

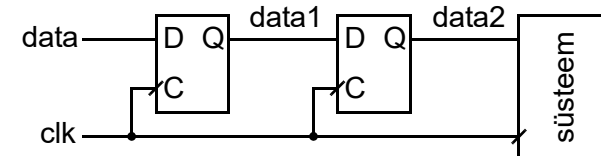
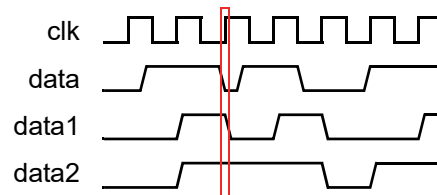
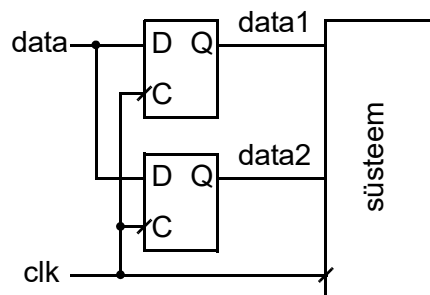
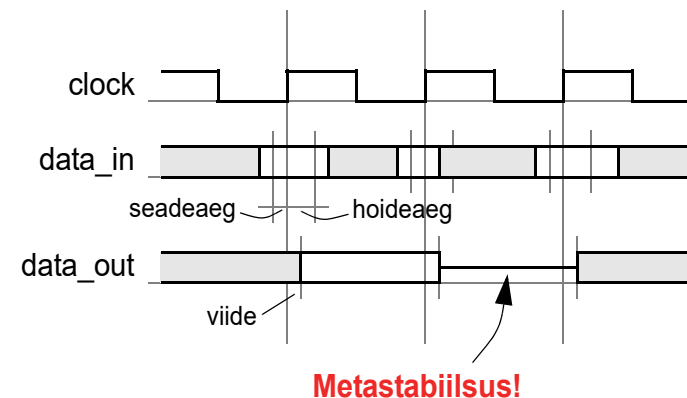


Asünkroonsed süsteemid

- **Taktsignaali – sünkroonne digitaalsüsteem**
 - lihtne projekteerida, probleemid suurte süsteemide korral (signaali levimise aeg!)
- **Asünkroonne andmevahetus**
 - andmevahetus moodulite vahel, mis kasutavad erinevaid taktsignaale
 - signaal peab olema stabiilne takti muutumisel (setup & hold)
 - andmevahetus süsteemis, kus signaali levimise aeg on võrreldav taktsignaali perioodiga
 - hajus-süsteemid
 - süsteem kiibil (SoC)
 - kõikjal sama probleem – signaali stabiilsuse tagamine
 - andmevahetus asünkroonsete (self-timed) moodulite vahel
 - asünkroonsed automaadid
- **Asünkroonseid süsteeme tuleks kasutada seal, kus on neist kasu!**

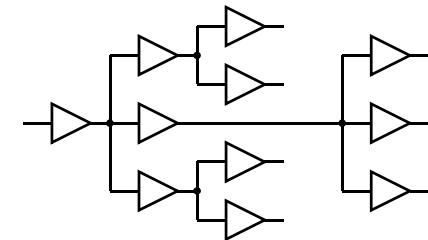
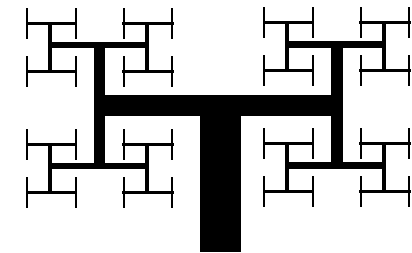
Asünkroonsed sisendid

- Signaalid moodulite vahel, mille taktsignaalid võivad oluliselt erineda
 - erinevate sagedustega taktsignaalid
 - üksteisest kaugel asuvad moodulid
 - füüsikalised efektid – nt. värelemine
- Vajalik on sisendite täiendav puhverdamine
 - vähendab metastabiilsuse levimise tõenäosust



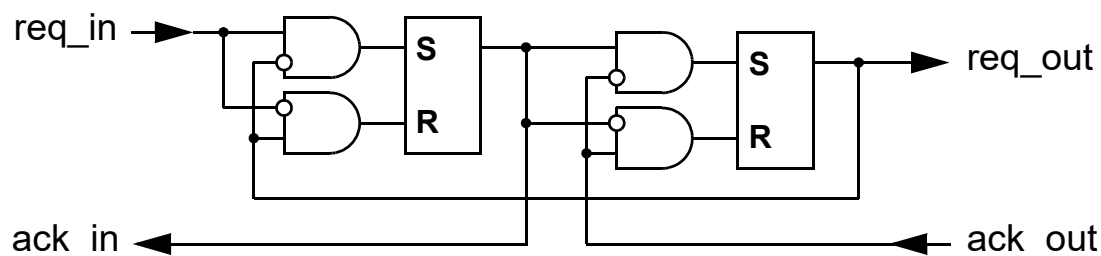
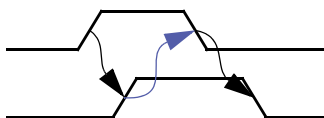
Sünkroonne või asünkroonne nullimine?

