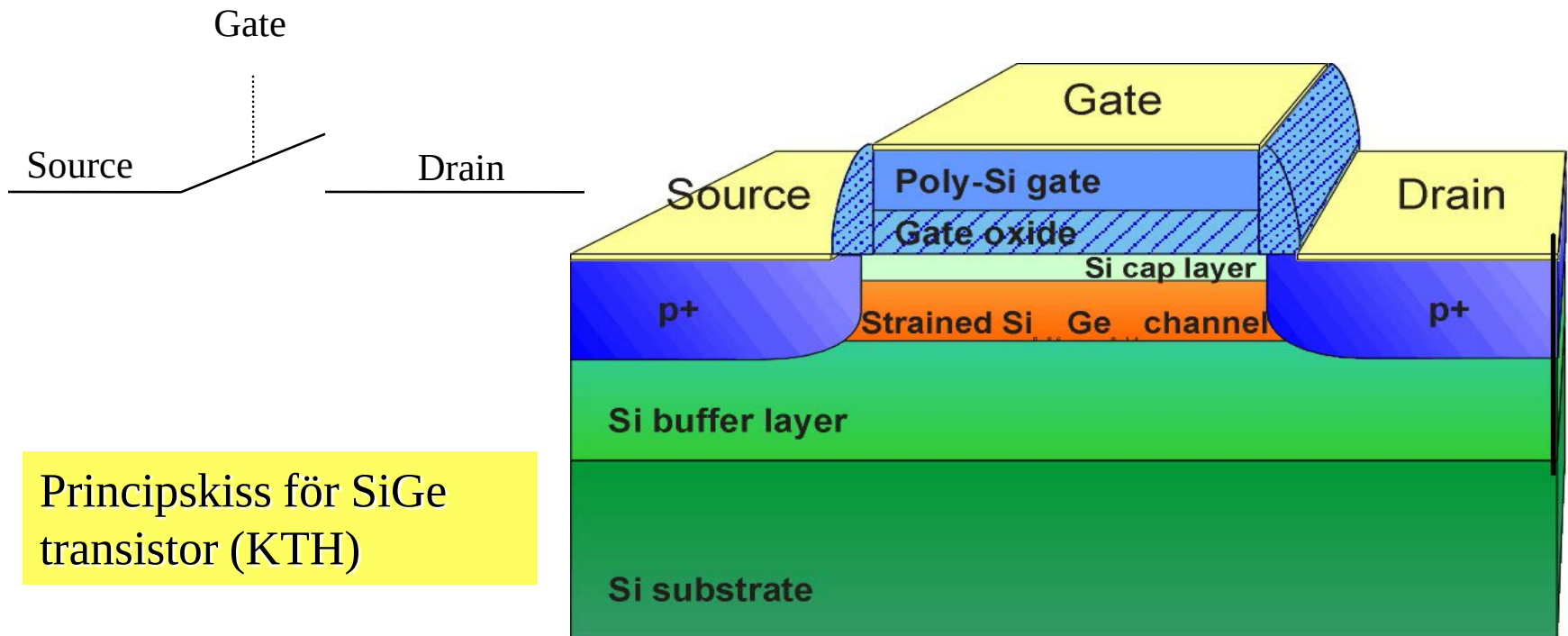


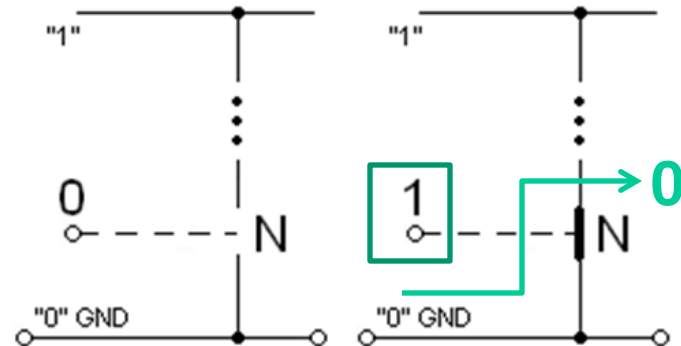
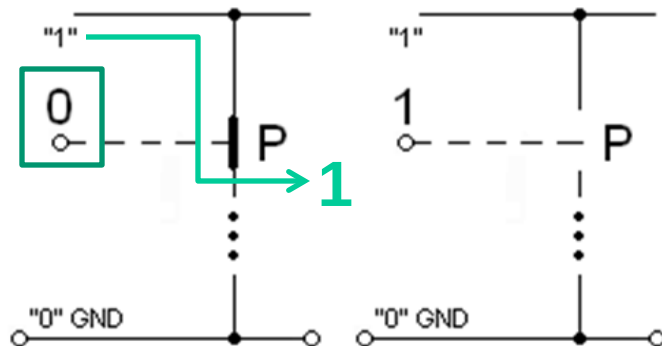
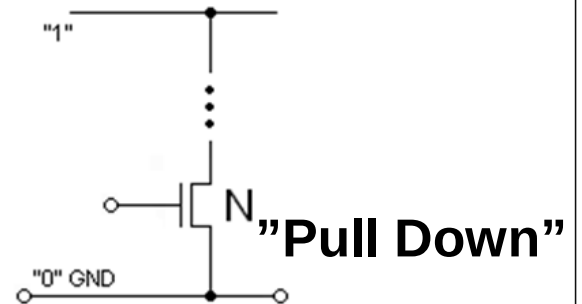
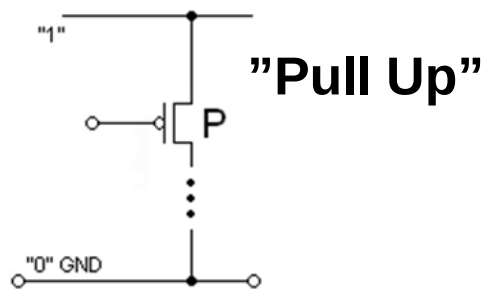
Transistorn en omkopplare utan rörliga delar



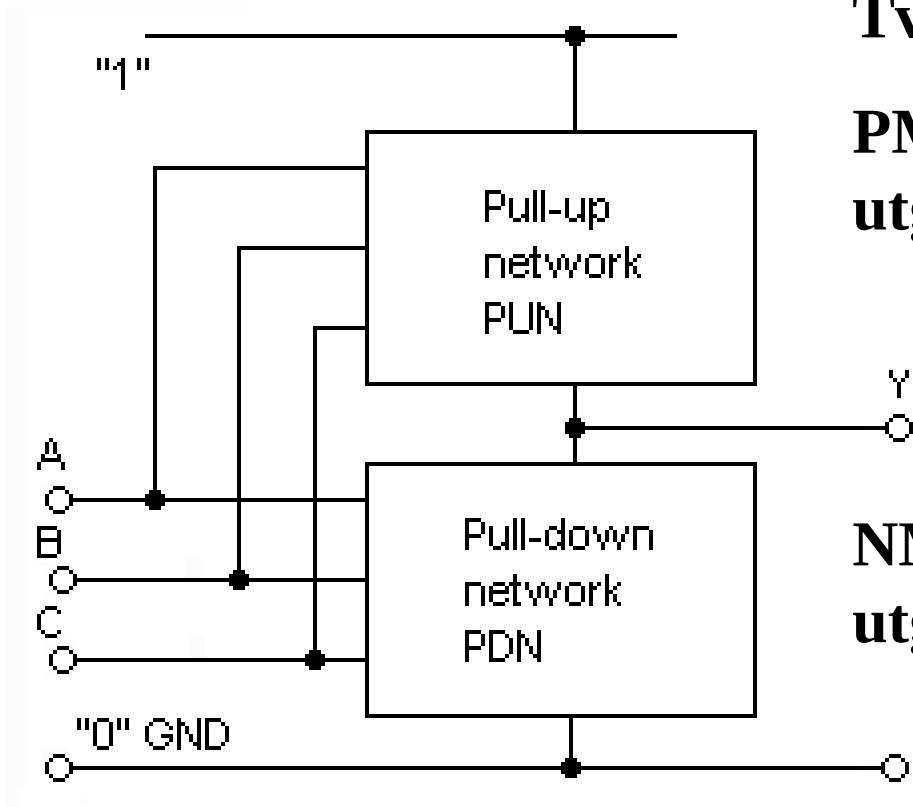
Varför CMOS?

- CMOS-Transistorer är enkla att tillverka
- CMOS-Transistorer är gjorda av vanlig sand => billigt råmaterial
- En transistor är lätt att få att fungera som en switch (omkopplare)

P och N MOS-transistorer



Strukturen av en CMOS-krets

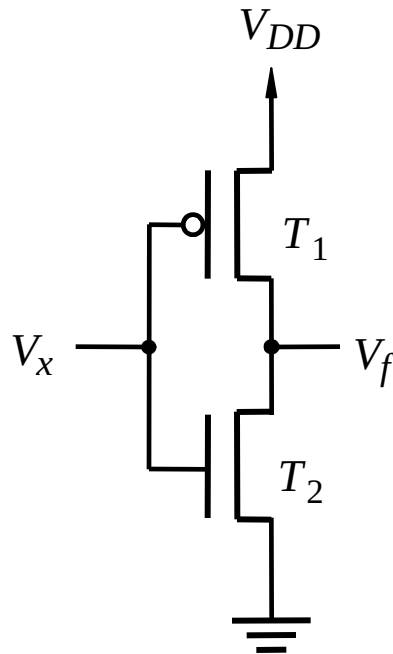


Två olika nät:

**PMOS gör kretsens
utgång "1"**

**NMOS gör kretsens
utgång "0"**

Inverteraren



(a) Circuit

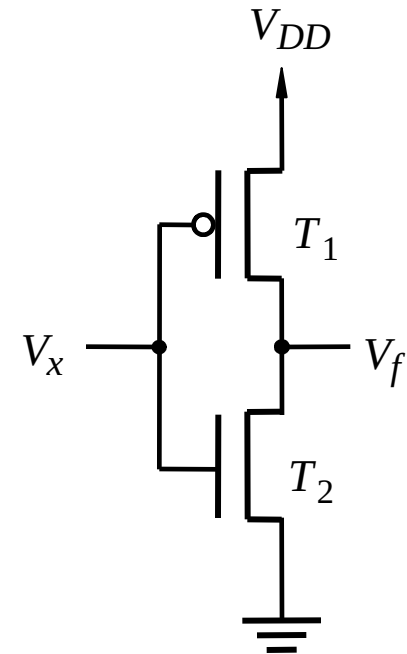
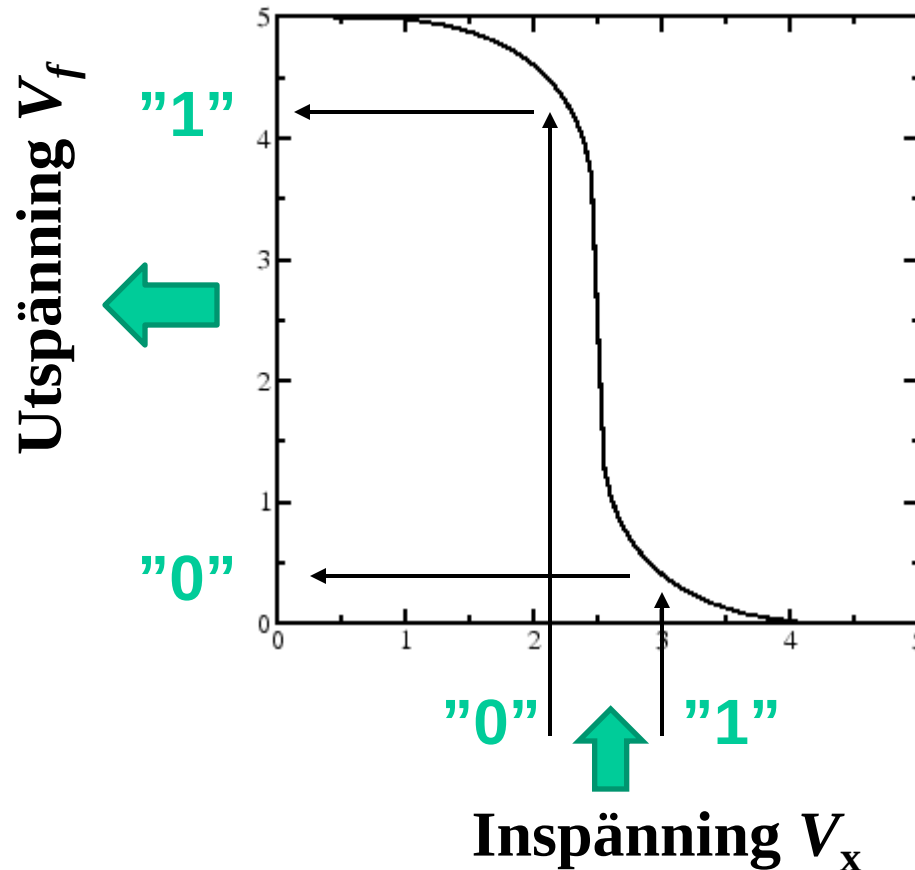
En CMOS-krets består av både PMOS och NMOS-kretsar. CMOS står för (Complementary MOS).

