

Digitallogik

Agenda

- Fra transistorer til logiske "porte"
- Kombinatoriske kredsløb
 - Multiplexor
 - Addition
 - Aritmetisk-logisk enhed (ALU)
- Tilstandselementer
 - Lagring af en enkelt bit
 - Register
 - Register-fil/bank/lagerblok
- Lidt om CMOS og teknologiudvikling (hvis vi har tid)

CS:APP Chapter 4

Computer Architecture

Logic Design

Randal E. Bryant

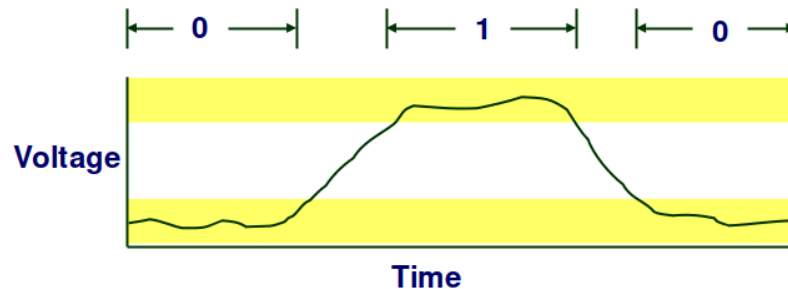
Carnegie Mellon University

Maltrakteret af Finn Schiermer Andersen

CS:APP3e

Etablering af det digitale niveau

Digital Signals



- Use voltage thresholds to extract discrete values from continuous signal
- Simplest version: 1-bit signal
 - Either high range (1) or low range (0)
 - With guard range between them
- Not strongly affected by noise or low quality circuit elements
 - Can make circuits simple, small, and fast

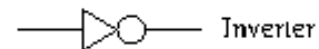
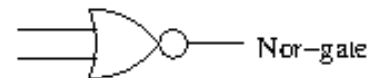
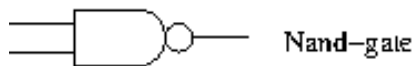
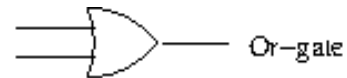
Porte. De simpleste byggeklodser

A B (A and B) (A nand B) (A or B) (A nor B) (A xor B)

0	0	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1
1	0	0	1	1	0	1
1	1	1	0	1	0	0

A not A

0	1
1	0



Implementation af porte

Den grundlæggende funktionalitet kan implementeres på et utal af måder

Man kan f.eks. bruge tryk (luft eller vand) til at repræsentere 1 og mangel på tryk til at repræsentere 0. Eller omvendt. Og så bygge en hel computer op omkring det. Blot man kan lave en ventil der kan styres af tryk, så er den ged barberet.

Man kan også finde nogle klodser i Minecraft og sætte dem sammen.

Men vi vil interessere os for implementationer i CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductors.

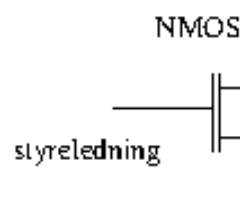
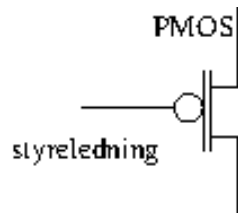
Transistorer

En transistor i CMOS er en kontakt som kan styres af en spænding.

Der er to slags transistorer.

- PMOS: kontakten er åben, når der ikke er spænding på styreledningen
- NMOS: kontakten er åben, når der er spænding på styreledningen

I CMOS bruges de altid parvis for at minimere strømforbrug.

