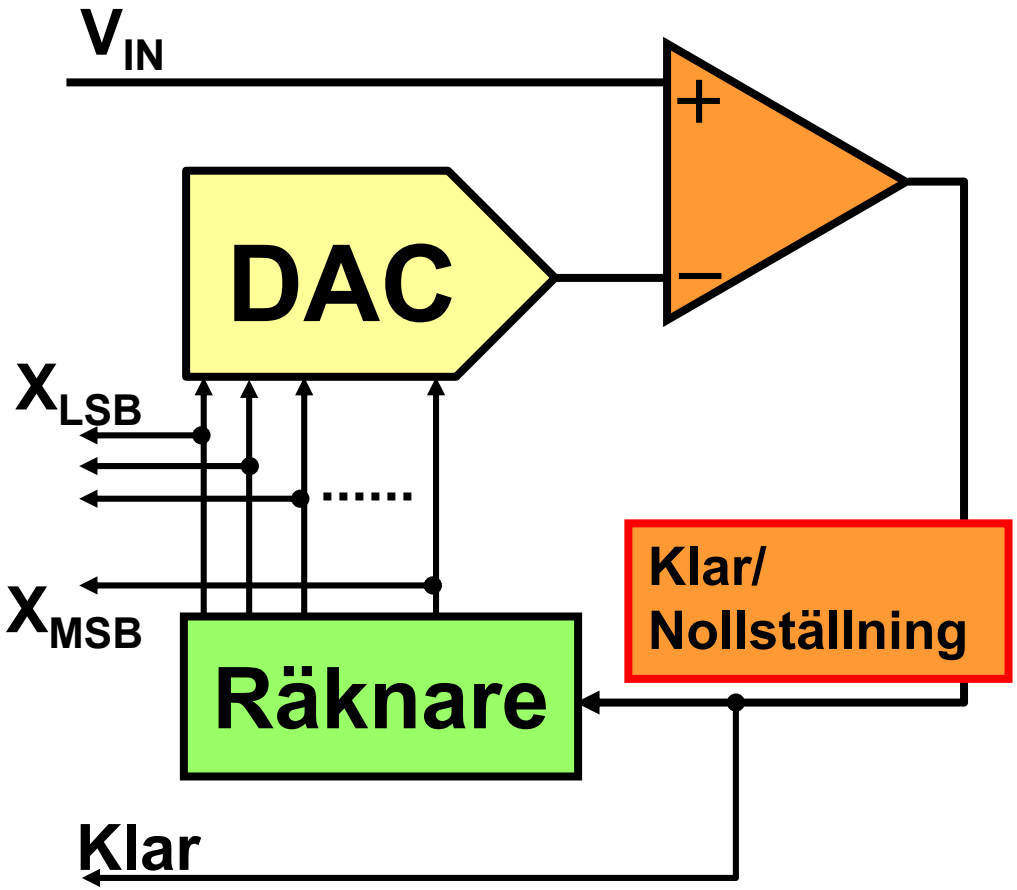
Räknarbaserad AD-omvandlare

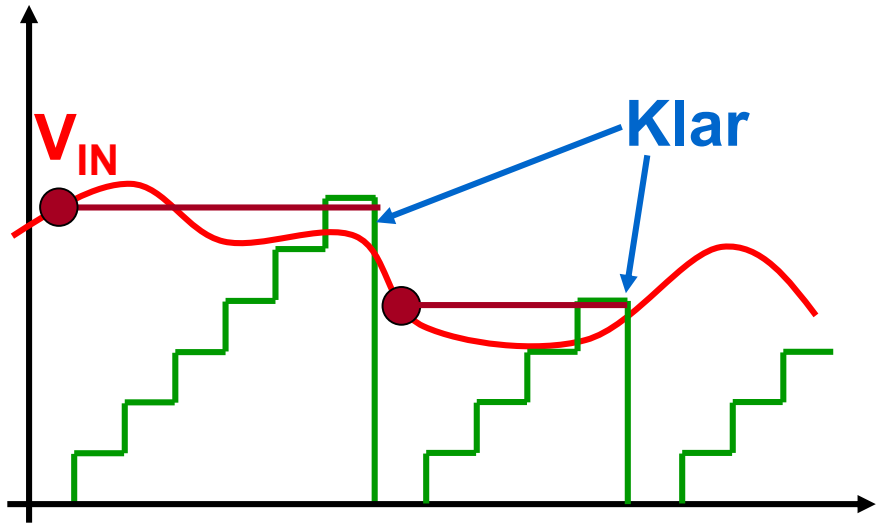


Komparator jämför det DA-omvandlade värdet med insignalen

Två-typer: Trappstegs- och Följande-omvandlare