x	T_1	T_2	f
0	on	off	1
1	off	on	0

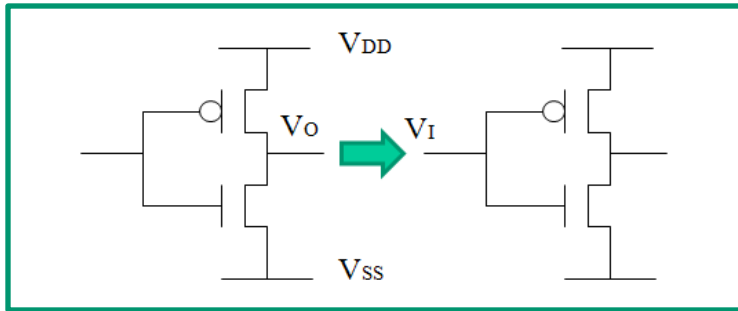
(b) Truth table and transistor states

Area: $A_{\text{inverter}} = 2 \text{ Transistors}$

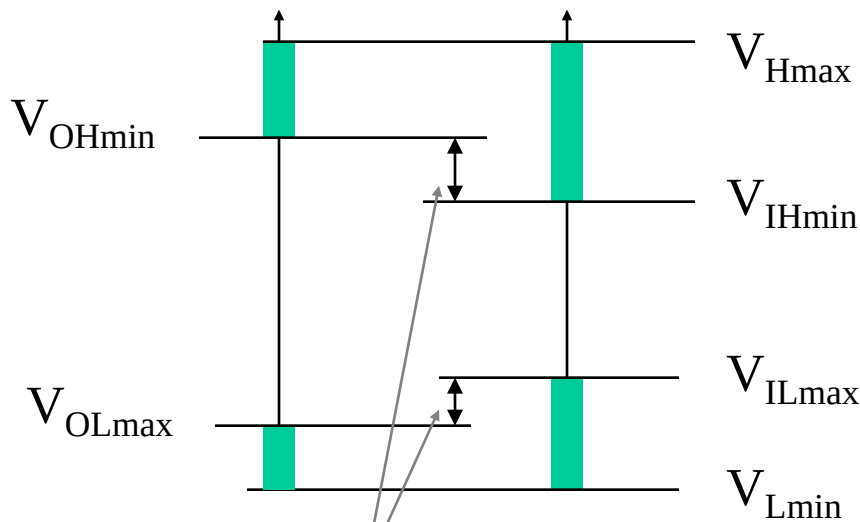
CMOS-inverterarens spänningsnivåer



Typiska signalnivåer för CMOS



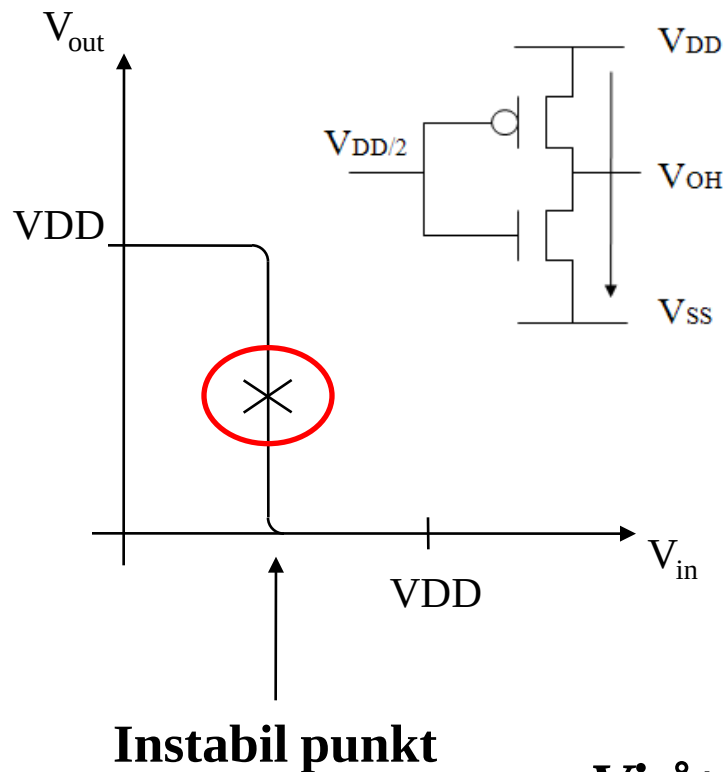
Utgångsspänningar V_O och ingångsspänningar V_I passar varandra som "hand i handske", och med marginal!



Marginal er!

Matningsspänning	5.0V	3.3V	1.8V
V_{HMAX}	5.0	3.3	1.8
V_{IHMIN}	2.9	1.9	1.0
V_{LMAX}	2.1	1.4	0.8
V_{LMIN}	0.0	0.0	0.0

En instabil punkt !

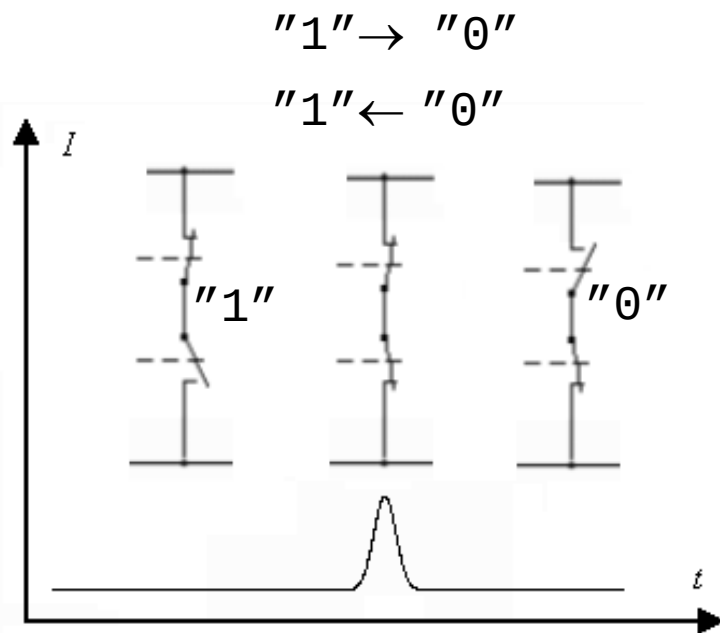


- CMOS-kretsen har en mycket stabil överföringsfunktion
- Vid $V_{in} = V_{DD}/2$ finns en **instabil punkt**, då både T_1 och T_2 leder.
- Om en krets tillfälligt fastnar i detta läge så inträder ett tillstånd som kallas för metastabilitet.
- Om detta tillstånd varar för länge så kan transistorerna i kretsen skadas pga den höga strömmen.

Vi återkommer till metastabilitet ...

CMOS - Dynamisk förlusteffekt !

Klassisk CMOS har **bara** förlusteffekt precis vid **omslaget**.
Förlusteffekten P_F blir proportionell mot klockfrekvensen!



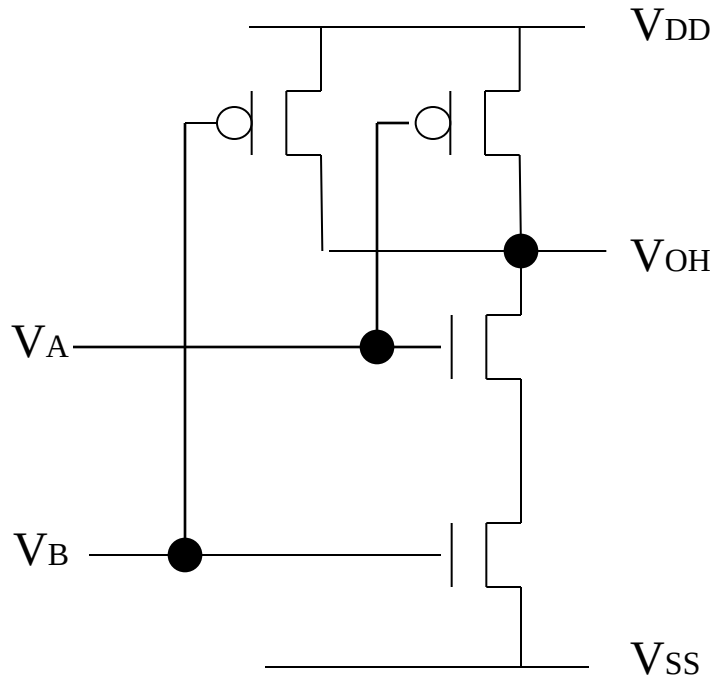
$$P_F \propto f_C \cdot V_{DD}^2$$

P_F Power losses

f_C Clockfrequency

V_{DD} Supply Voltage

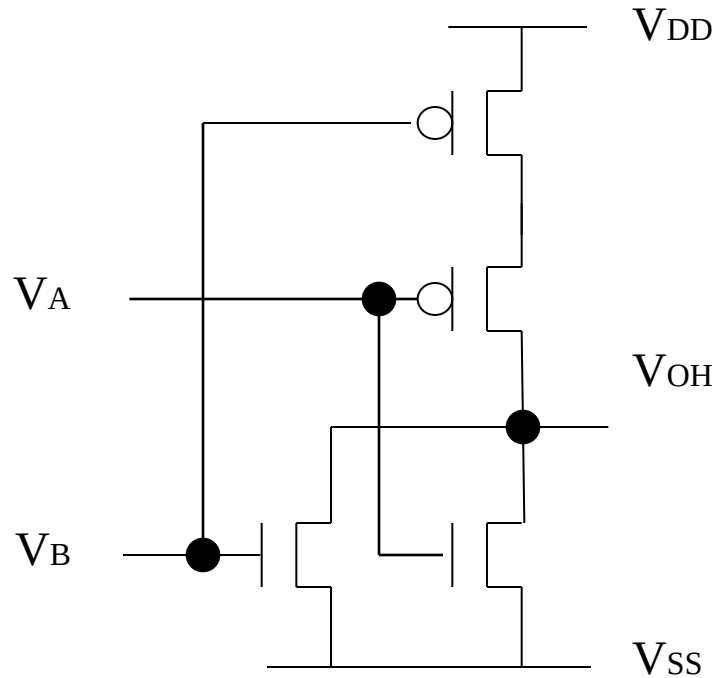
NAND-grinden



V_A	V_B	V_{OH}
$V_{SS}(0)$	$V_{SS}(0)$	$V_{DD}(1)$
$V_{SS}(0)$	$V_{DD}(1)$	$V_{DD}(1)$
$V_{DD}(1)$	$V_{SS}(0)$	$V_{DD}(1)$
$V_{DD}(1)$	$V_{DD}(1)$	$V_{SS}(0)$

Area: $A_{NAND} = 4$ Transistors

NOR-grinden



V_A	V_B	V_{OH}
$V_{SS}(0)$	$V_{SS}(0)$	$V_{DD}(1)$
$V_{SS}(0)$	$V_{DD}(1)$	$V_{SS}(0)$
$V_{DD}(1)$	$V_{SS}(0)$	$V_{SS}(0)$
$V_{DD}(1)$	$V_{DD}(1)$	$V_{SS}(0)$

Area: $A_{NOR} = 4$ Transistors

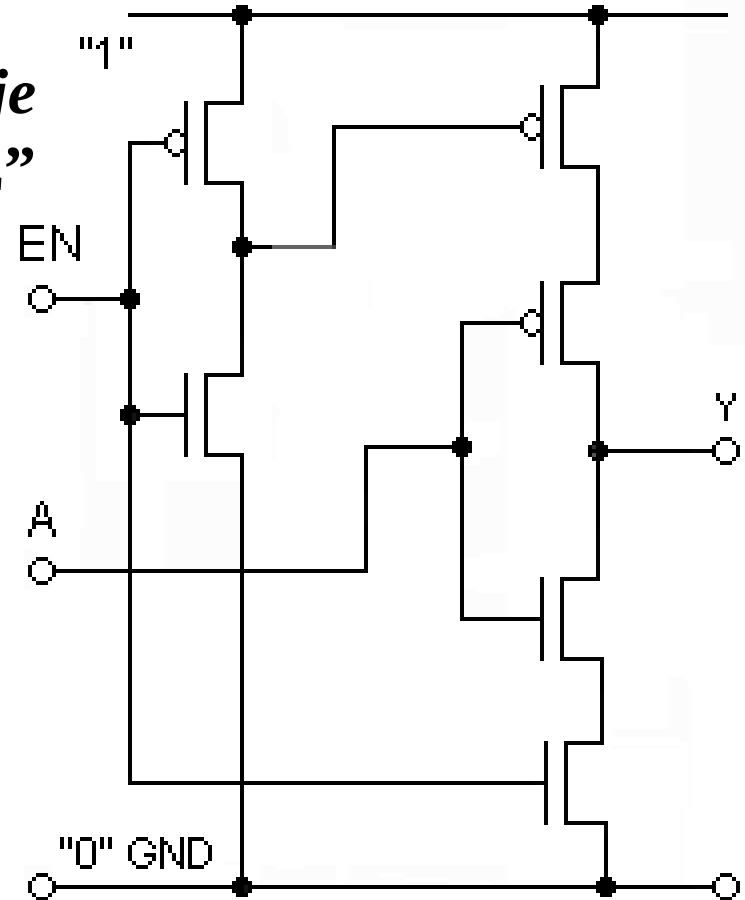
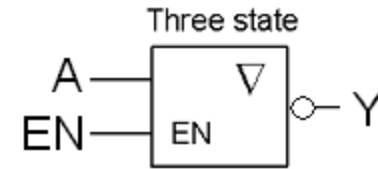
Negativ logik ?

- Man kan också vända på begreppen och låta **L** (låg spänning) representera en logisk 1:a och låta **H** (hög spänning) representera en logisk 0:a.
 - Detta kallas för negativ logik.
- En AND-funktion blir då en OR-funktion och vice versa.
 - Negativ logik eller positiv logik är egentligen egalt, men av tradition använder man sig av positiv logik.