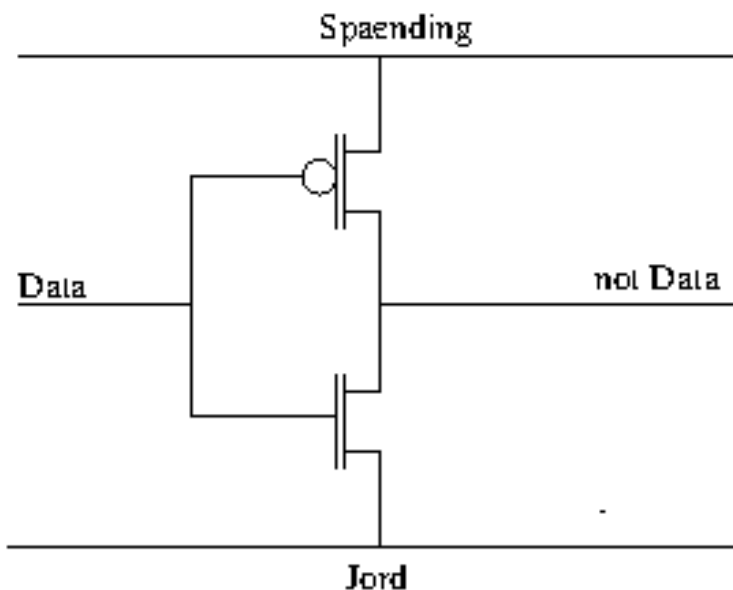


I CMOS skal man altid bruge PMOS transistorer til at løfte spændingen (dvs forbinde direkte eller indirekte til strømforsyningen), mens NMOS skal bruges til at sænke spændingen (dvs forbinde direkte eller indirekte til "jord").

Implementation af en inverter

Den simpleste digitallogiske byggekreds:

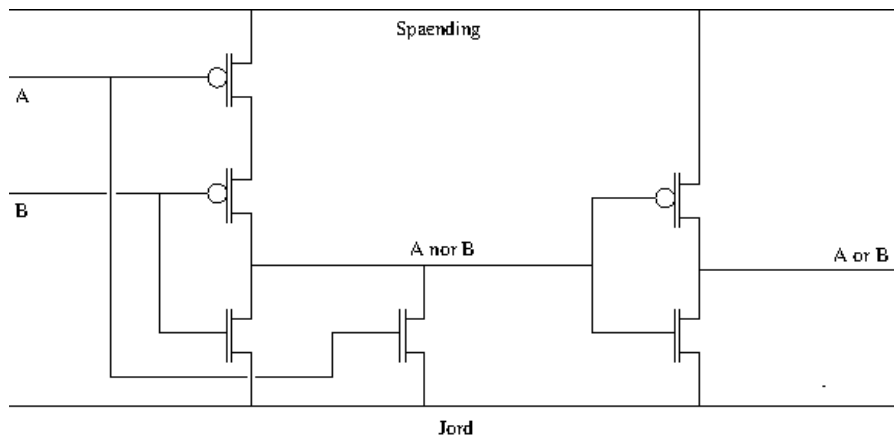
Inverter



Ved input tæt på 0 eller tæt på 1, bruges minimalt strøm. Men ved input i området midt imellem kan der løbe mere strøm. Det giver varme. Så tilstandsskift skal helst være hurtige.

Implementation af en Or-port

Og en Nor-port.



A B Nor Or

0 0 1 0

0 1 0 1

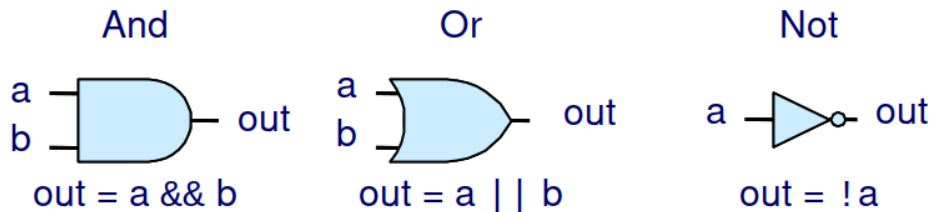
1 0 0 1

1 1 0 1

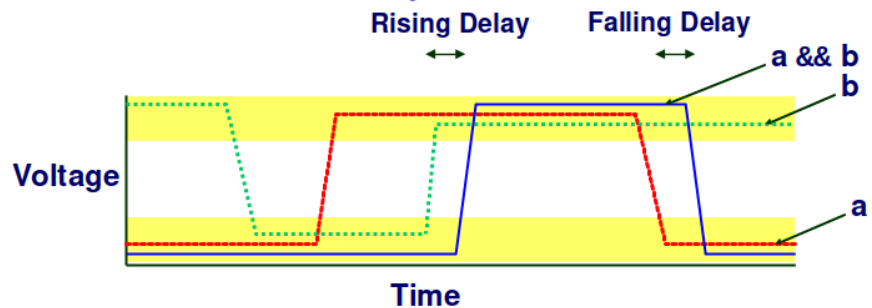
En Or-port laves af en Nor-port med en inverter bagefter