- **Sünkroonne nullimine**
 - kõikidel mäluelementidel samal ajal
 - taktsignaali aktiivne front viiakse kõikide mäluelementideni (enamvähem) samal ajal
 - **takti olemasolu on vajalik**
 - taktsignaali ei pruugi alguses olemas olla
- **Asünkroonne nullimine**
 - **takti olemasolu ei ole vajalik**
 - mõjub mäluelementidele kindlasti
 - **nullimis-signaal võib eri mäluelementidel lõppeda erineval ajal**
 - signaali levimine võib olla erinev – vaadeldakse tavalise signaalina, kus sama-aegsus pole kriitiline
- **Kombineeritud lähenemine – algus asünkroonne, lõpp sünkroonne**



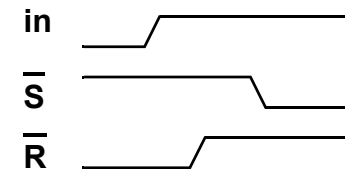
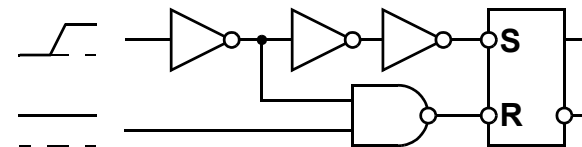
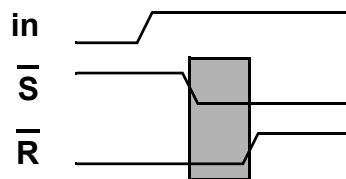
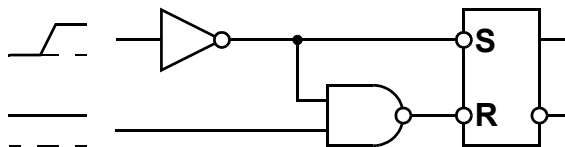
Asünkroonsed automaadid

- Taktsignaali puudub
- Muutus sisendil on sündmuseks → isetakteeruv
- Signaalide võistlus (signal race) – kriitilise tee analüüs väga oluline
 - sündmus saabub eri teid pidi – võib näida kahe või enama sündmusena
- Asünkroonne andmevahetus
- Ilesünkroniseerivad süsteemid



Asünkroonsed automaadid

- Automaadi tabel (GSA, olekudiagramm) aluseks
- Olekute kodeerimine
 - nn. naaberkoodid – erinevus ühes järgus
 - vähendab signaalide võistluse ohtu siirdel



Digitaalskeem – seos füüsilise maailmaga

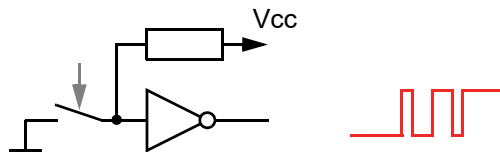
- Sisendid, väljundid jms.**

- vt. nt. John F. Wakerly, “Digital design: principles and practices.” Pearson/Prentice Hall

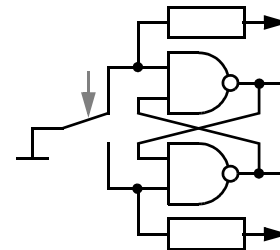
Sisendid

1) lülitid

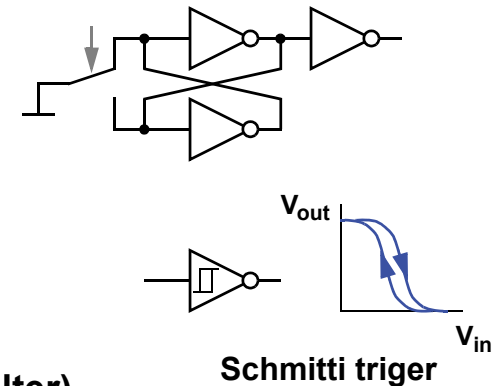
põhiprobleemiks kontaktide *värelemine*



võimalikud lahendused



... ja loomulikult ka RC-ahel (madalpääsfilter)

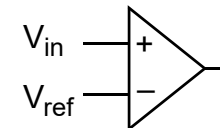


2) ADC – analoog-digitaal muundurid

pinge -> kood
vool -> kood
sagedus -> kood
jne.

põhi-elemendiks komparaator
võrreldakse erinevust sisend-
ja tugipinge vahel

paralleelne – n bitti -> 2^n komparaatorit
järjestikuline ~ FSM, DAC + komparaator

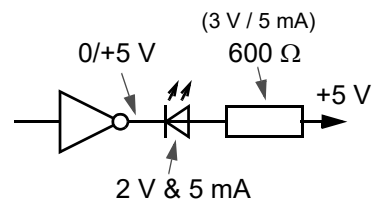


Seos füüsilise maailmaga

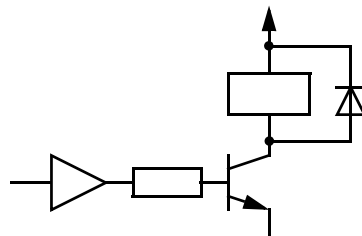
- Sisendid, väljundid jms.