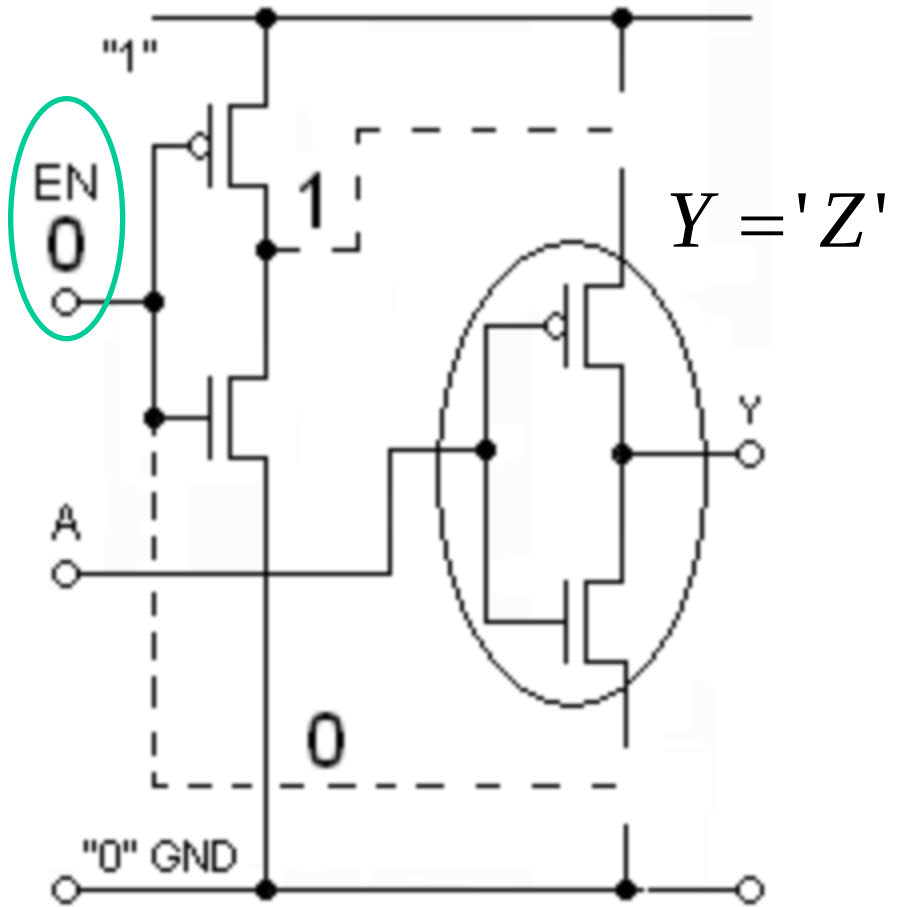
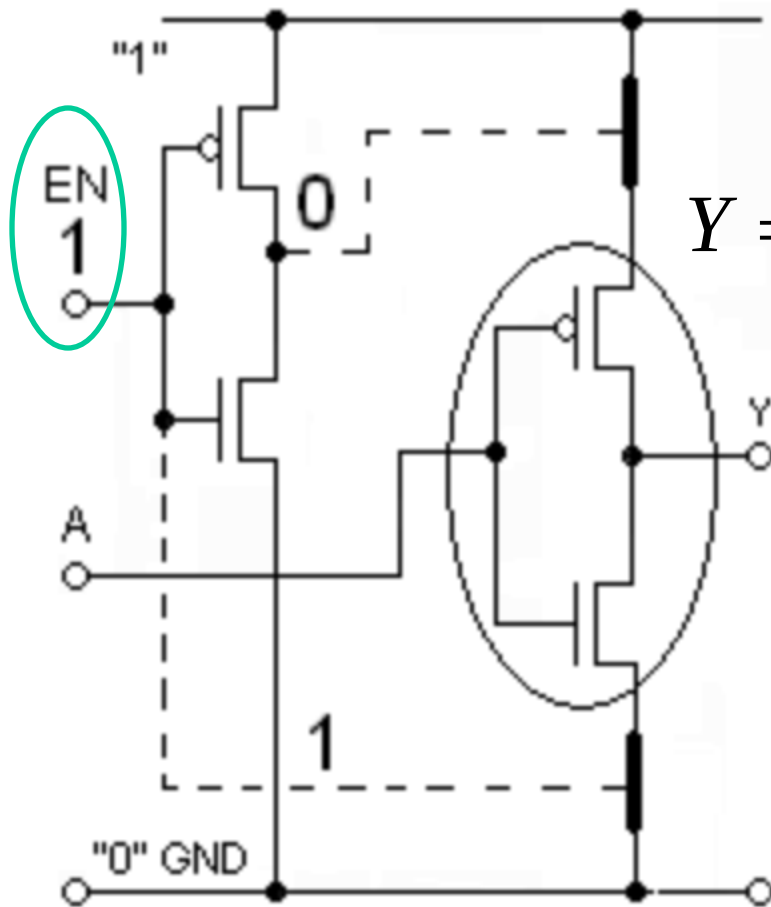
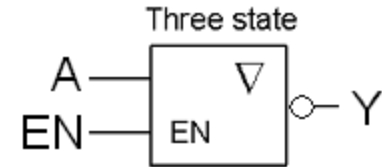
Three-state ?

En CMOS-grind kan förutom "1" eller "0" även förses med ett *tredje* utgångstillstånd – **Three-state "Z"** (= fränkopplad utgång).

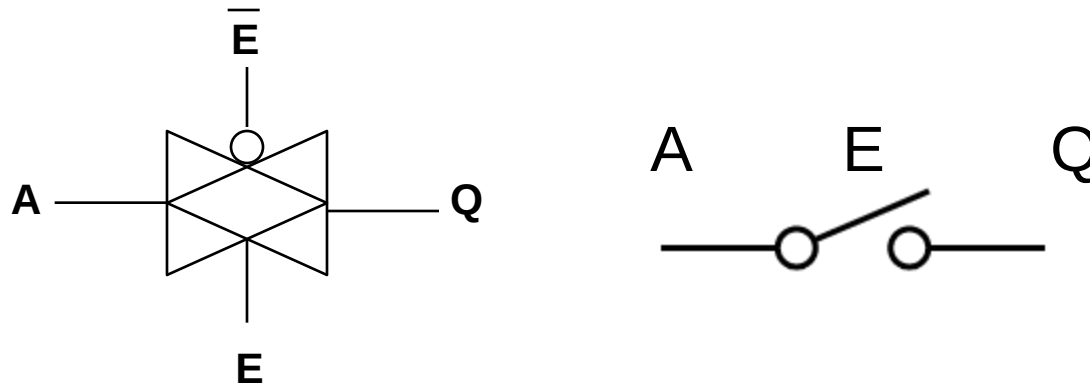
Om många utgångar kopplas ihop till **samma tråd** ("buss") så kan ju bara *en* av utgångarna åt gången få vara aktiv. De övriga hålls i Threestate-tillståndet.



Three state 'Z'



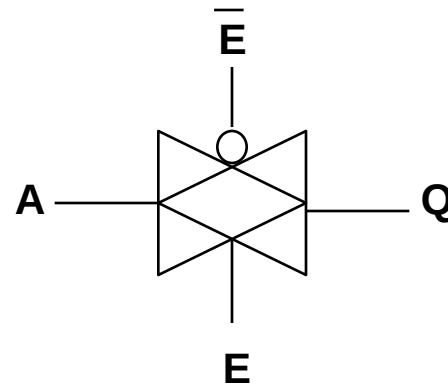
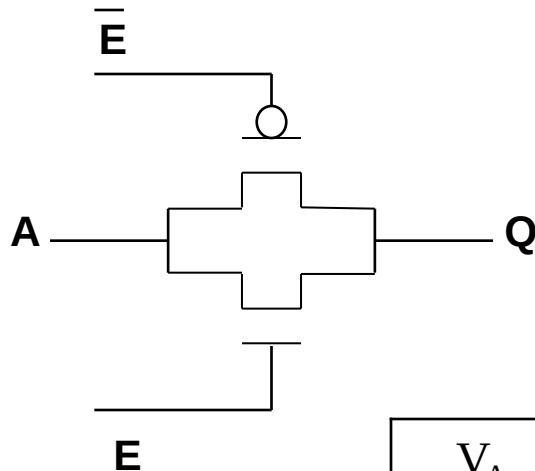
Transmissionsgrinden (Pass gate)



Utan att gå in på kretsdetaljerna så består en transmissionsgrind av en PMOS-transistor i **parallell** med en NMOS-transistor. Grinden styrs med E (och E') och är då att jämföra med en ”vanlig” kontakt. En signal kan gå från A till Q , men även baklänges från Q till A . Transmissionsgrindskopplingar utnyttjar färre transistorer än andra grindar, men har sämre drivförmåga.

Area: $A_{TG} = 2 \text{ Transistors}$

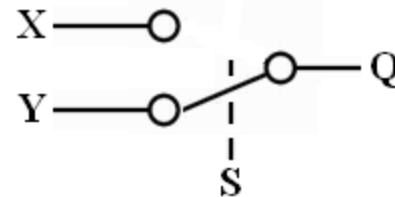
(Transmissionsgrinden)



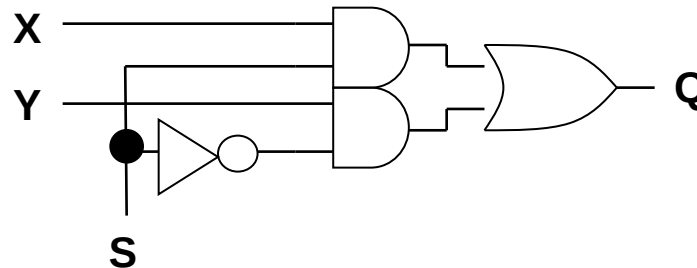
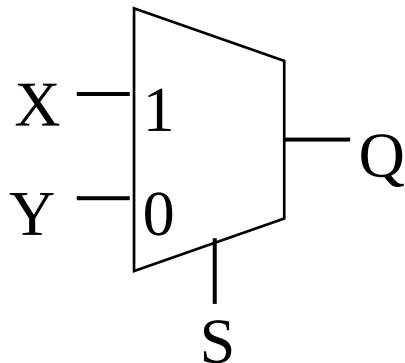
V_A	V_E	V_{OH}
L	L	Z
L	H	L
H	L	Z
H	H	H

Vad är en multiplexor, **MUX**?

En multiplexor är en dataväljare.

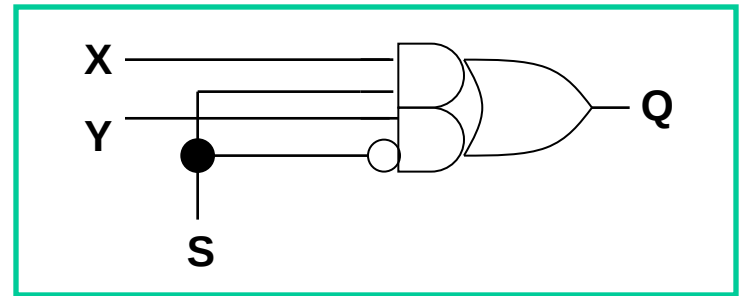
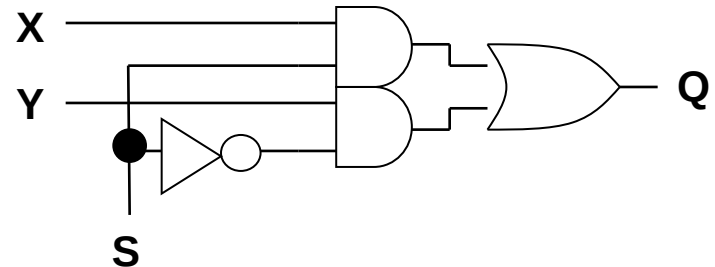
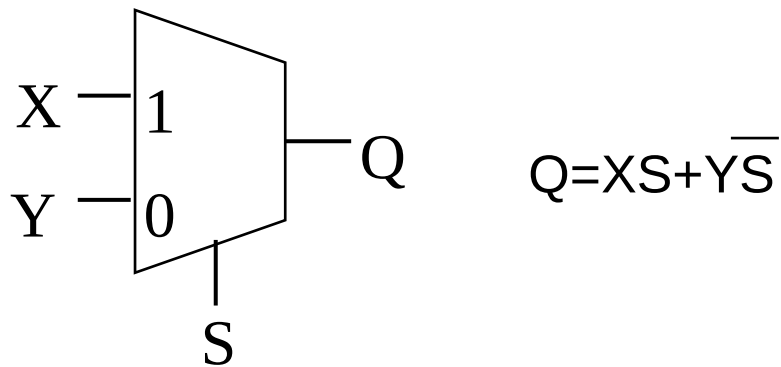