Port - opførsel over tid

Computing with Logic Gates



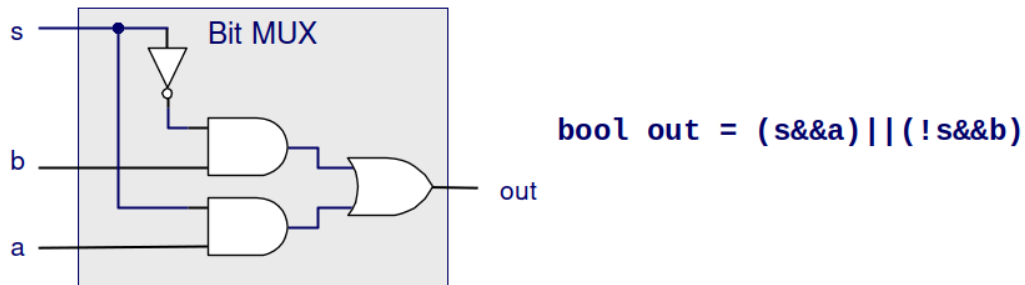
- Outputs are Boolean functions of inputs
- Respond continuously to changes in inputs
 - With some, small delay



Sammensatte (men simple) digitallogiske byggeklodser

Sådan laves en multiplexor

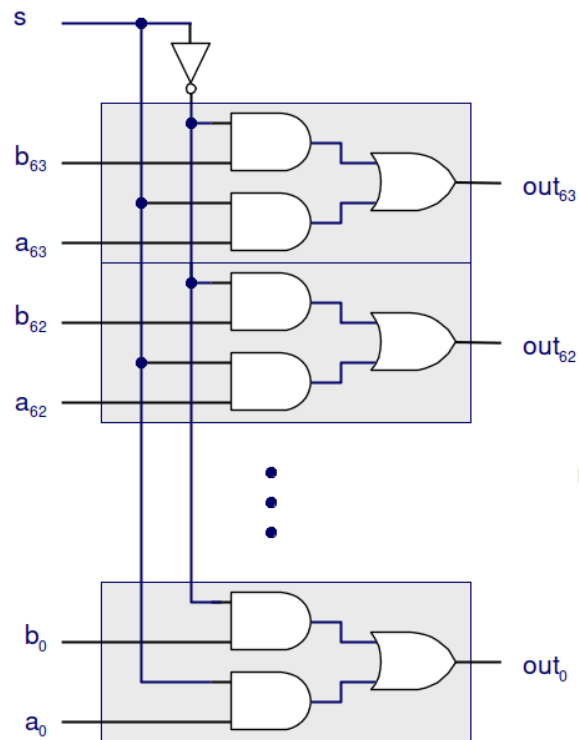
Bit-Level Multiplexor



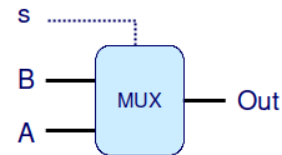
- Control signal *s*
- Data signals *a* and *b*
- Output *a* when *s*=1, *b* when *s*=0

Mux for et helt "ord"

Word Multiplexor



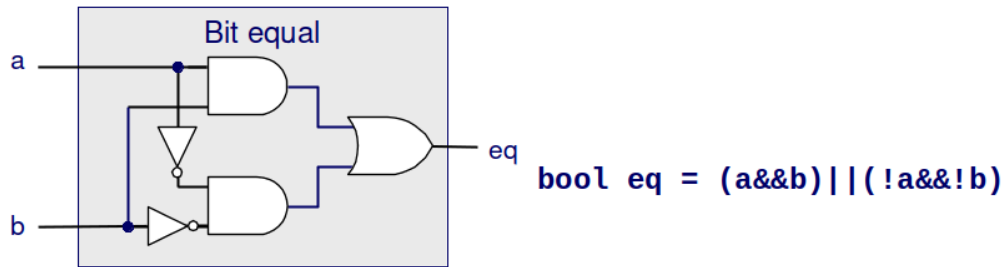
Word-Level Representation



- Select input word **A** or **B** depending on control signal **s**

Sådan laves en "er lig med"

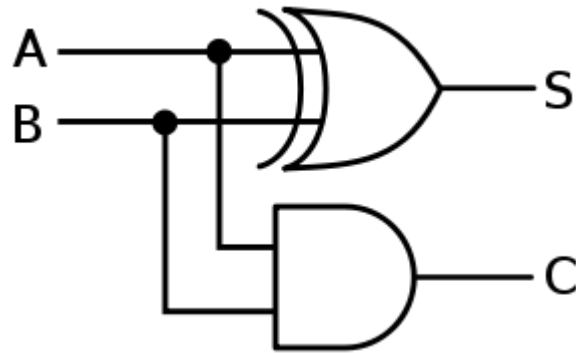
Bit Equality



- Generate 1 if a and b are equal

Addition af 2 bit

Half-adder (2-bit adder)