Väljundid

1) indikaatorid (nt. LED)

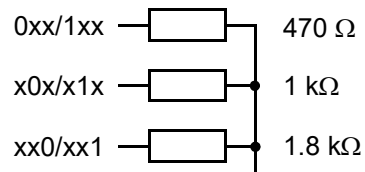


2) täiturid (nt. relee)



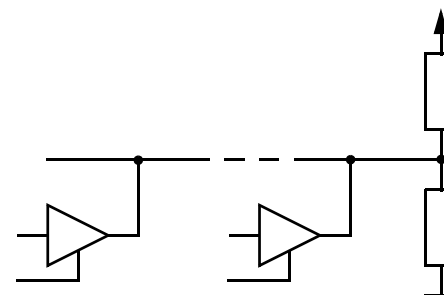
3) DAC – digitaal-analoog muundurid

nt. XSA-3S1000
www.xess.com

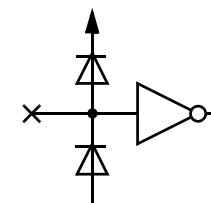


Siinid

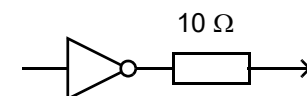
sobitus



kaitsediodid



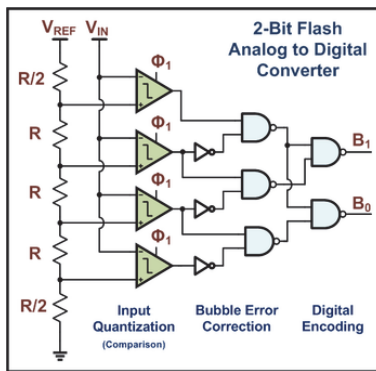
lühisekaitse



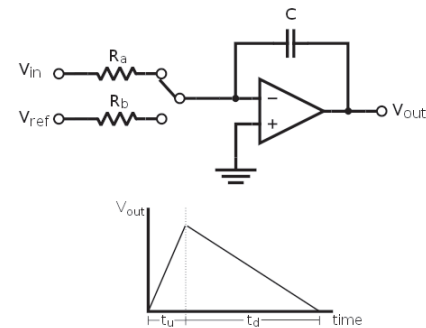
ADC / DAC

• Analog-to-Digital-Converter / Digital-to-Analog-Converter

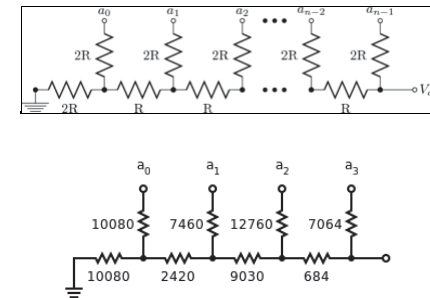
ADC



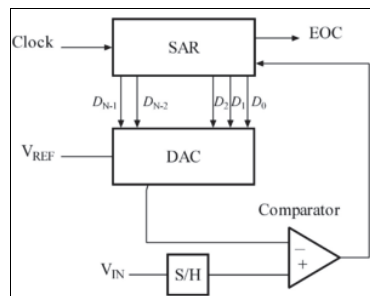
Integrating ADC



DAC

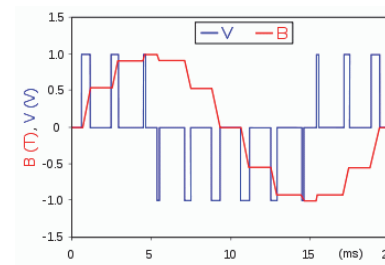


Resistor ladders



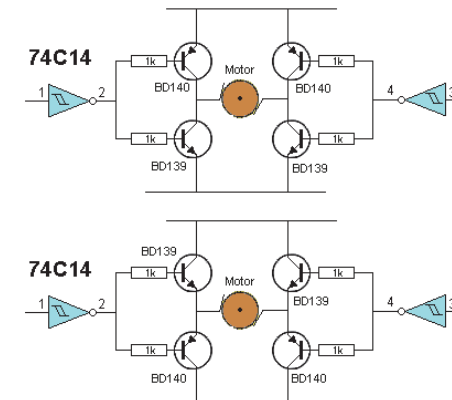
Successive approximation ADC

Pulse-width modulation



H-bridge

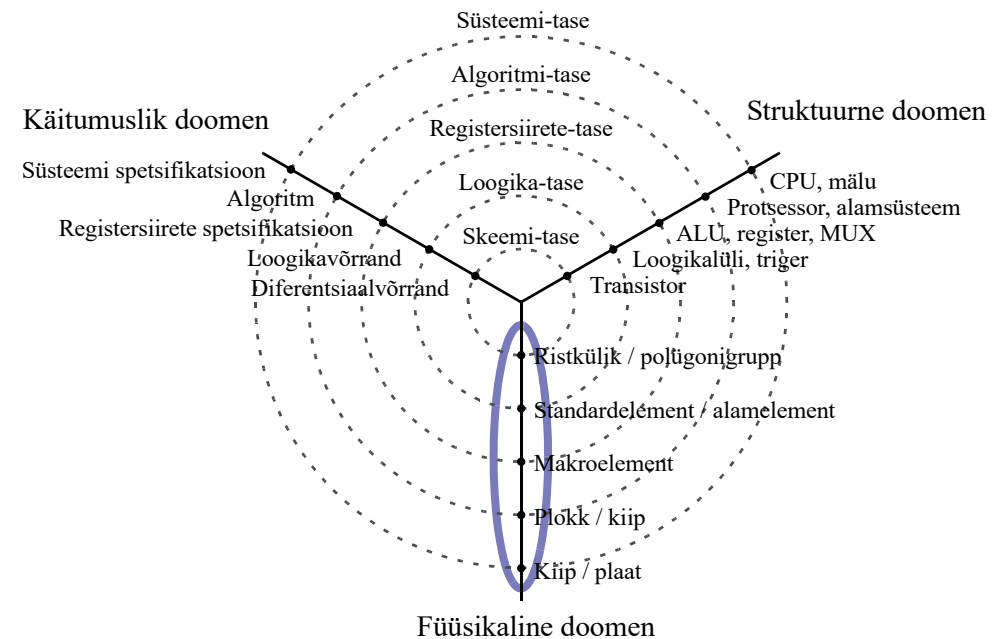
www.talkingelectronics.com



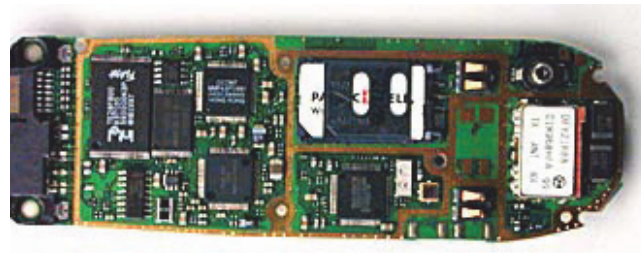
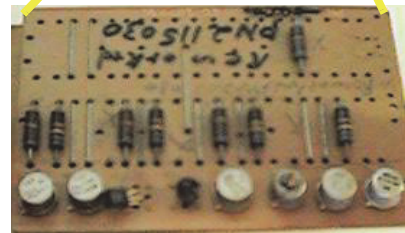