$$Q = XS + \overline{Y}S$$



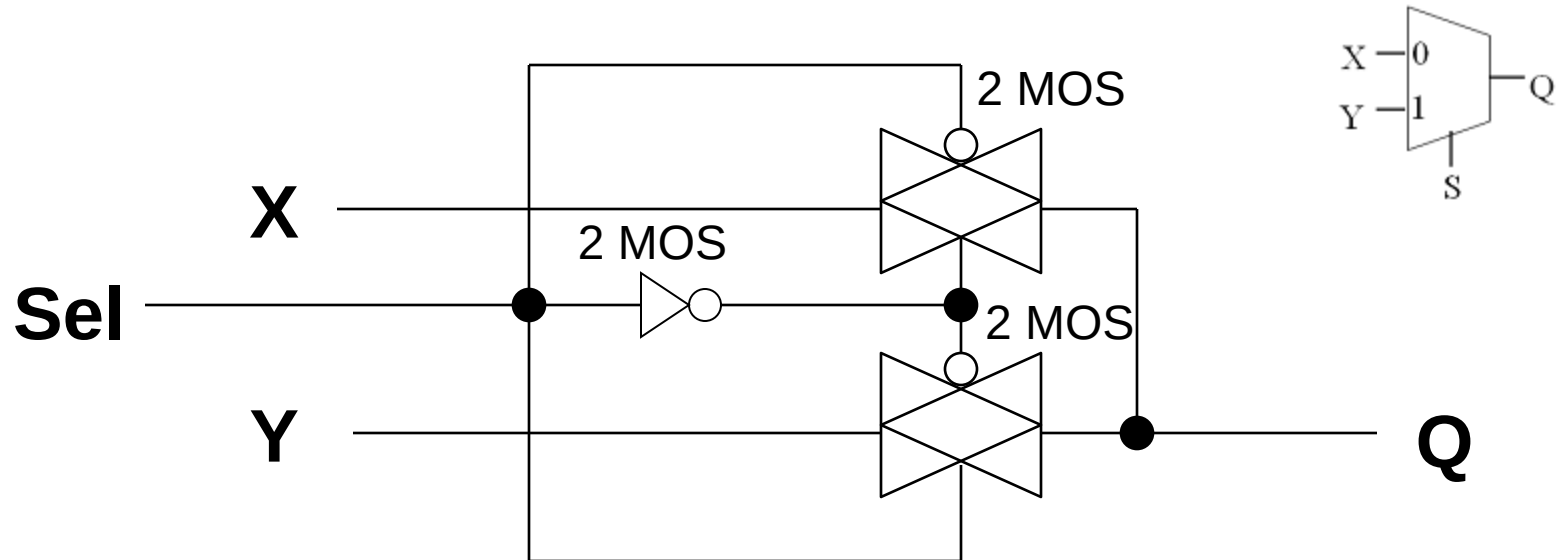
Förenklat ritsätt

Exempel: MUX



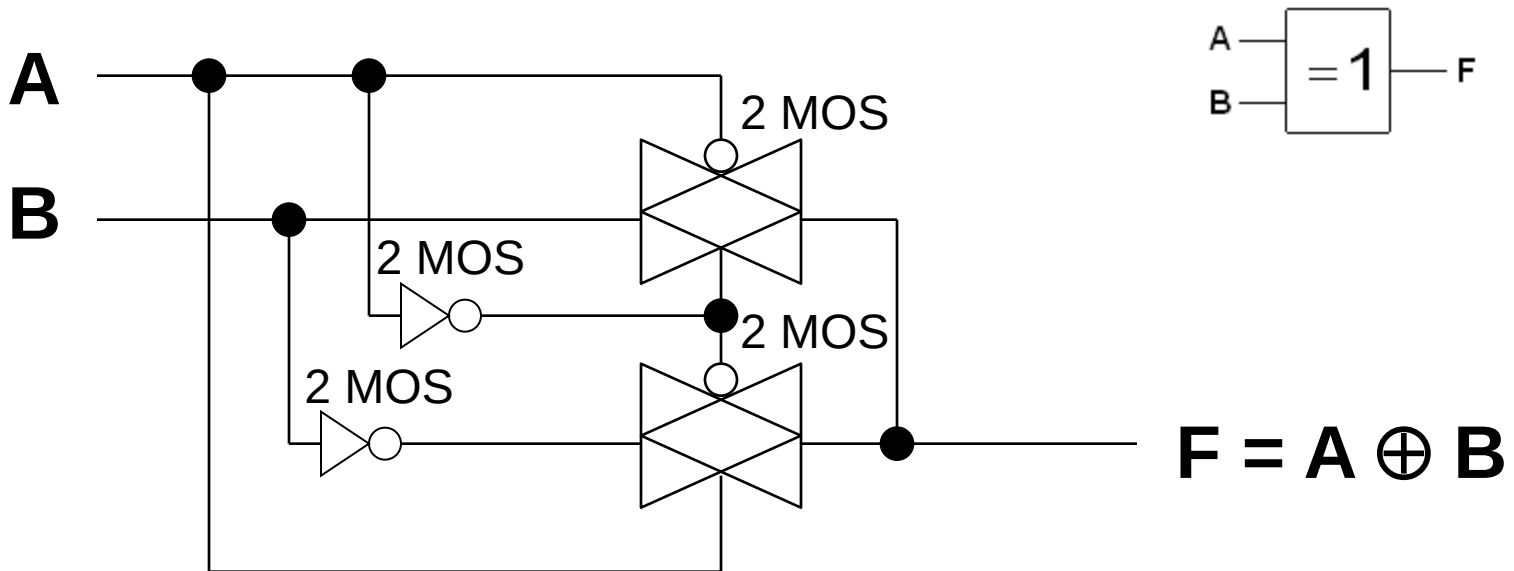
**Av inverteraren blir endast ringen kvar.
Mellanliggande ledningar underförstås.**

MUX med transmissionsgrind



Area: $A_{\text{mux}} = 6$ Transistors

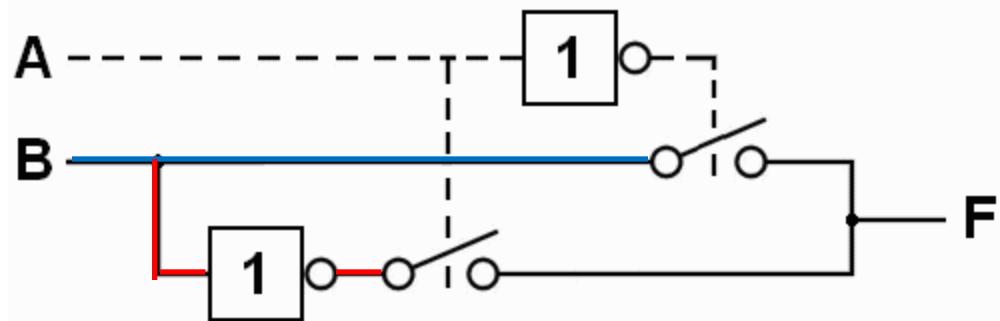
XOR med transmissionsgrind



Area: $A_{\text{XOR}} = 8$ Transistors

*Knappast
självklart?*

(**XOR** med transmissionsgrind)

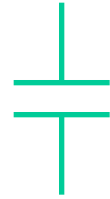


A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

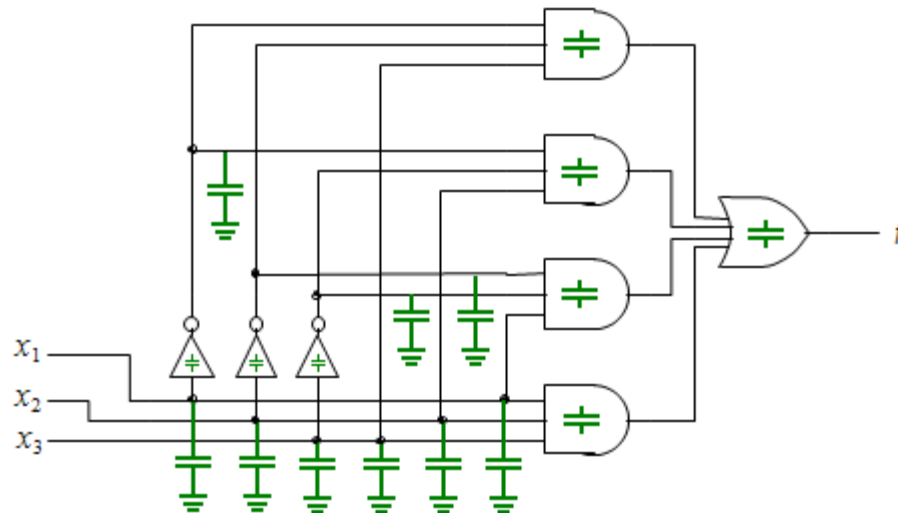
$F = B$

$F = \overline{B}$

Fördröjningar i kretsar



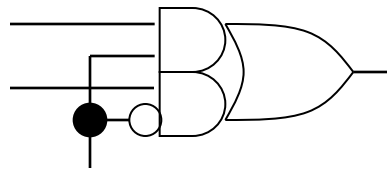
Alla ledningar i elektronikkretsar har kapacitans. Det tar ett tag för spänningar att nå slutvärdet. Dessa fördröjningar i kretsar och *mellan* kretsar begränsar snabbheten.



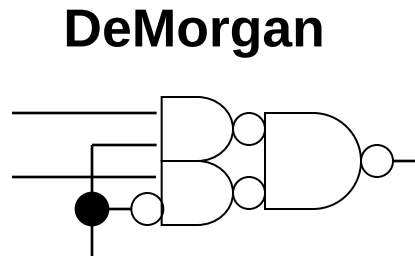
Typiska fördröjningar

NAND,NOR, NOT	T	NAND=standard T
NOT	$\frac{1}{2} T$, 1T	(om NAND-grind)
NAND-NAND	2T	(2 NAND i rad)
AND-OR	4T, 3T	(NAND-NOT+NOR-NOT)
XOR,XNOR,MUX	3...5T	
XOR,MUX (med TG)	2T	

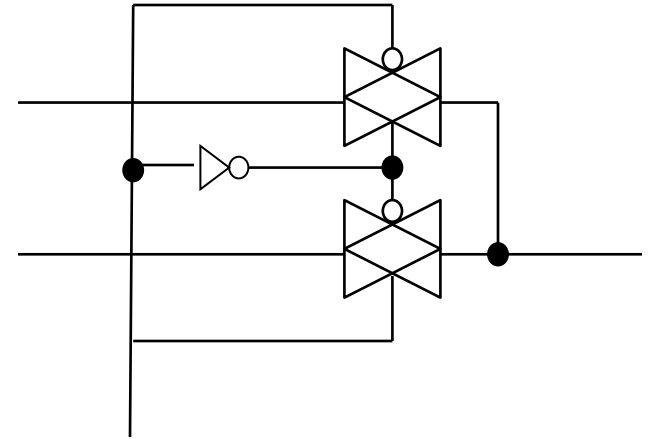
Optimerade strukturer för MUX



AND-OR



NAND-NAND



Area: $A_{\text{MUX}} = 2+6+6+6=20$

Transistoror

Delay: $T_{\text{MUX}} = 5T_{\text{NAND}}$

Area: $A_{\text{MUX}} = 6$ Transistoror

Delay: $T_{\text{MUX}} = \sim 2T_{\text{NAND}}$

Area: $A_{\text{MUX}} = 2+4+4 =$

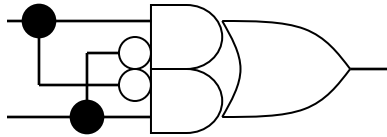
$= 10$ Transistoror

Delay: $T_{\text{MUX}} = 3T_{\text{NAND}}$



Bäst!

Optimerade strukturer för XOR

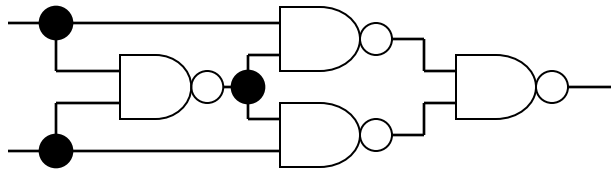


Area: $A_{XOR} = 2 + 2 + 6 + 6 + 6 = 22$

Transistorer

Delay: $T_{XOR} = 5T_{NAND}$

Nand only

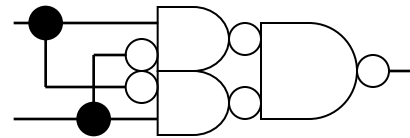


Area: $A_{XOR} = 4 + 4 + 4 + 4 = 16$

Transistorer

Delay: $T_{XOR} = 3T_{NAND}$

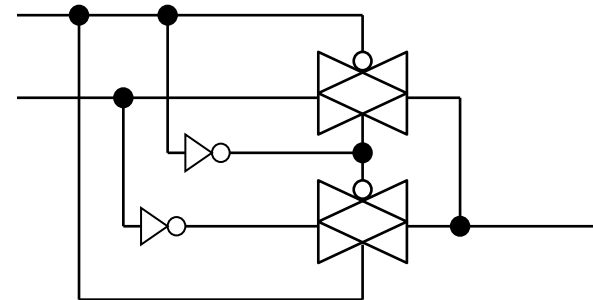
DeMorgan



Area: $A_{XOR} = 2 + 2 + 4 + 4 = 12$

Transistorer

Delay: $T_{XOR} = 3T_{NAND}$



Area: $A_{XOR} = 8$ Transistorer

Delay: $T_{XOR} \sim 2T_{NAND}$

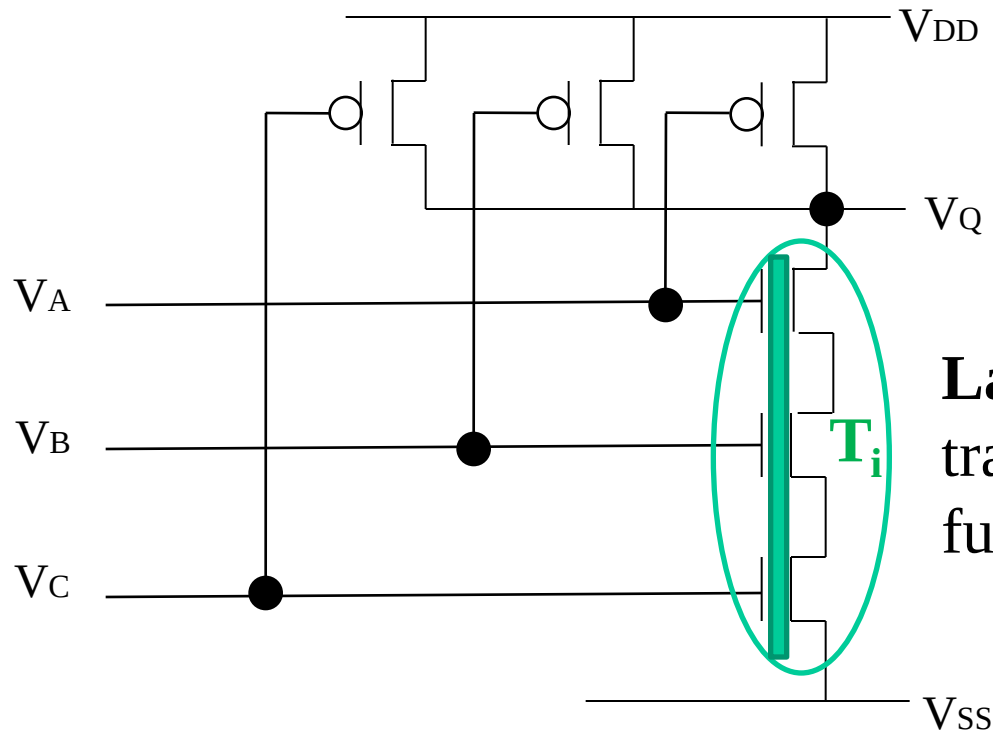
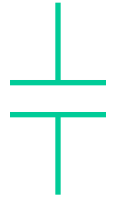


Bäst!