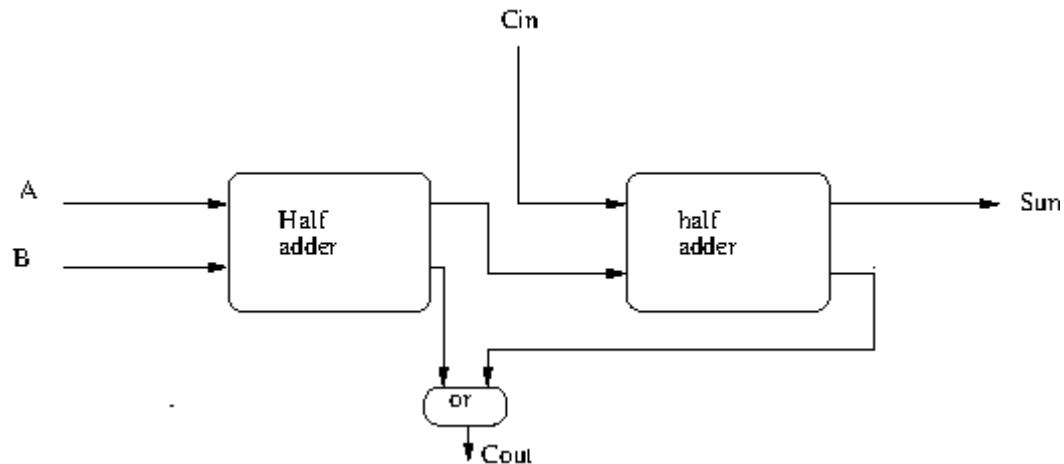


A B Sum Mente

0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	1

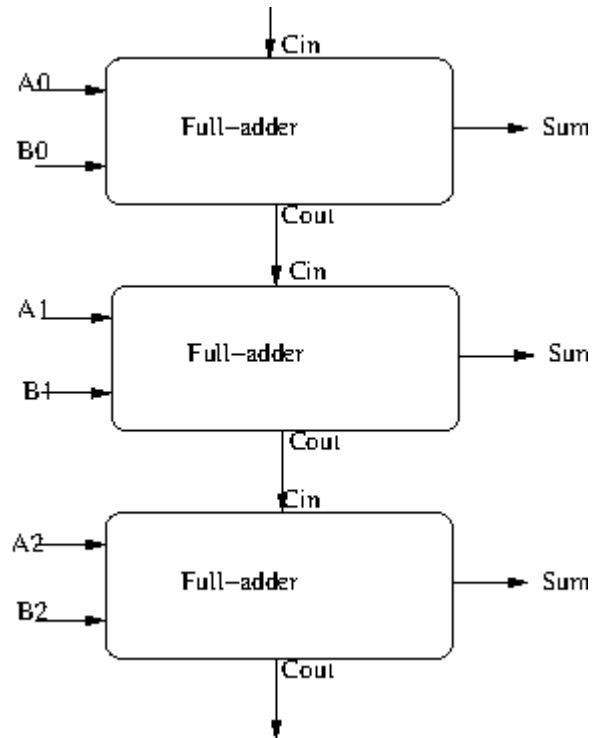
Addition af 3 bit (hvad skal man med det?)

Full-adder (3-bit adder)