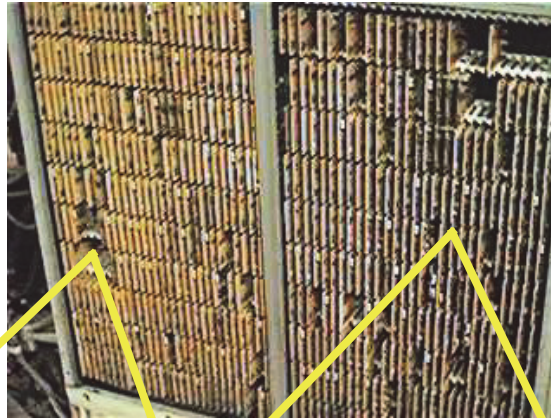
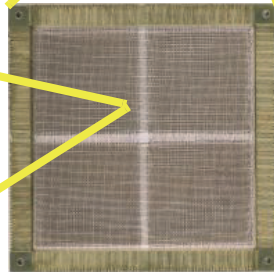
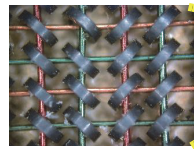
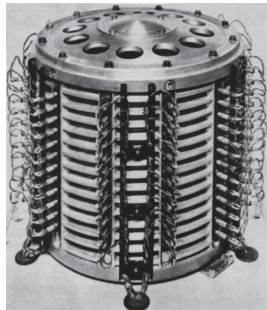
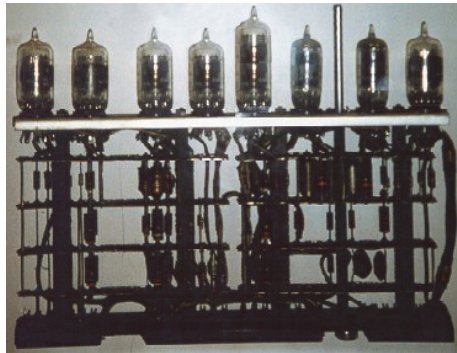
www.wikipedia.org

Disaini põhietapid

- **Süsteemi disain - System design**
a.k.a. Arhitektuuri süntees - Architectural-level synthesis
 - kirjeldus / spetsifikatsioon → plokk-skeem
 - makroskoopilise struktuuri määramine *ehk* kuidas on peamised ühendusplokid omavahel ühendatud
- **Loogikadisain - Logic Design**
 - plokk-skeem → loogikalülid
 - mikroskoopilise struktuuri määramine *ehk* kuidas on loogikalülid omavahel ühendatud
- **Füüsiline disain - Physical design**
a.k.a. Geomeetria süntees - Geometrical-level synthesis
 - loogikalülid → transistorid, ühendusjuhtmed, mikroskeem



Füüsiline realiseerimine – ajalugu ja tänapäev

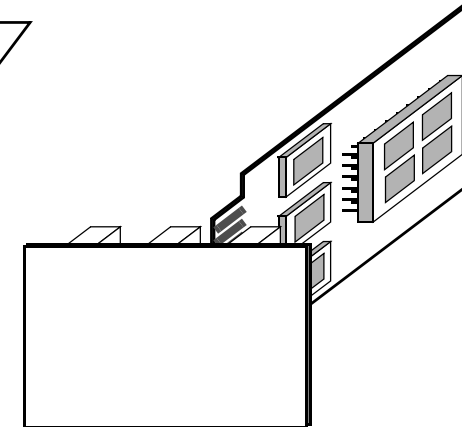
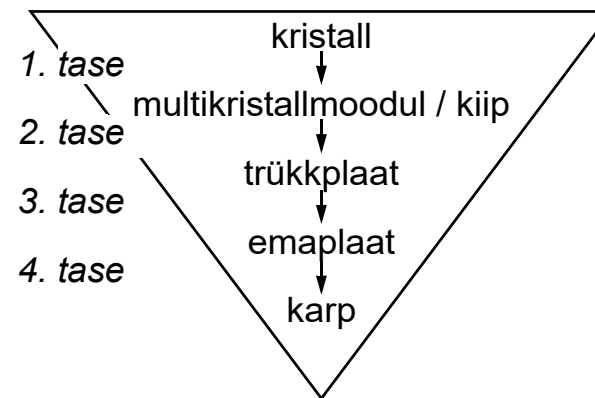