Fan-out och Fan-in

- **Fan-out** - en utgång driver många ingångar. Utgången lastas ned med summan av ingångarnas kapacitanserna $\Rightarrow$ fördröjningen **T** blir **last-beroende**.
- **Fan-in** - en grind har många ingångar. Detta medför att den har fler inre kapacitancer $\Rightarrow$ den inre fördröjningen **T_i** (även kallad den intrinsiska fördröjningen) blir större.

Grindar med flera ingångar

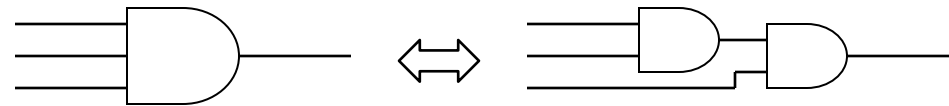


3-input NAND

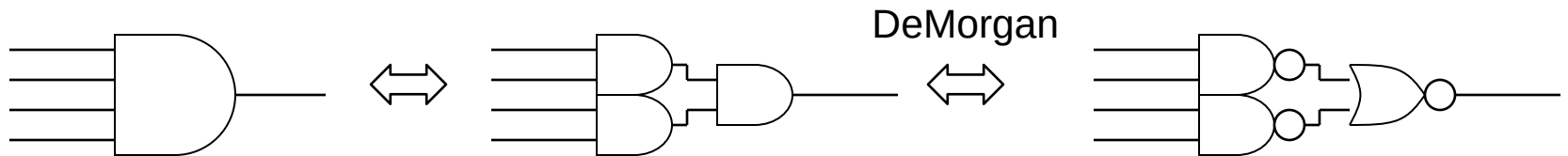
Man använder sällan grindar med fler än **fyra** ingångar.

Lång rad av seriekopplade transistorer ger långsam funktion!

Hög Fan-in löses med trädstrukturer



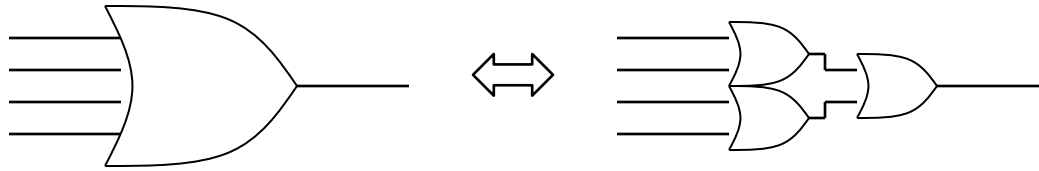
$$a \cdot b \cdot c = a \cdot (b \cdot c)$$



$$a \cdot b \cdot c \cdot d = (a \cdot b) \cdot (c \cdot d) \quad \overline{\overline{(a \cdot b)} + \overline{(c \cdot d)}} = a \cdot b \cdot c \cdot d$$

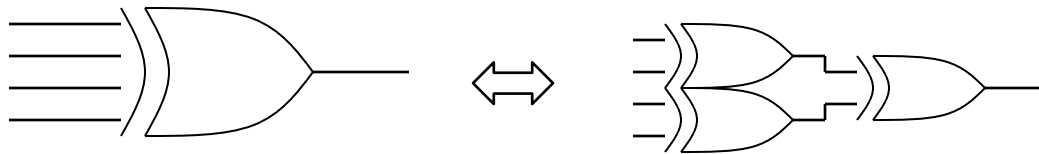
Till priset av ökat grind-djup (fördröjning)

Fler trädstrukturer

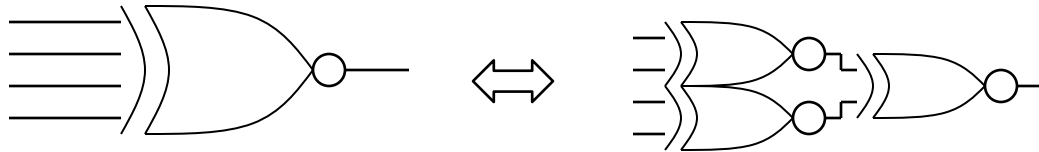


$$a + b + c + d = (a + b) + (c + d)$$

Till priset av ökat grind-djup (fördröjning), men effekten av inre kapacitanser hade blivit värre.



$$a \oplus b \oplus c \oplus d = (a \oplus b) \oplus (c \oplus d)$$

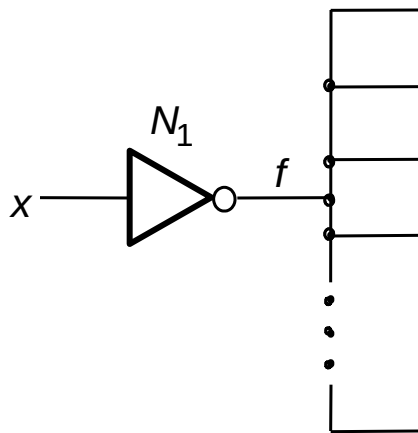


$$\overline{a \oplus b \oplus c \oplus d} = \overline{(a \oplus b) \oplus (c \oplus d)}$$

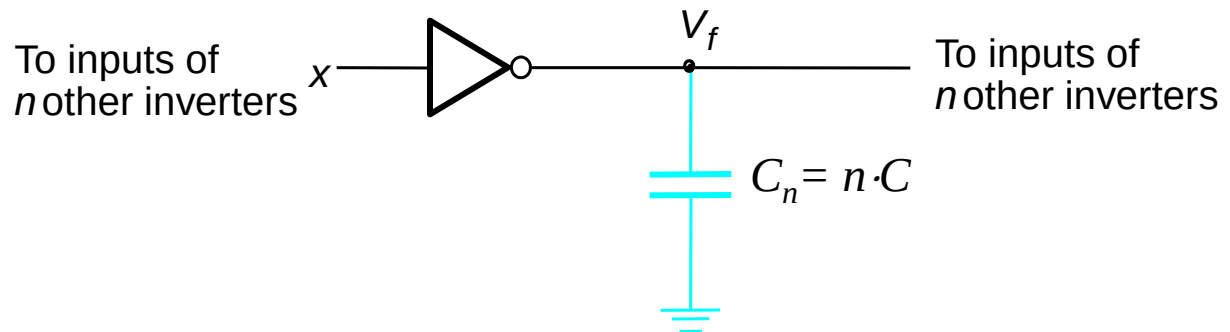
Kan Du bevisa dessa likheter?

Fan-out

- Antalet grindar som en grind driver betecknas som fan-out
- Alla grindar som drivs ökar den kapacitativa lasten



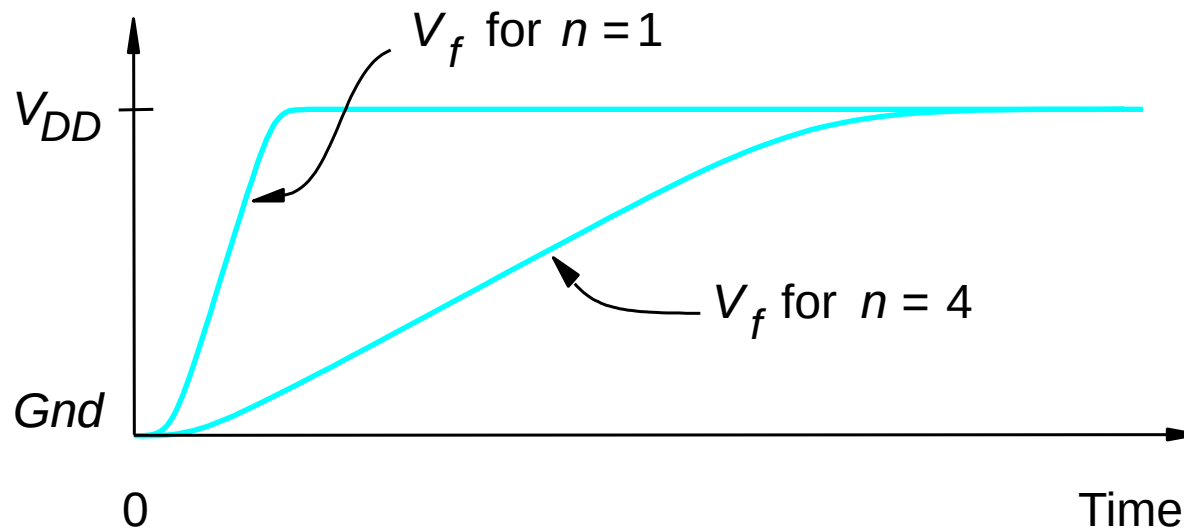
(a) Inverter that drives n other inverters



(b) Equivalent circuit for timing purposes

Fan-out

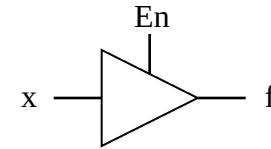
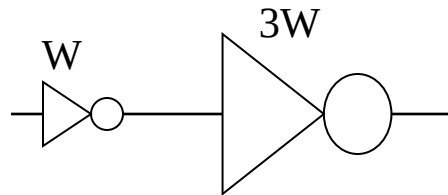
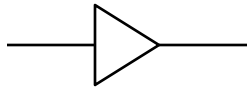
- Fördörningen för olika fan-outs



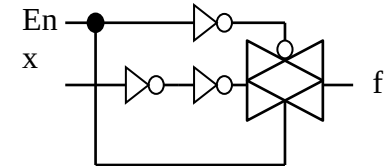
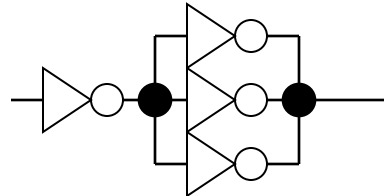
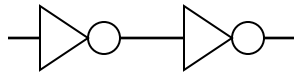
Buffer

- En buffer är en krets som implementerar funktionen $f(x) = x$ (det vill säga ut = in)
- Idén med bufferten är att ökar drivförmågan av kapacitativa laster
 - För att öka drivförmågan så använder man större transistorer
 - Buffrar kan dimensioneras så att de kan driva större strömmar

Hög Fan-out – använd buffer



x	En	f
0	0	Z
0	1	0
1	0	Z
1	1	1



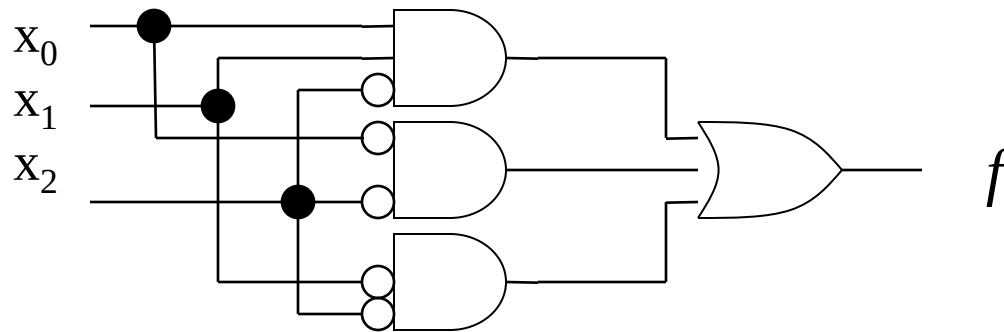
Non-inverting Buffer

High-Fan-Out Buffer

Tri-state Buffer

Critical path (den längsta vägen)

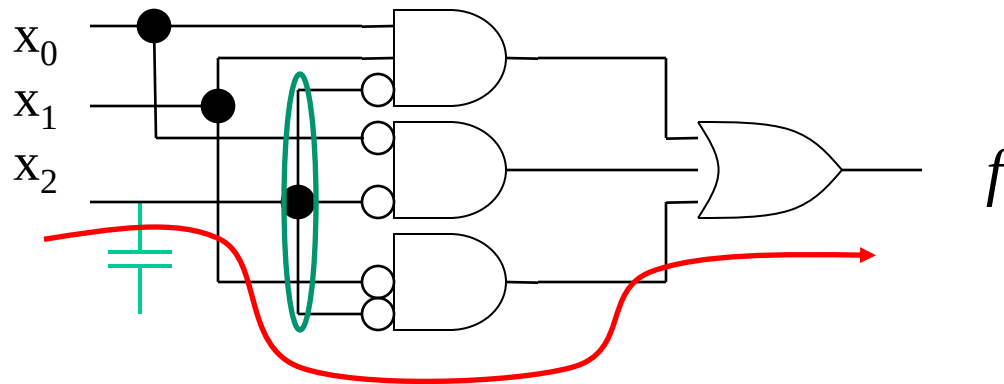
$$f = x_0 x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_0 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 \bar{x}_2$$



Vilken väg till utgången tar längst tid? $x_0 x_1 x_2$?