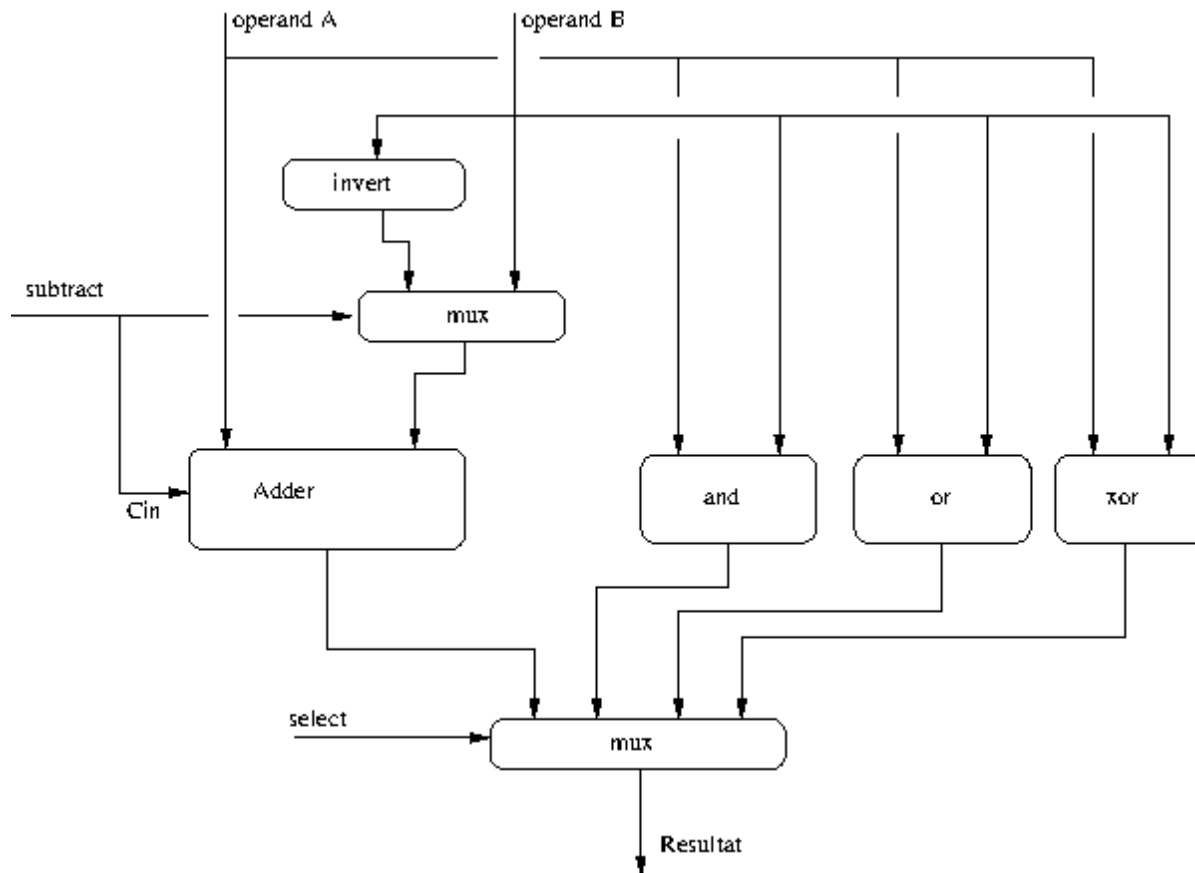
Addition

Ripple-Carry-adder (3 bit), addition bit-by-bit



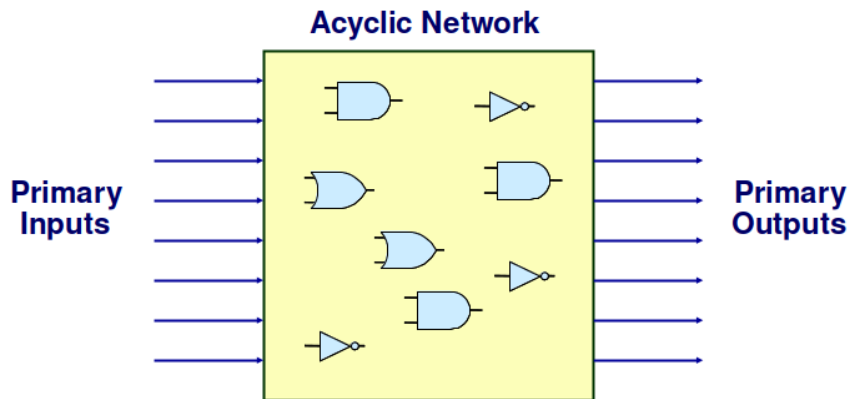
Store klodser laves af små klodser

Aritmetisk-Logisk enhed (ALU)



Sammenfatning (Kombinatorisk logik)

Combinational Circuits



Acyclic Network of Logic Gates

- Continuously responds to changes on primary inputs
- Primary outputs become (after some delay) Boolean functions of primary inputs

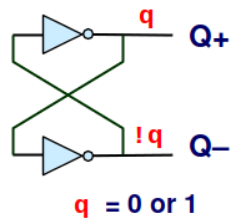
Tilstandselementer

Lagring af en enkelt bit

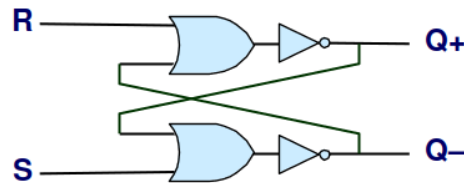
En RS latch (R=reset, S=Set)