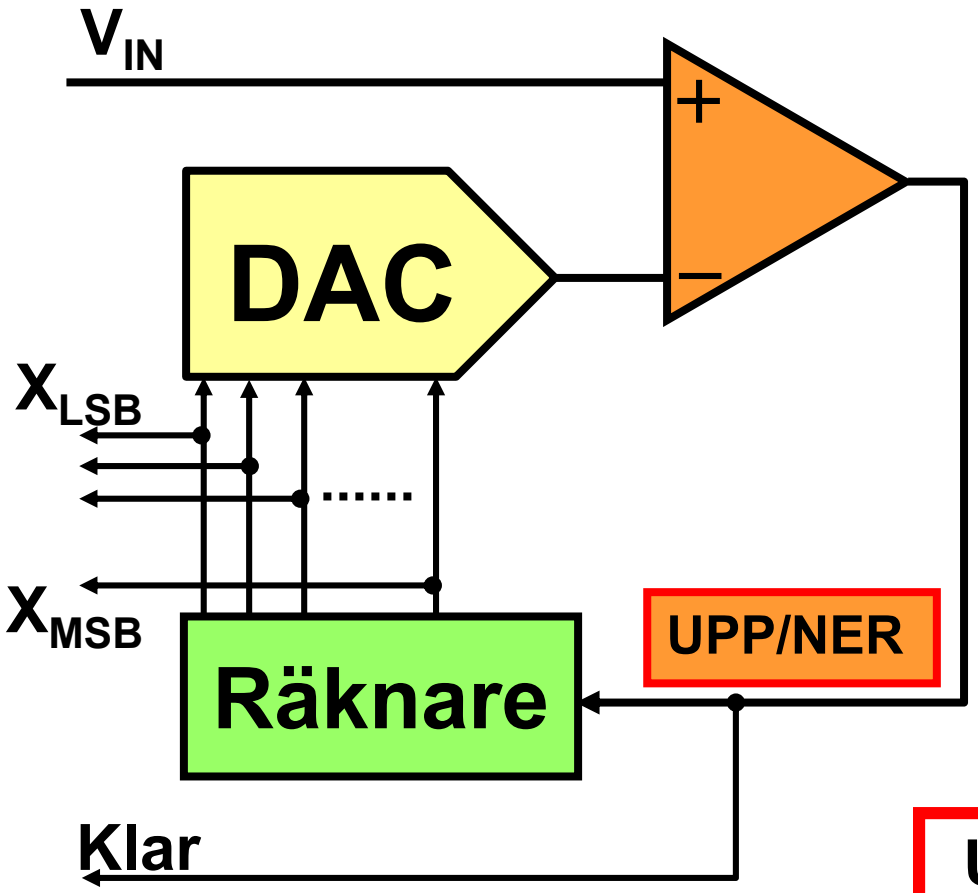
Trappstegsomvandlare

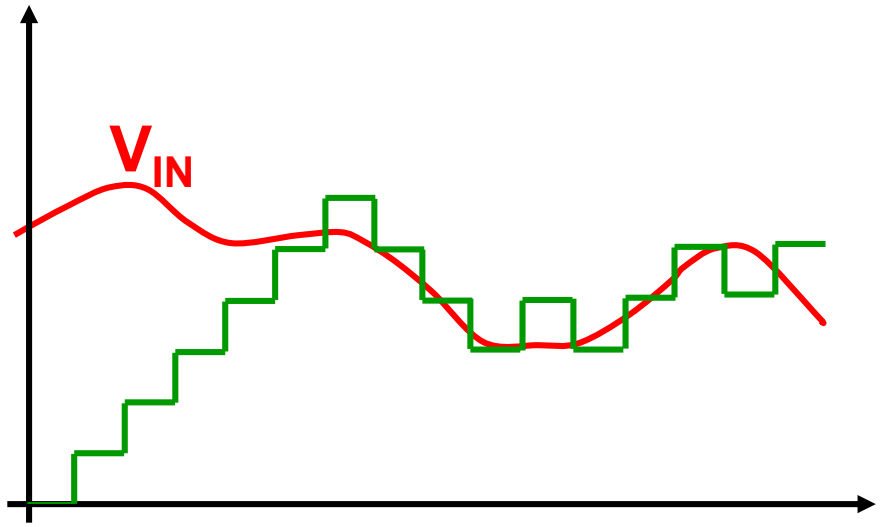




Omvandlingstid beror på Insignalsnivån

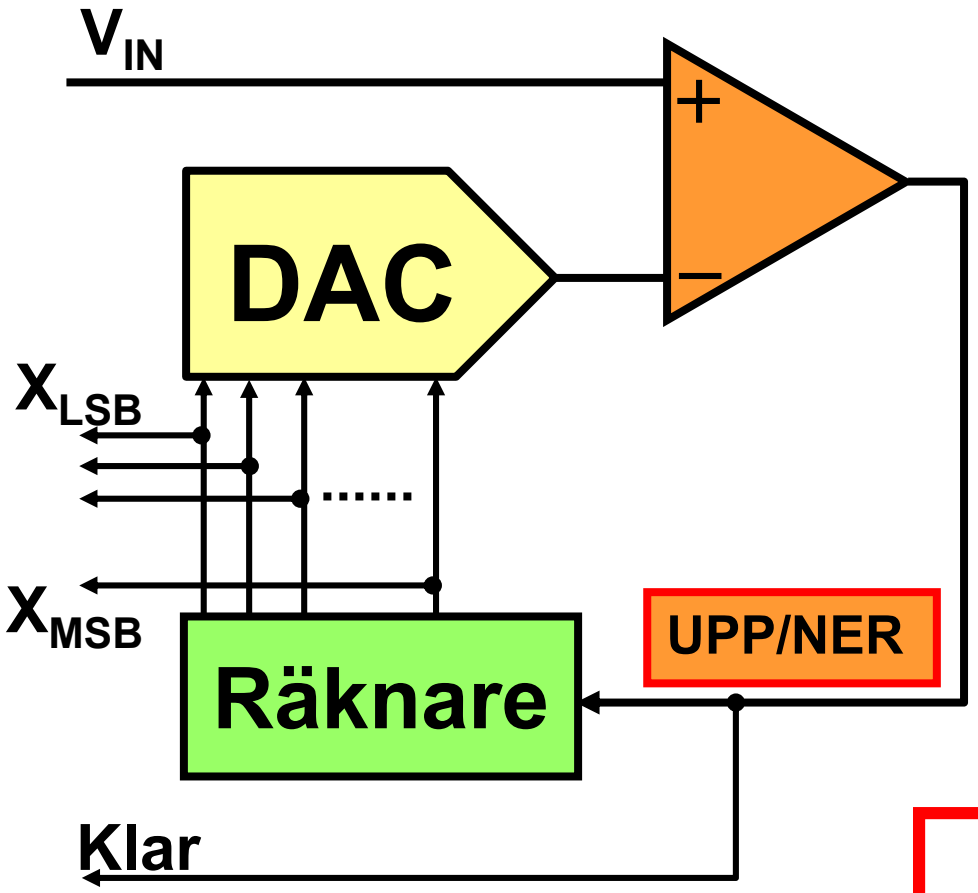
Följandeomvandlare