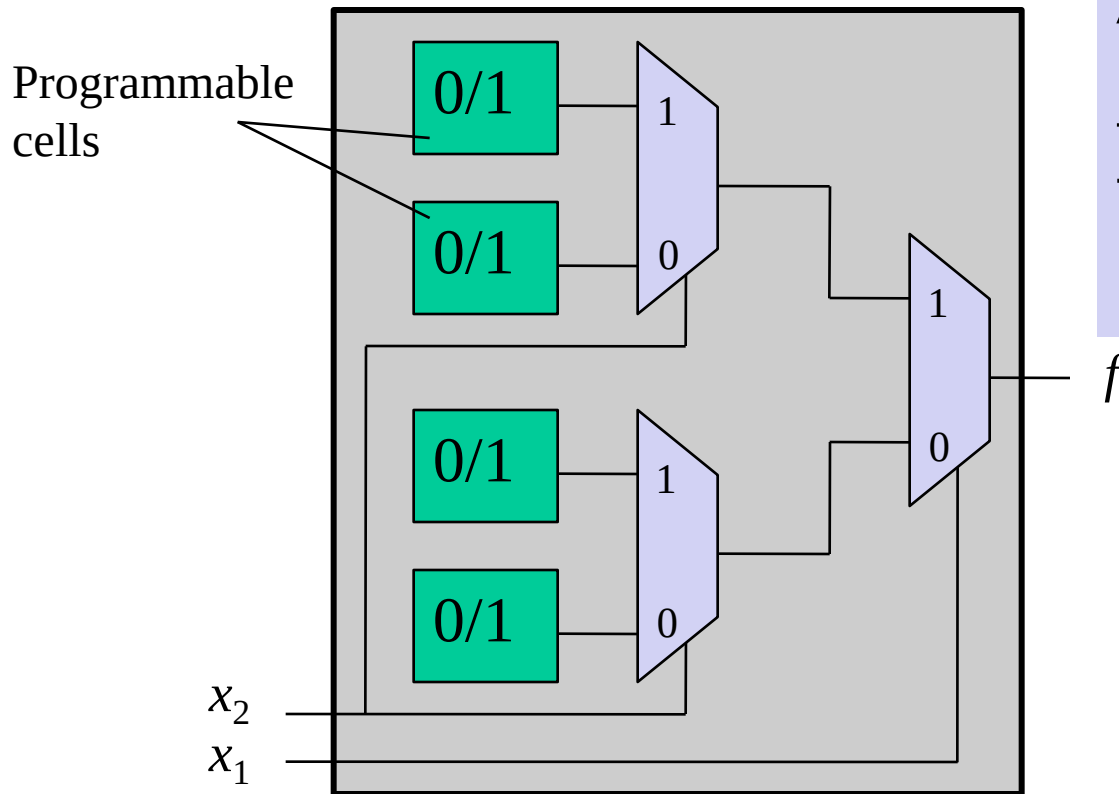
”Critical path”

$$f = x_0 x_1 \overline{x_2} + \overline{x_0} \overline{x_2} + \overline{x_1} \overline{x_2}$$



x_0 x_1 x_2 passerar alla var sin NOT , AND, och OR, på vägen mot utgången f , men x_2 belastas av *tre* ingångar, x_0 och x_1 bara av *två*. ”Critical path” blir x_2 !

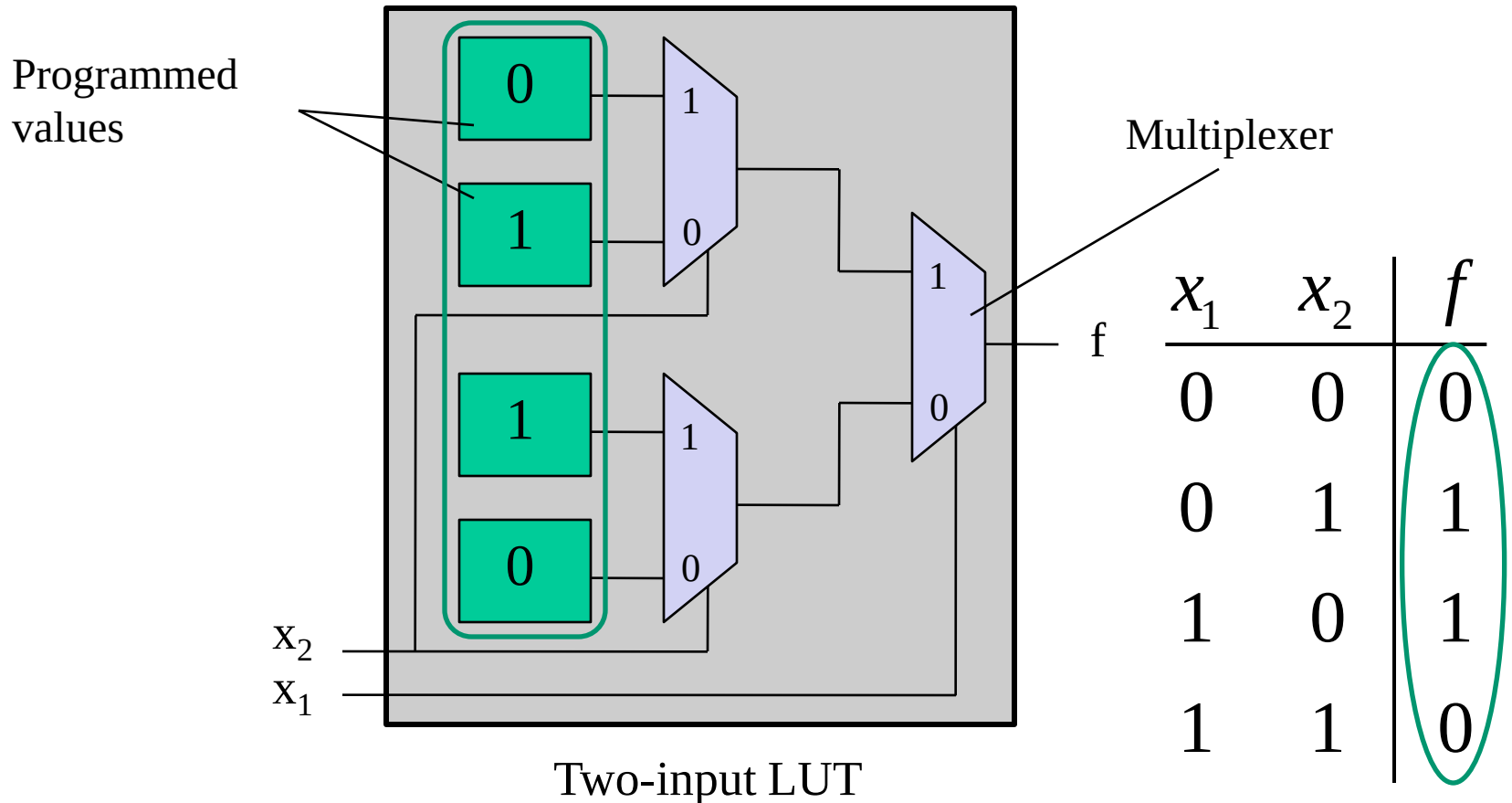
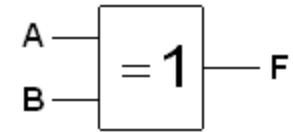
Look-up-tables (LUT)



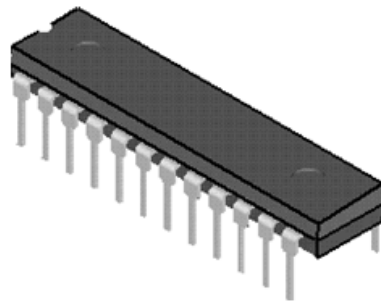
Two-input LUT

A LUT with n inputs can realize all combinational functions with n inputs
The usual size in an FPGA is $n=4$

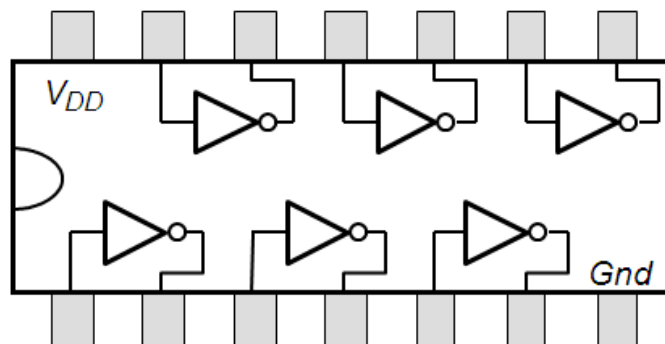
Ex. XOR-funktion



7400-series standard chips



(a) Dual-inline package



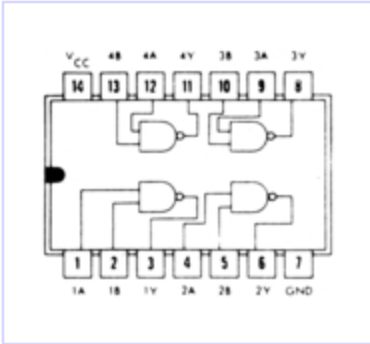
(b) Structure of 7404 chip

Standardkretsarna används mest som reservdelar

ELFA
Allt mellan antenn och jord

Logikkrets DIL-14, 74HC00N

Aktiva komponenter > Digitala kretsar / Utvecklingsverktyg / Kristaller > 74-logik

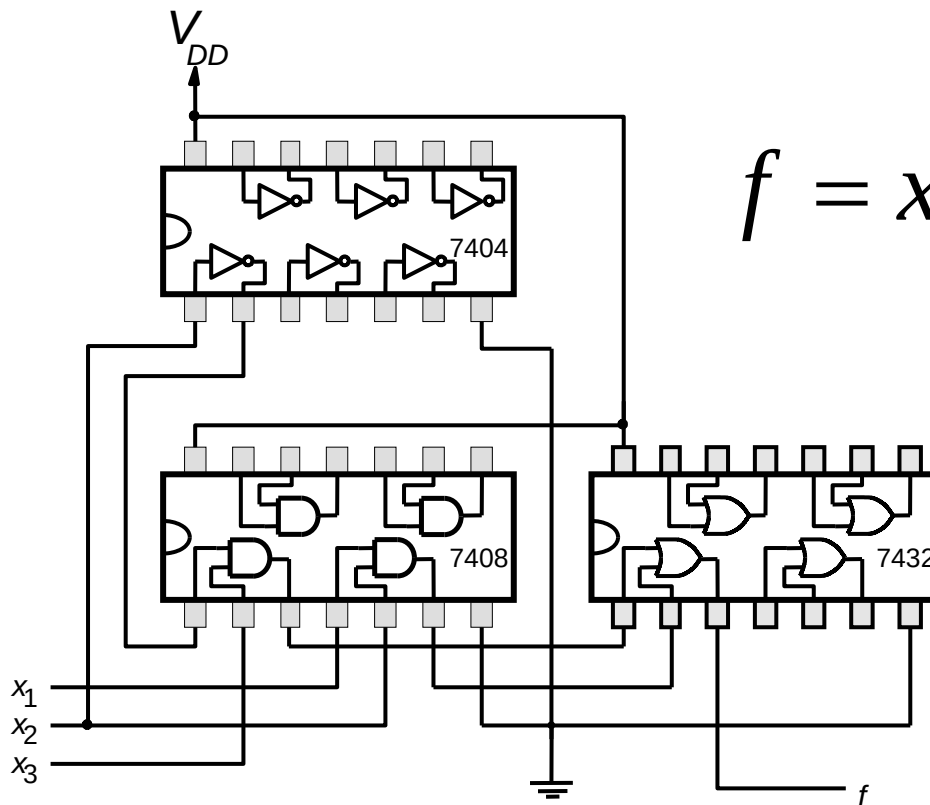


Kvantitet	Artikelnr.	Pris/styck
1	73-500-10	1- 5.77
Köp		25- 3.35
		100- 2.42
☒ Levereras normalt samma dag		
☒ Uppfyller ROHS direktivet		
Saldo		
Centrallager Veddesta		Saldokontroll
Tillgängligt lagersaldo		1175
Vi reserverar oss för mellanförskning och lagersaldofel.		

Inte så dyra!

Men många fler än skolorna behöver kretsarna. Det finns många kvar i lager ...