Storing and Accessing 1 Bit

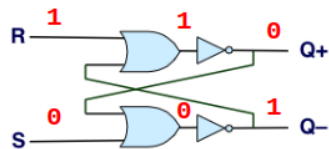
Bistable Element



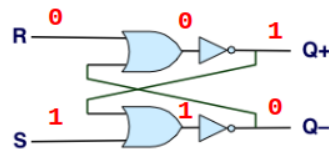
R-S Latch



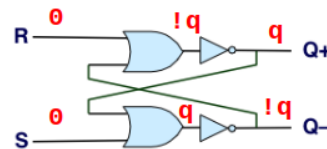
Resetting



Setting



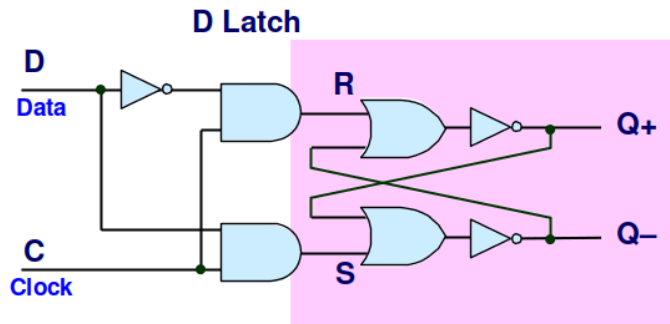
Storing



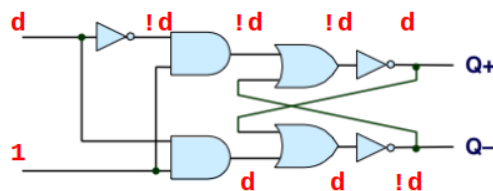
Lagring af en enkelt bit (II)

En D-latch (D for Data). Opdateres sålænge 'clock' er høj

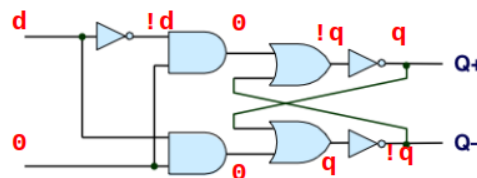
1-Bit Latch



Latching



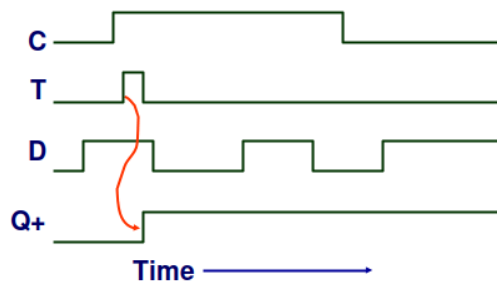
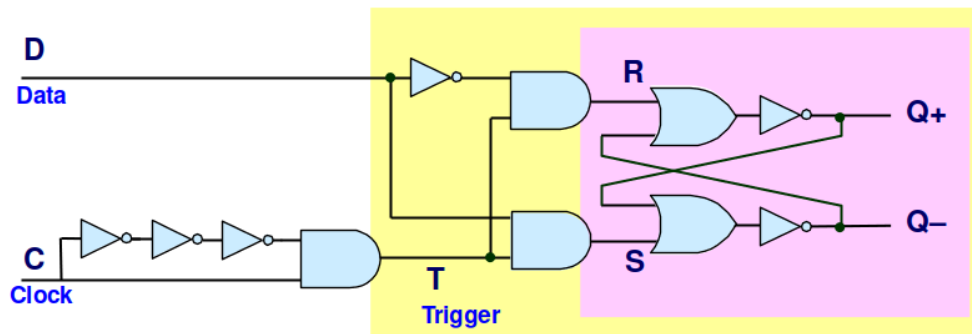
Storing



Lagring af en enkelt bit (III)

En Kant-trigget D-latch. Opdateres på den stigende flanke af 'clock'