Pakendamine

- **Pakendamise hierarhia**

- **Lahendatavad ülesanded**

- elektrilised
- mehhaanilised
- termilised



- **Kiipide/korpuste tüübid**

- **Aukmonteeritavad (läbi trükkplaadi)**

- DIP: Dual In-line Package; PGA: Pin Grid Array
- C-DIP, Cerdip, CPGA, TBD, HDIP, PDIP, PPGA, Shrink DIP, SIP

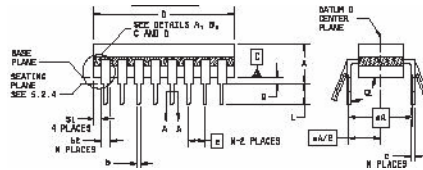
- **Pindmonteeritavad**

- PLCC: Plastic Leaded Chip Carrier; SOIC: Small Outline IC; BGA: Ball Grid Array
- BQFP, CBGA, CFP, CPGA, CQFP, TBD, DLCC, FBGA, fpBGA, JLCC, LCC, LCCC, LFBGA, LGA, MLCC, PBGA, PQFD, PQFP, PSOP, QFP, QSOP, SOJ, SSOP, TQFP, TSOP, TSSOP, TVSOP, VQFB

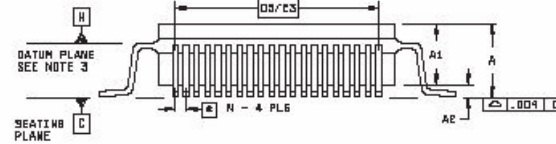
- http://www.interfacebus.com/Design_Pack_types.html

Kiipide, korpuste ja pakendamise näiteid

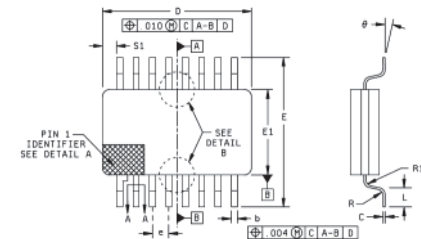
DIP



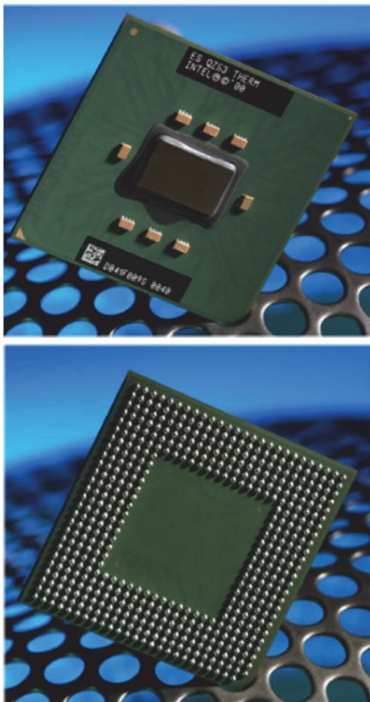
PLCC



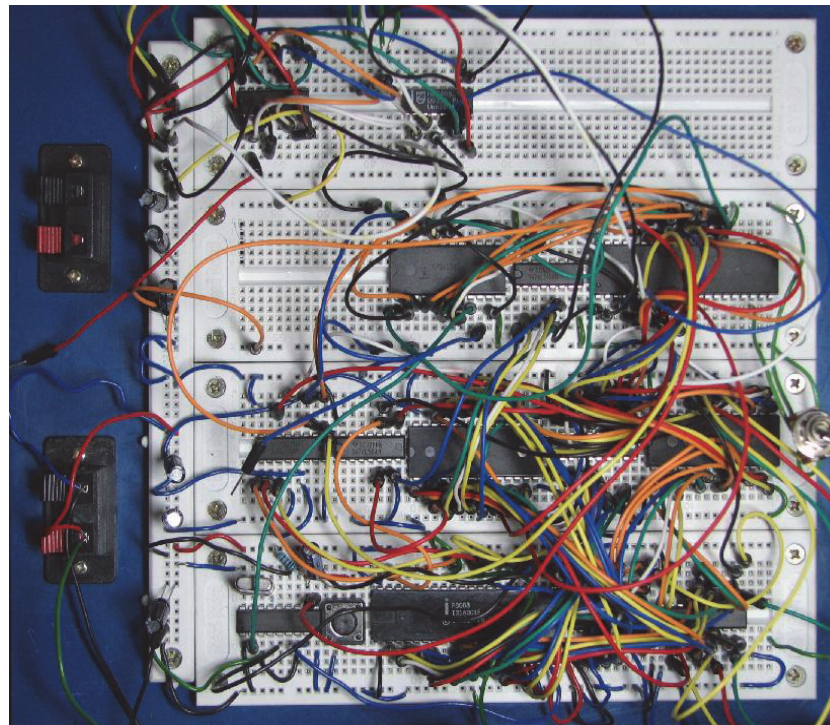
SOIC



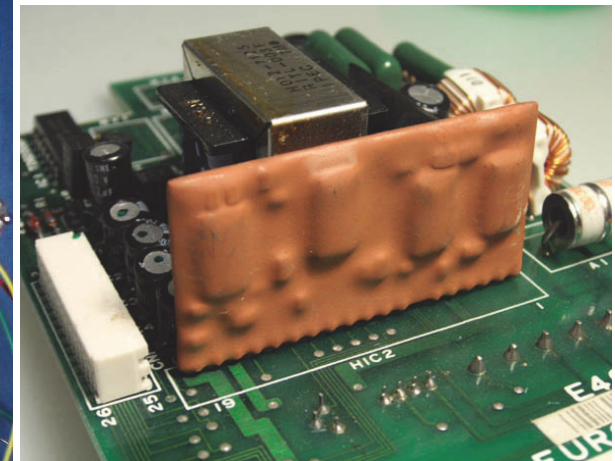
FCBGA (Intel)