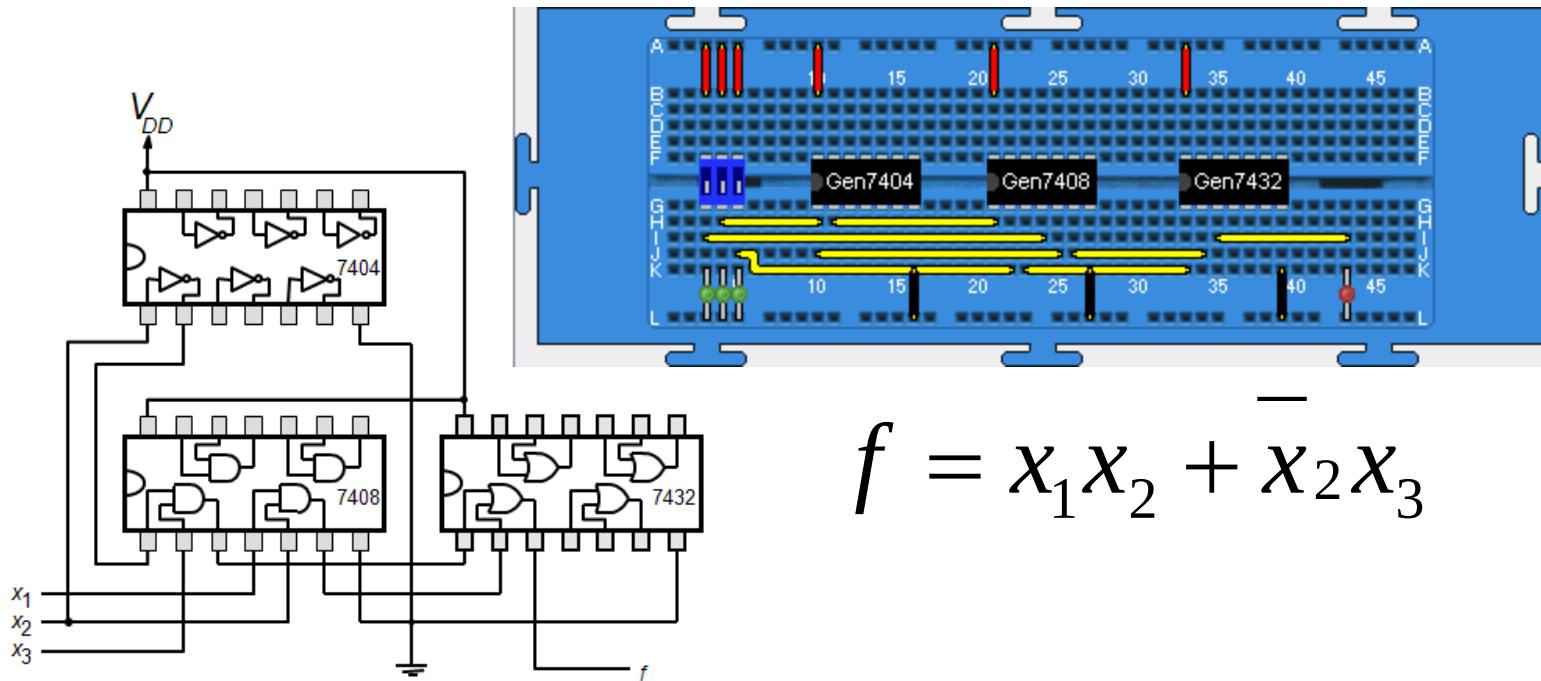
Implementering av en logisk funktion



$$f = x_1x_2 + \overline{x_2}x_3$$

Kopplingsdäcksimulator

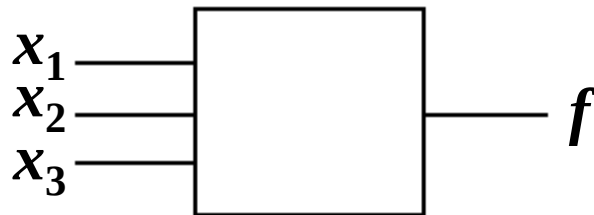
Inför laborationerna ska Du prova att koppla upp kretsarna med en kopplingsdäcksimulator!



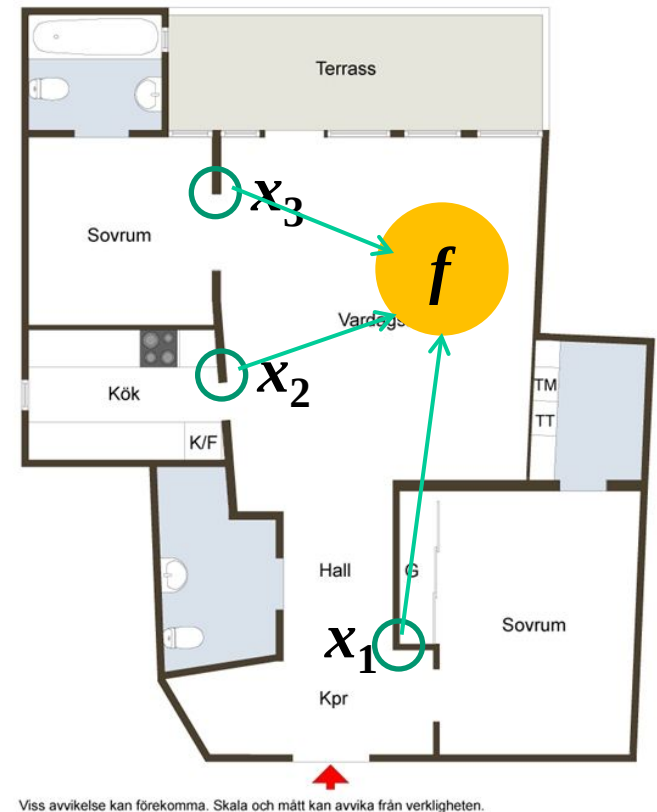
Kommer Du ihåg? Trevägs ljuskontroll

Brown/Vranesic: 2.8.1

Antag att vi behöver kunna tända/släcka vardagsrummet från tre olika ställen.



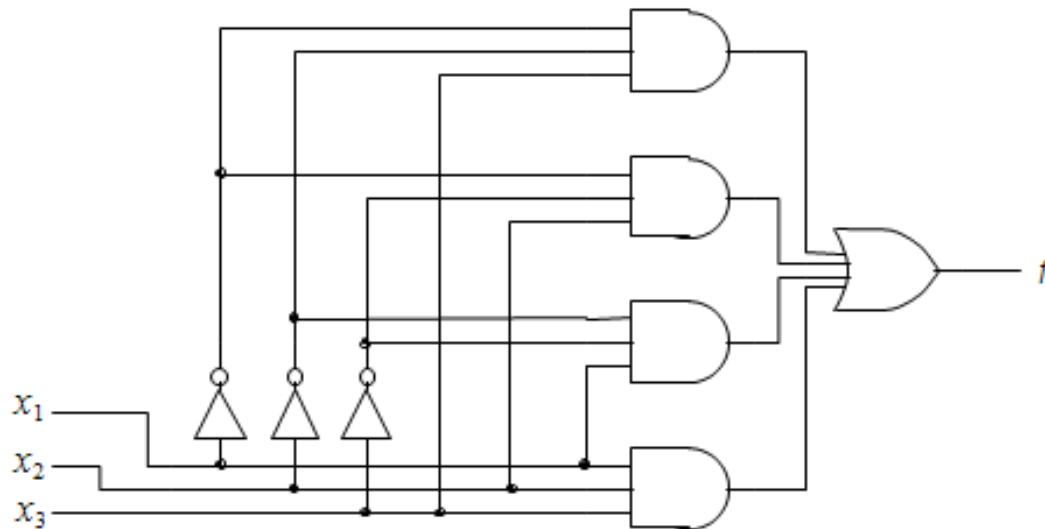
x_1	x_2	x_3	f
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1



Trevägs ljuskontroll



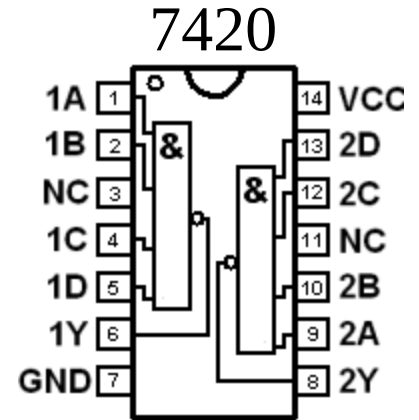
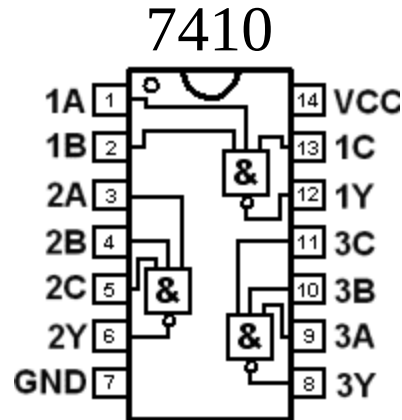
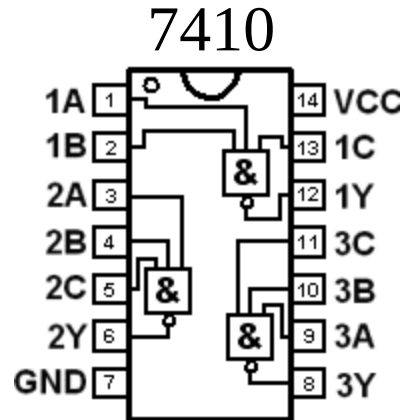
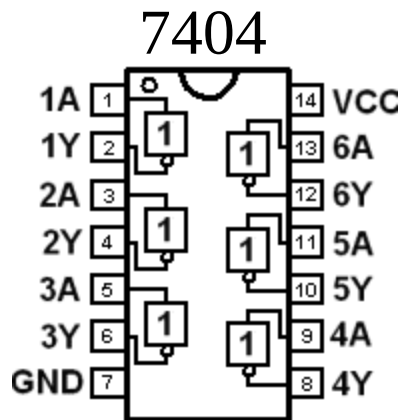
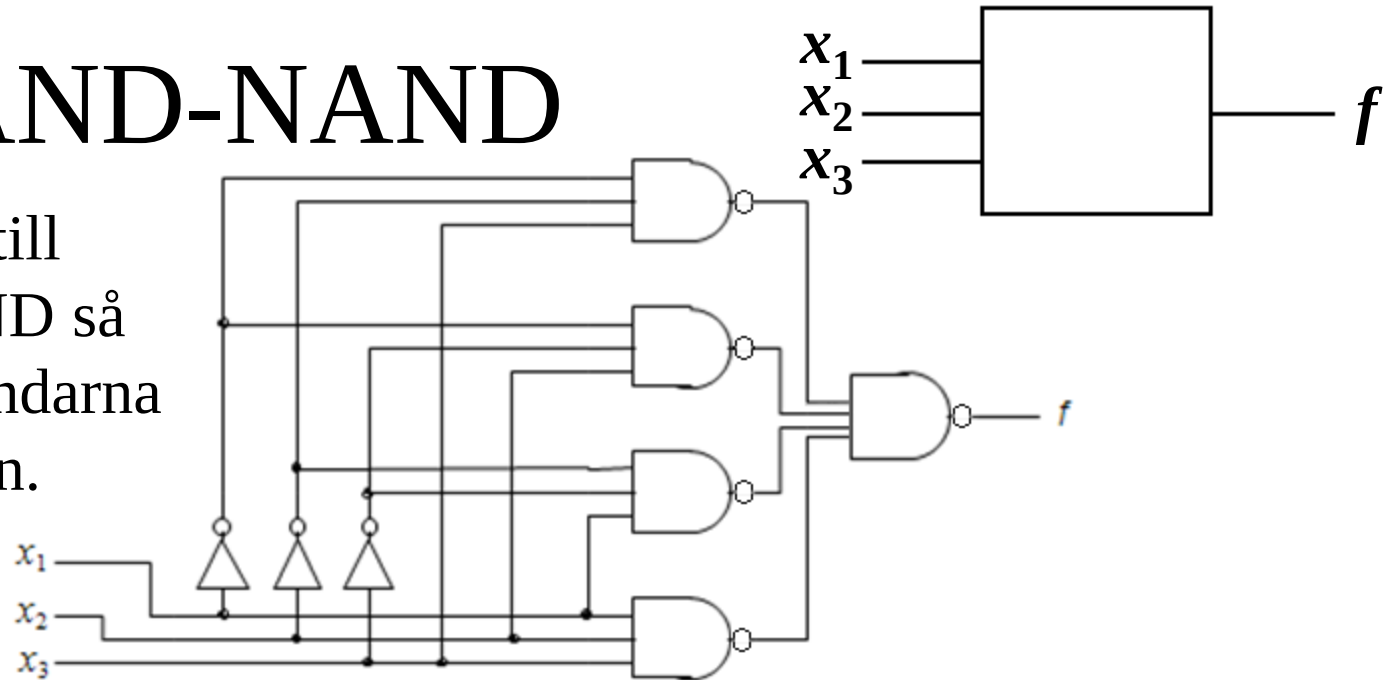
$$f = \sum m(1,2,4,7) = \bar{x}_1\bar{x}_2x_3 + \bar{x}_1x_2\bar{x}_3 + x_1\bar{x}_2\bar{x}_3 + x_1x_2x_3$$