Edge-Triggered Latch

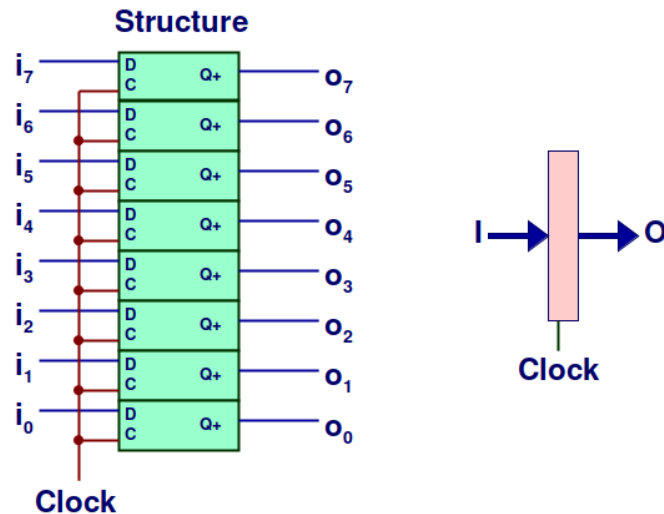


- Only in latching mode for brief period
 - Rising clock edge
- Value latched depends on data as clock rises
- Output remains stable at all other times

Et register

Et helt register (vilkårlig antal bits) kan bygges af D-latche. En til hver bit.

Registers

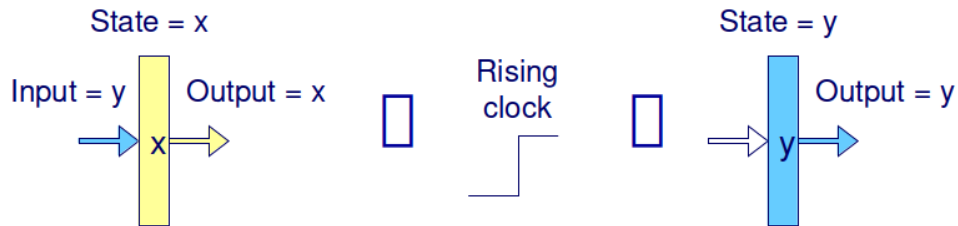


- Stores word of data
 - Different from *program registers* seen in assembly code
- Collection of edge-triggered latches
- Loads input on rising edge of clock

Hvad bruges registre til?

Til at gemme værdier til senere brug. Men også til at få styr på logikken!

Register Operation

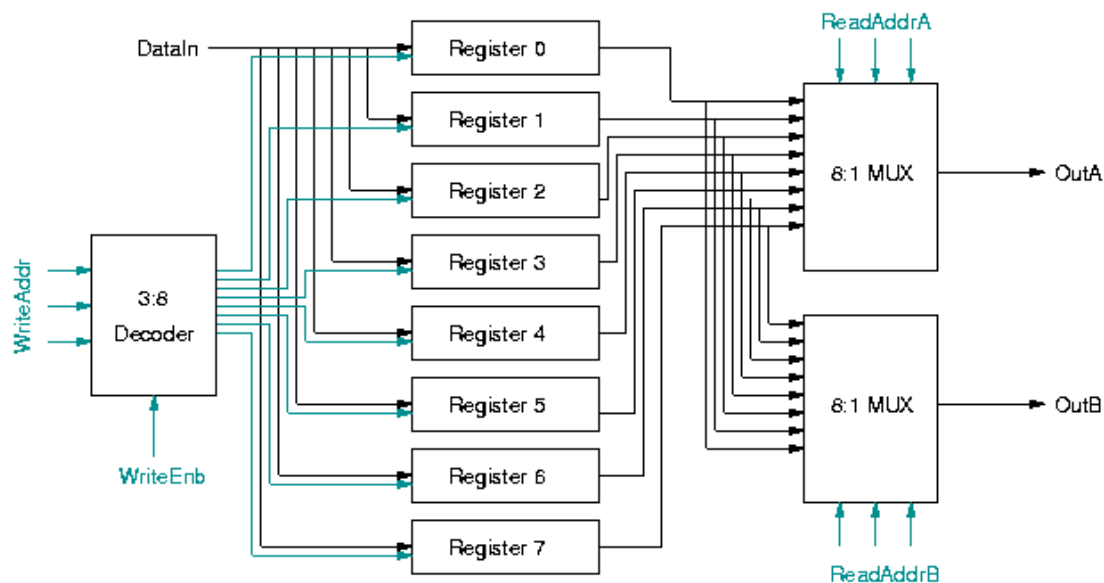


- Stores data bits
- For most of time acts as barrier between input and output
- As clock rises, loads input

Registre kan kombineres i en lille lagerblok

En lagerblok består af et antal registre. Data på data indgangen føres frem til samtlige registre.