prototüüpimine



ruumiline montaaž



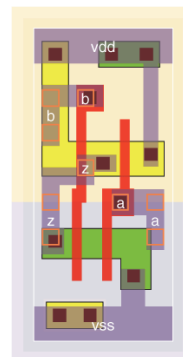
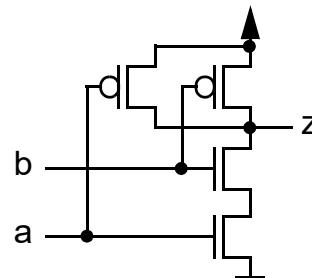
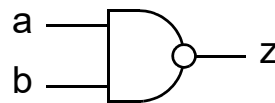
hübriidmikroskeem

VLSI füüsiline disain

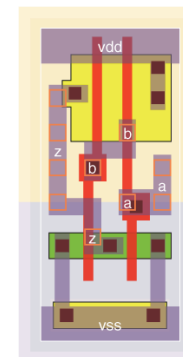
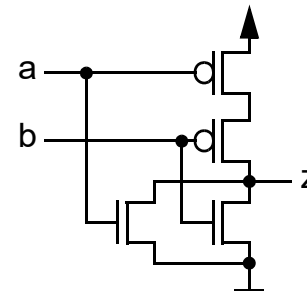
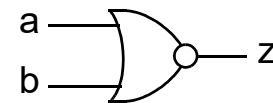
- **Loogika tase**
 - loogikaelemendid / loogikaavaldised
 - ahelad / bitid
- **Füüsika tase**
 - transistorid / traadid
- **polügonid**

vt. ka <http://www.vlsitechnology.org/>

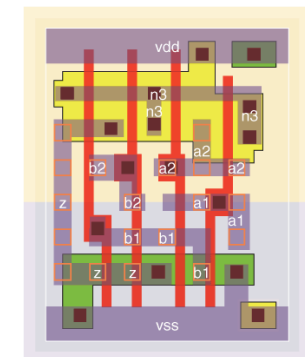
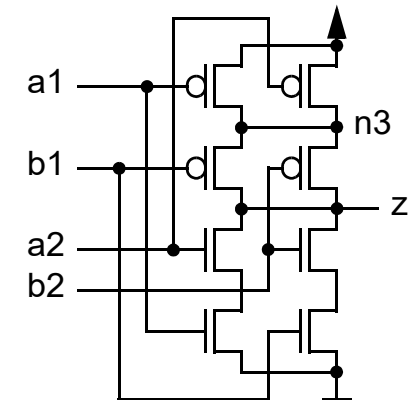
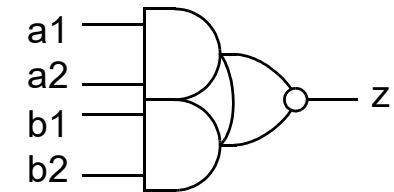
2-NAND



2-NOR

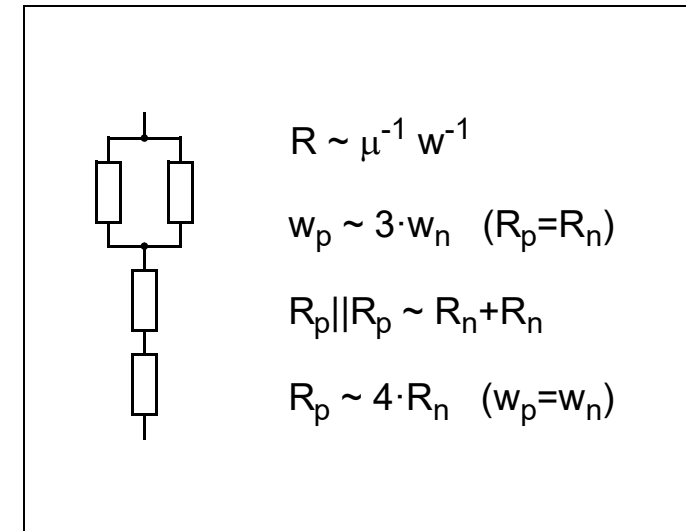
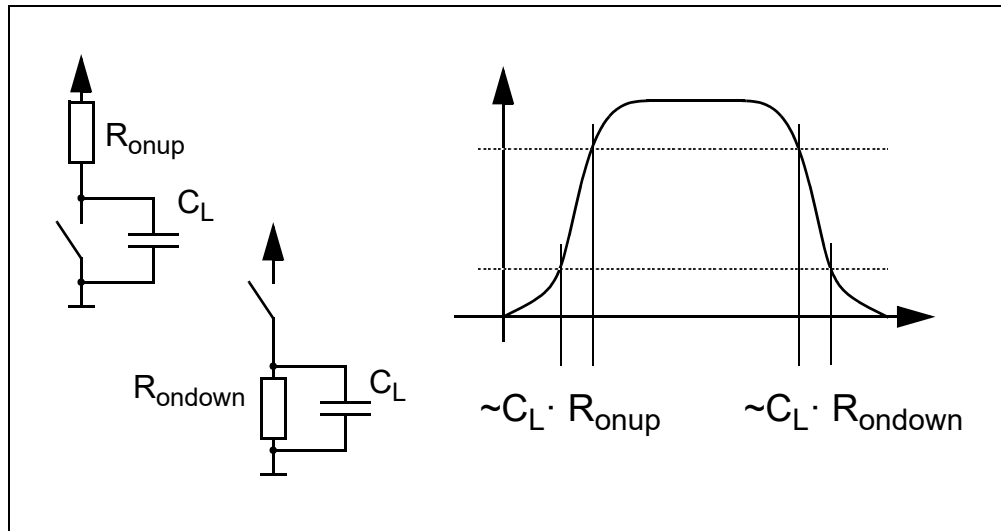
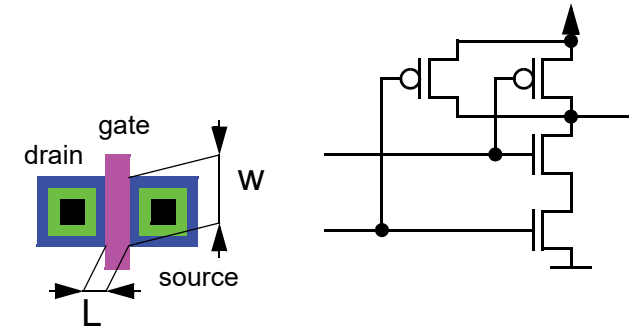