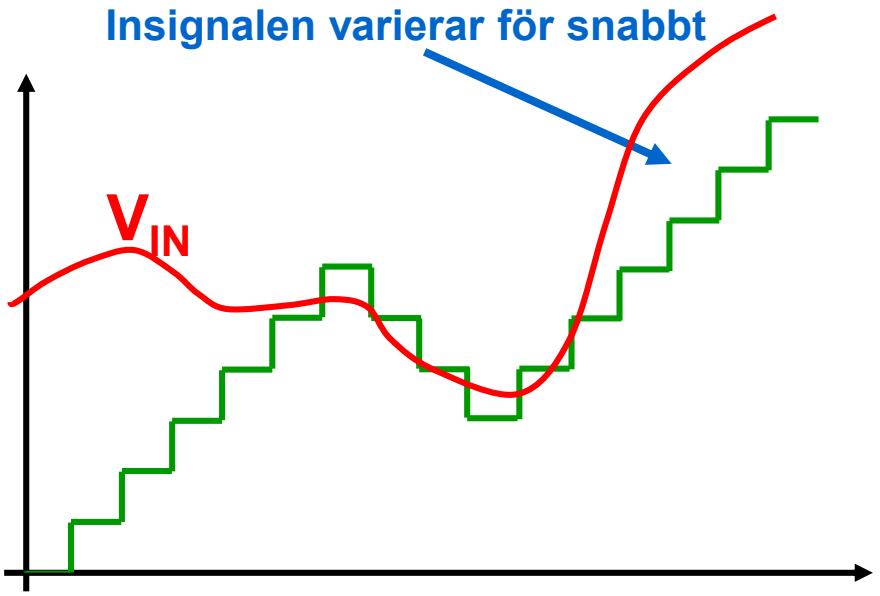




Utsignalen följer Insignalen
Snabbare än Trappstegs

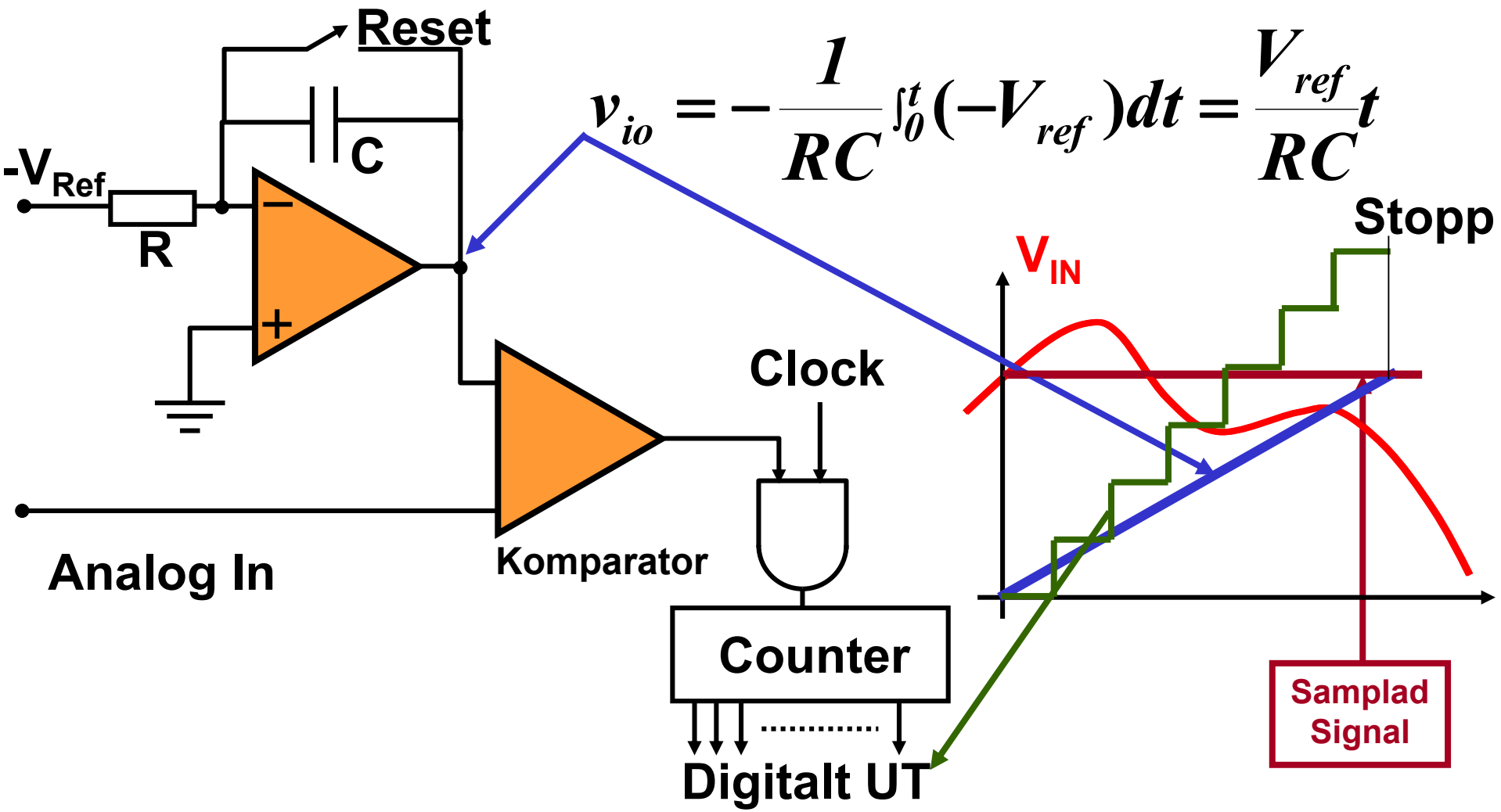
Följandeomvandlare





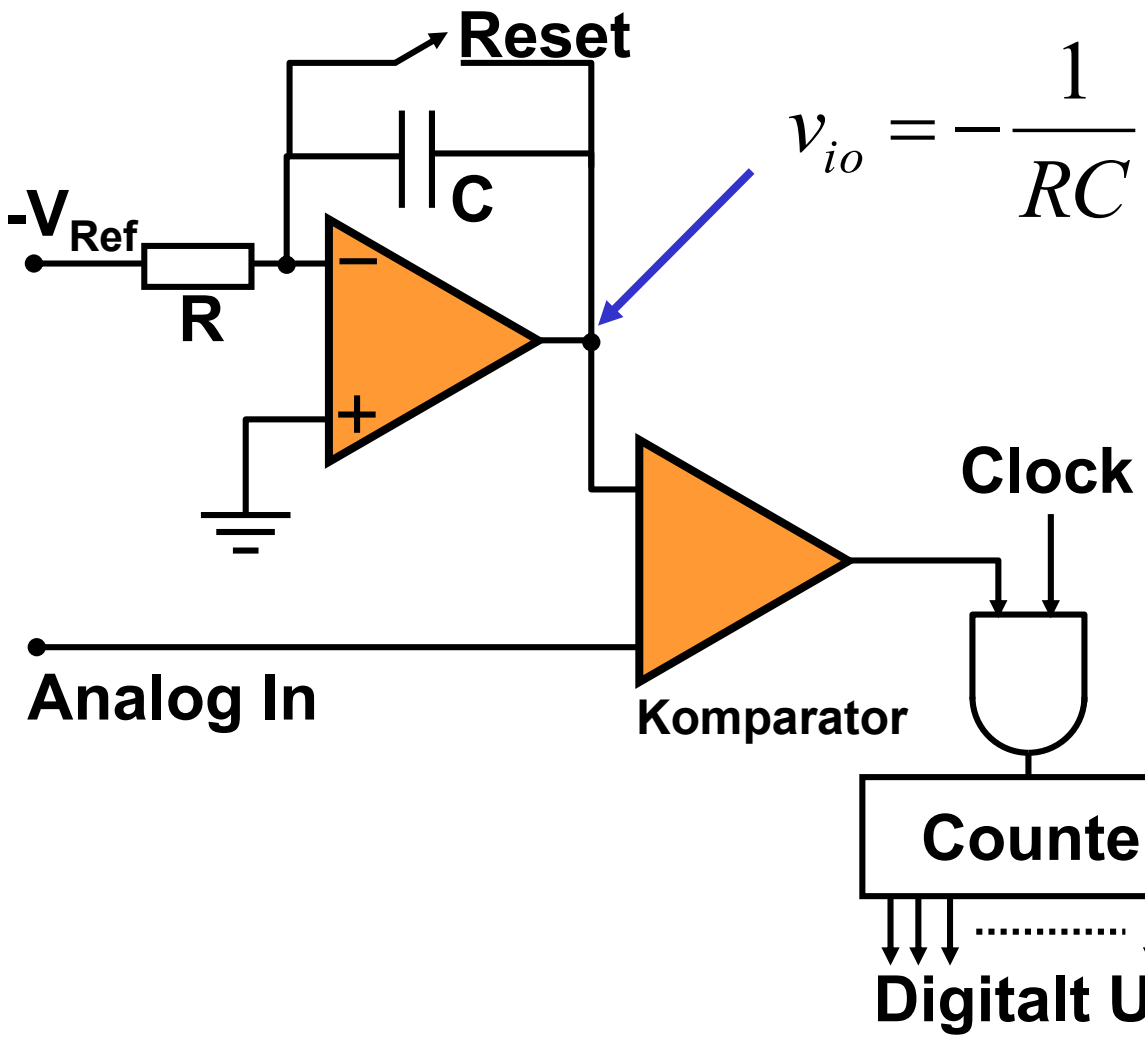
Räknaren begränsas av en bit per klockcykel

Integrerande Omvandlare, Single Slope



$$v_{io} = -\frac{1}{RC}\int_0^t (-V_{ref})dt = \frac{V_{ref}}{RC}t$$

Integrerande Omvandlare, Single Slope



$$v_{io} = -\frac{1}{RC}\int_0^t (-V_{ref})dt = \frac{V_{ref}}{RC}t$$

Oladdad Kondensator. Kondensatorn laddas tills komparaton slår om.

Räknarvärdet mått på tid som är proportionellt mot spänningen.

Problem:
Komponentpassning
Drift