En adresse dekodeer udvælger hvilket register der skal skrive. Multiplexore udvælger hvilke 2 registre der udlæses



Gray lines are 1-bit signals

Black lines are 10-bit signals

Mere om Transistorer

Bedre end ventiler og vandslanger!

- Holdbare: Ingen bevægelige dele (bortset fra elektroner)
- Produces ved en litografisk process.
- Kan laves ekstremt små
- Kan arbejde utroligt hurtigt (få pico-sekunder om at skifte, måske 5-20ps når de føder få andre transistorer tæt på)
- i CMOS omsættes tilstrækkelig lidt energi til at man kan integrere *mange* transistorer på meget lidt plads (over en milliard på en kvadratcentimeter)

Wikipedia har en fornuftig artikel, hvis du vil grave:

<https://en.wikipedia.org/wiki/CMOS>

Langt ude: <http://visual6502.org/JSSim/expert-6800.html>

Transistorer (II)

- Effekt er cirka proportional med skifte-frekvens, kvadratet på spændingen og kredsløbets kapacitans
- Vi kan påvirke skifte-frekvens på design tidspunktet
 - Design så ledninger skifter værdi så sjældent som muligt
 - F.eks. ved at stoppe for clock-signalet til de dele af chippen der ikke laver noget på et givent tidspunkt
- Maksimal skifte-frekvens er cirka proportional med spænding
- DVFS: Dynamic voltage-frequency scaling. Vi skruer løbende op og ned for både spænding og clock-frekvens efter behov.
- Alle nyere chips bruger en form for DVFS.

Produktionsproces

Sådan laver du en chip!

1. Reducer hele dit design til porte
2. Placer dine porte i et plan og forbind dem. Også kaldet "place and route". Der er kun få adskildte lag hvori forbindelser kan løbe.
3. Beregn alle forsinkelser for signaler under en række forskellige scenarier (varians i ledningsevne, forsyningsspænding, skifte-aktivitet)
4. Beregn herfra max clock frekvens og strømforbrug
5. Hvis du er utilfreds, start forfra
6. Oversæt dit design til "masker" der kan styre en efterfølgende litografisk process
7. Producer.
8. Test og sorter. Sælg!

https://en.wikipedia.org/wiki/Semiconductor_device_fabrication

Moore's lov

Moore's lov er ikke en lov i samme forstand som tyngdeloven.

- Moore's lov er et løfte. En afstemning af forventninger og mål for den industri der laver produktionsprocessen. Et løfte om løbende at sikre inkrementel forbedring af den litografiske process.
- Hver ny version af processen skal helst give transistorer som fylder halvt så meget som den foregående version
- Hver version kaldes iøvrigt en "process node" og angives ved størrelsen af den mindste detalje der kan laves.
- Vi har p.t. 7nm processen i brug.
- Hver opgradering til næste process-version er dyr. En fabrik koster ca 30 milliarder.

[Intel IDF 2014](#)

Opsamling

- Mange ting laves i CMOS: CPU'er, GPU'er, Kamera-sensorer, specielle regnemaskiner rettet mod AI, og meget, meget mere
 - Dyre ting er typisk fremstillet på den nyeste og smarteste CMOS process.
 - Billigere komponenter er bygget på en ældre process.
- Implementationsteknologien (CMOS) kan udskiftes. Tænk nano-et-eller-andet. Eller tænk vandslanger og tryk-drevne ventiler. Digitallogik kan implementeres på mange måder.
- Hver fremstillingsprocess har sin egen balance mellem beregning og kommunikation. Så selvom mikroarkitekturer kan "portes" fra en fremstillingsprocess til den næste for at udnytte Moores lov, så skal mikroarkitekturen "rebalanceres" for at udnytte potentialet fuldt ud

Opsamling (II)

- Antallet af transistorer er vokset eksponentielt siden en gang i 70'erne
- Tilsvarende fremskridt for regnehastighed (udtrykt ved clock-frekvens) frem til ca 2005.
- Siden 2005 er max clock frekvens kun steget marginalt. Energiomsætning (varme) er nu væsentligste begrænsning
- Denne her teknologiudvikling (af CMOS fremstillingsprocessen) har stået på siden 70'erne. Den har drevet/muliggjort alt mulig anden teknologi. Den har forandret samfundet.
- Det bliver vanskeligere og vanskeligere at opretholde Moores lov. Muligvis er det allerede slut. Det afhænger lidt af den præcise definition.
- Selvom vi nærmer os "end of the road" for CMOS, så er der ikke noget der kan konkurrere. Endnu.

Spørgsmål og Svar