2-2-AND-NOR



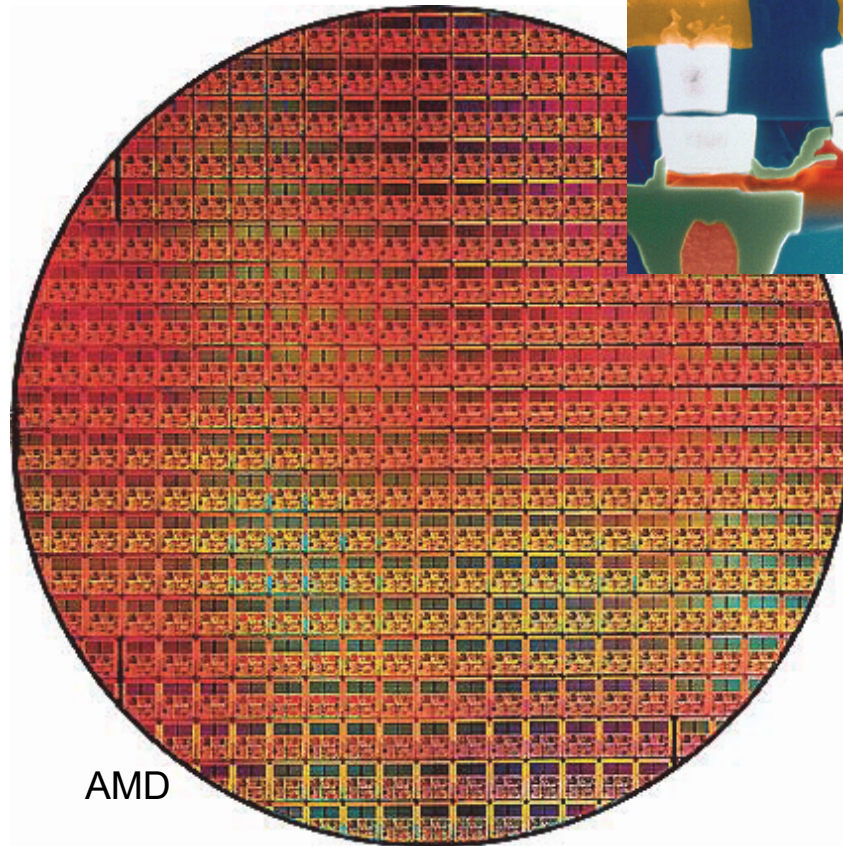
CMOS - miks NAND?

- Materjalide omadused – mobiliilsus –
 $\mu_n = 1250 \text{ cm}^2 / \text{V sec}$ & $\mu_p = 480 \text{ cm}^2 / \text{V sec}$
- $R \sim \mu^{-1}$ & $R \sim L w^{-1}$ (L - konstant)



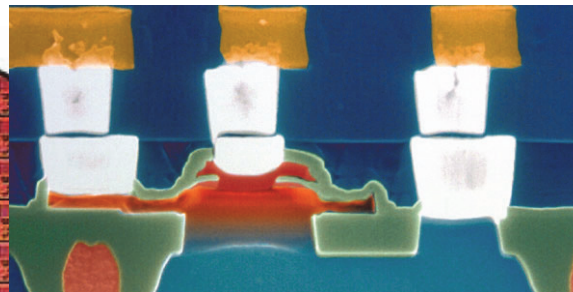
Mikroskeemide valmistamine

- maskid – ilmutamine
- söövitamine / lisamine
- pakendamine
- testimine

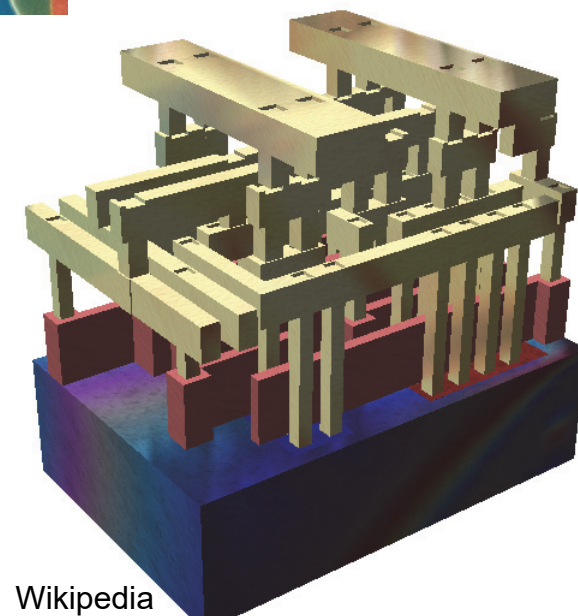
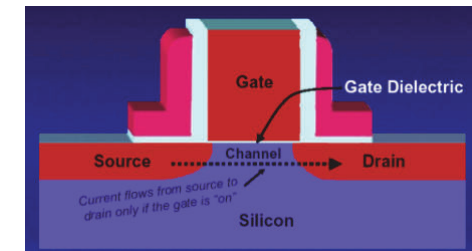