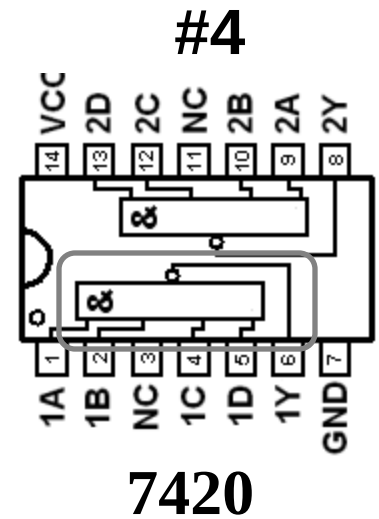
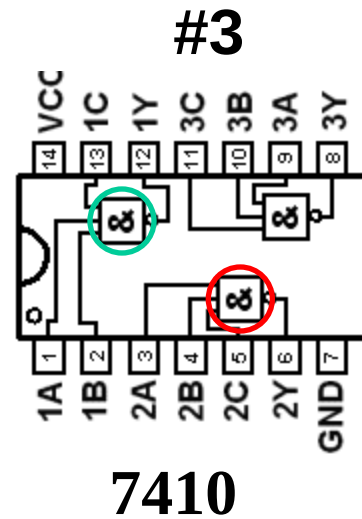
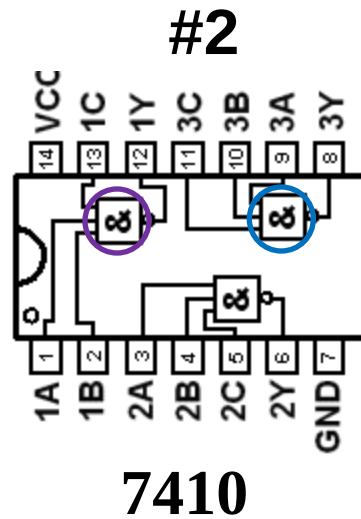
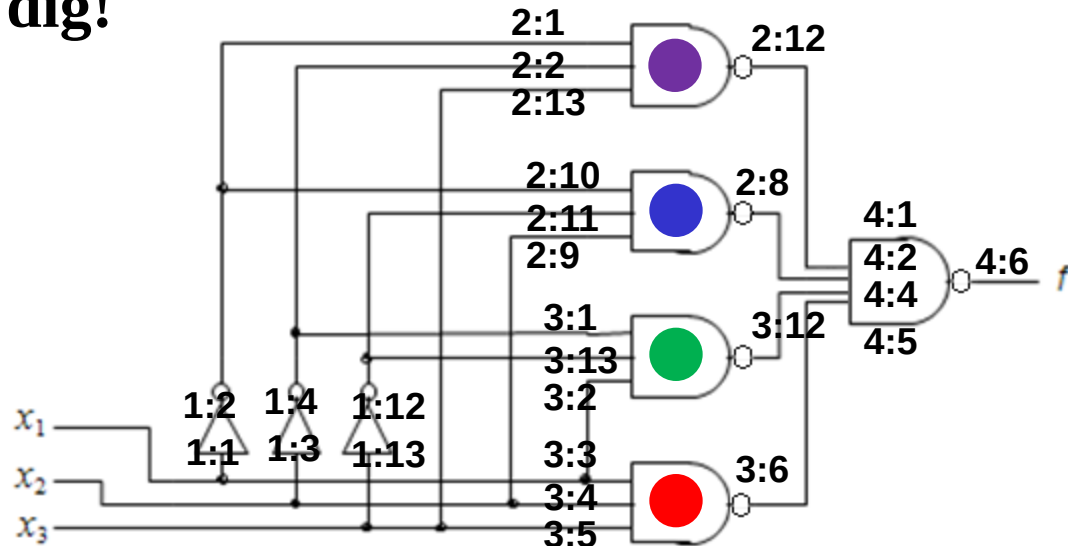
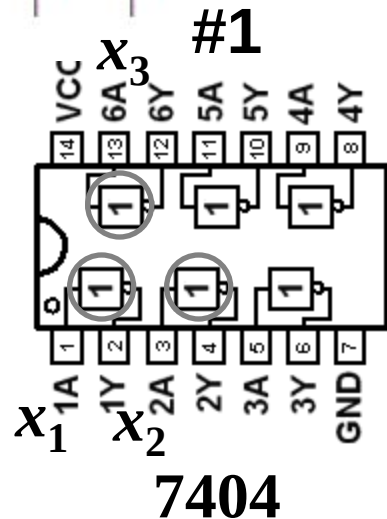
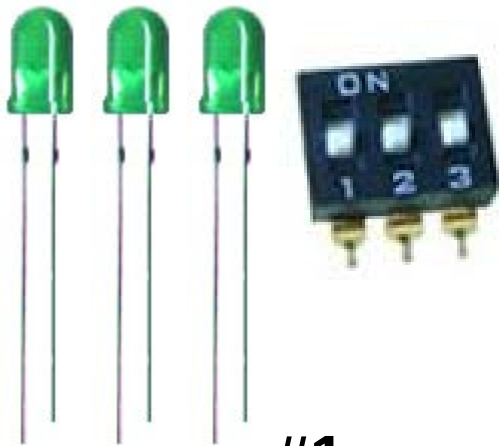
(a) Sum-of-products realization

NAND-NAND

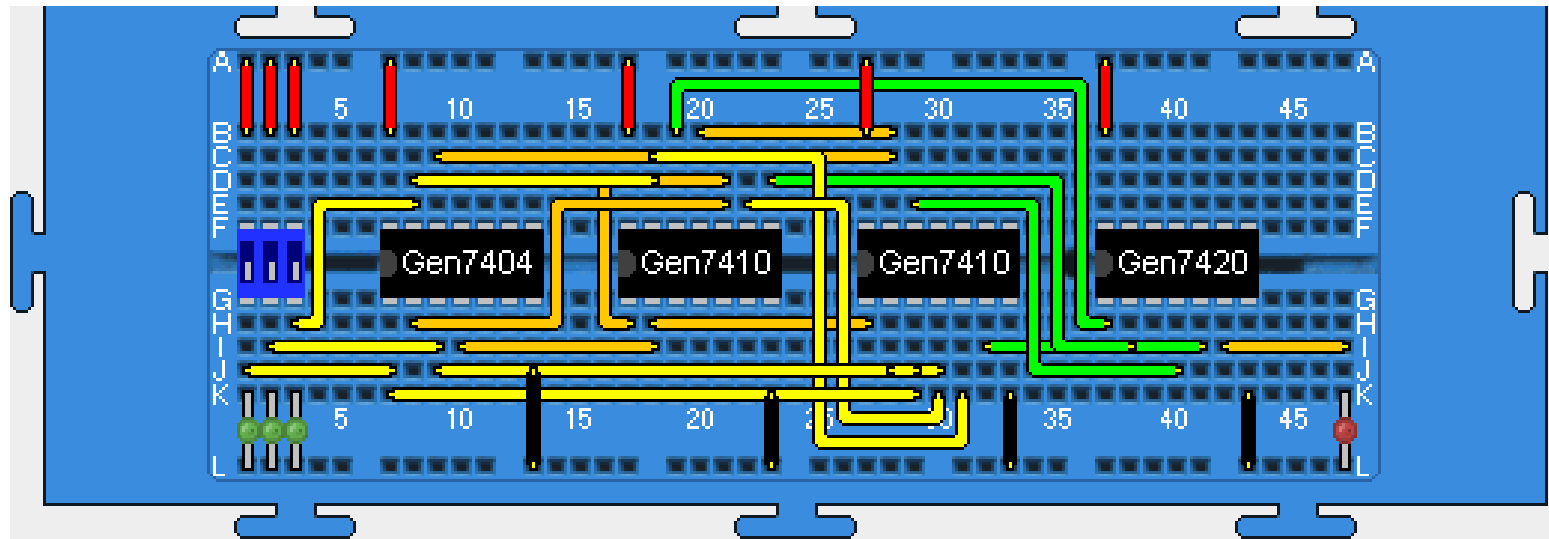
Om vi byter till
NAND-NAND så
finns alla grindarna
till simulatorn.



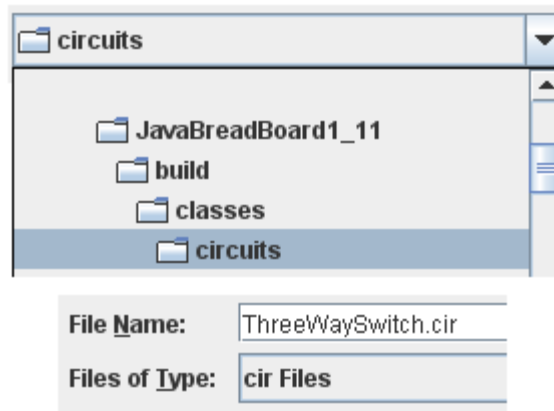
Du måste skriva dit pin-nummer i schemat – annars kommer Du att villa bort dig!



Simulera!



Färdig fil finns

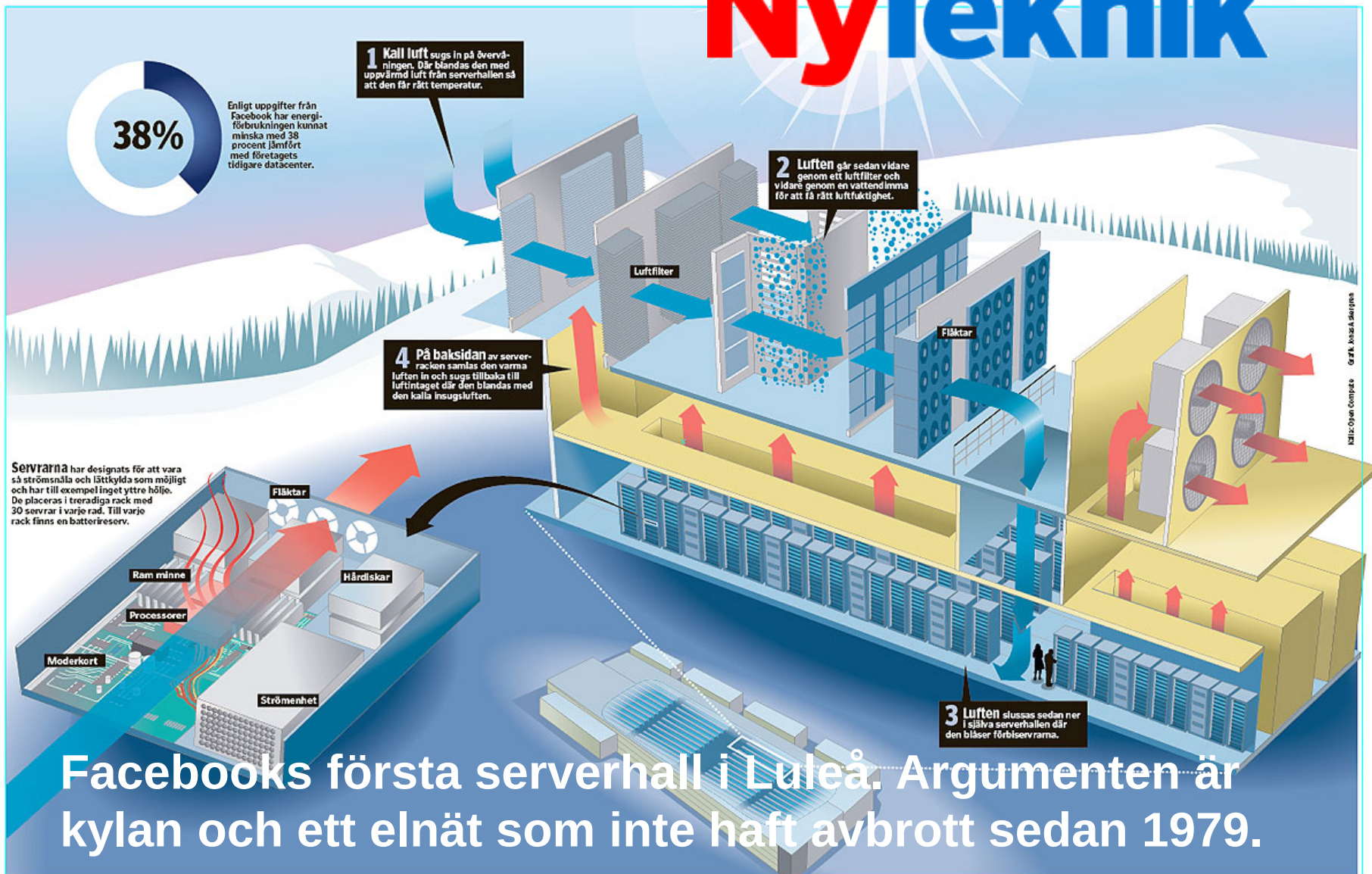


Färdig JBB-simuleringsfil finns. Lägg den i circuitsmappen.

ThreeWaySwitch.cir

Sammanfattning

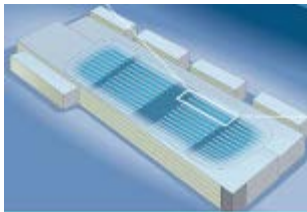
- Logiska grindar kan implementeras med CMOS-teknologin
- CMOS-kretsar har en fördröjning
- **CMOS-kretsar förbrukar relativt lite effekt**



Facebooks första serverhall i Luleå. Argumenten är kylan och ett elnät som inte haft avbrott sedan 1979.

Facebooks serverhall i Luleå

Driften av de tusentals servrarna slukar enorma mängder energi. Fullt utbyggd kräver anläggningen **120 MW**, mer än SSAB:s stålverk!



Hur skulle världen vara utan CMOS?