AMD

Brown University



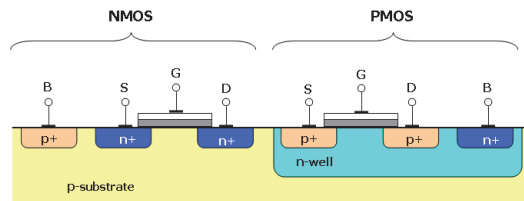
Robert Richmond, 2003



Wikipedia

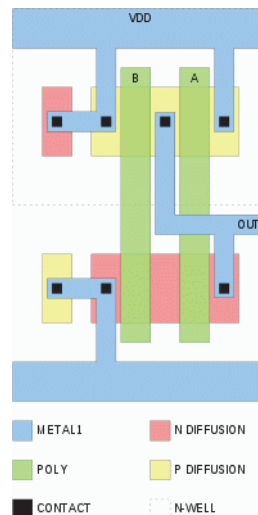
Protsessi sammud (2D-transistorid)

CMOS transistorid



n - elektronid [P, As, Sb]
p - augud [B, Al]

2-NAND pinnalaotus



söövitamise sammud

valmistamise sammud

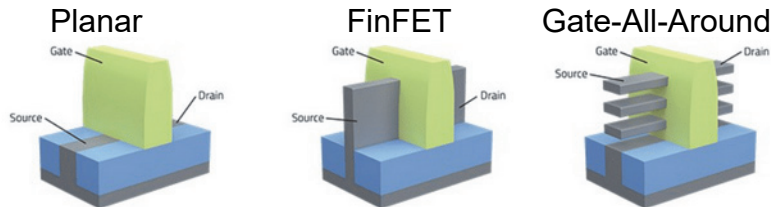
- Prepare wafer
oxide
substrate
- Apply photoresist
PR
oxide
substrate
- Align photomask
glass
Cr
PR
oxide
substrate
- Expose to UV light
glass
Cr
PR
oxide
substrate
- Develop and remove photoresist exposed to UV light
PR
oxide
substrate
- Etch exposed oxide
PR
oxide
substrate
- Remove remaining photoresist
oxide
substrate

- Grow field oxide
ox.
p-type substrate
- Etch oxide for pMOSFET
ox.
p-type substrate
- Diffuse n-well
ox.
p-type substrate
- Etch oxide for nMOSFET
ox.
p-type substrate
- Grow gate oxide
ox.
p-type substrate
- Deposit polysilicon
ox.
p-type substrate

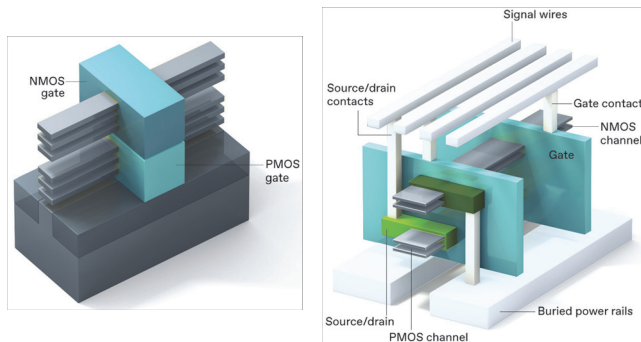
- Etch polysilicon and oxide
ox.
p-type substrate
- Implant sources and drains
ox.
p-type substrate
- Grow nitride
ox.
p-type substrate
- Etch nitride
ox.
p-type substrate
- Deposit metal
ox.
p-type substrate
- Etch metal
ox.
p-type substrate

www.wikipedia.org

Alla-mikroni tehnoloogiad (3D-transistorid)

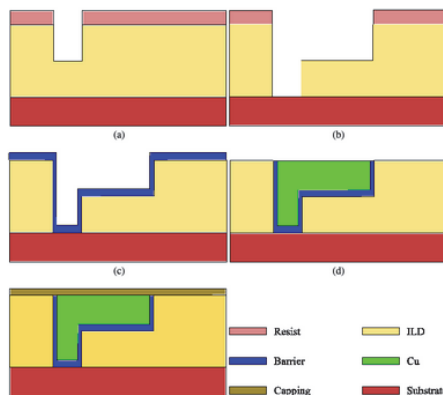


<https://semiengineering.com/whats-after-finfets/>



IEEE Spectrum 2022/12:
The Transistor at 75:
Taking Moore's Law to
New Heights [pp.32-37]

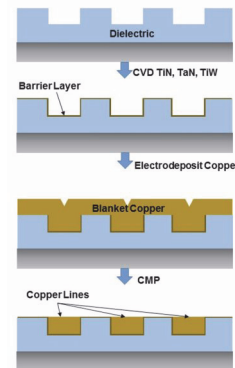
Dual-damascene fabrication process



<https://picture.iczhiku.com/weixin/message1614096684818.html>

Traadid

Chemical Mechanical Polishing in Damascene Process

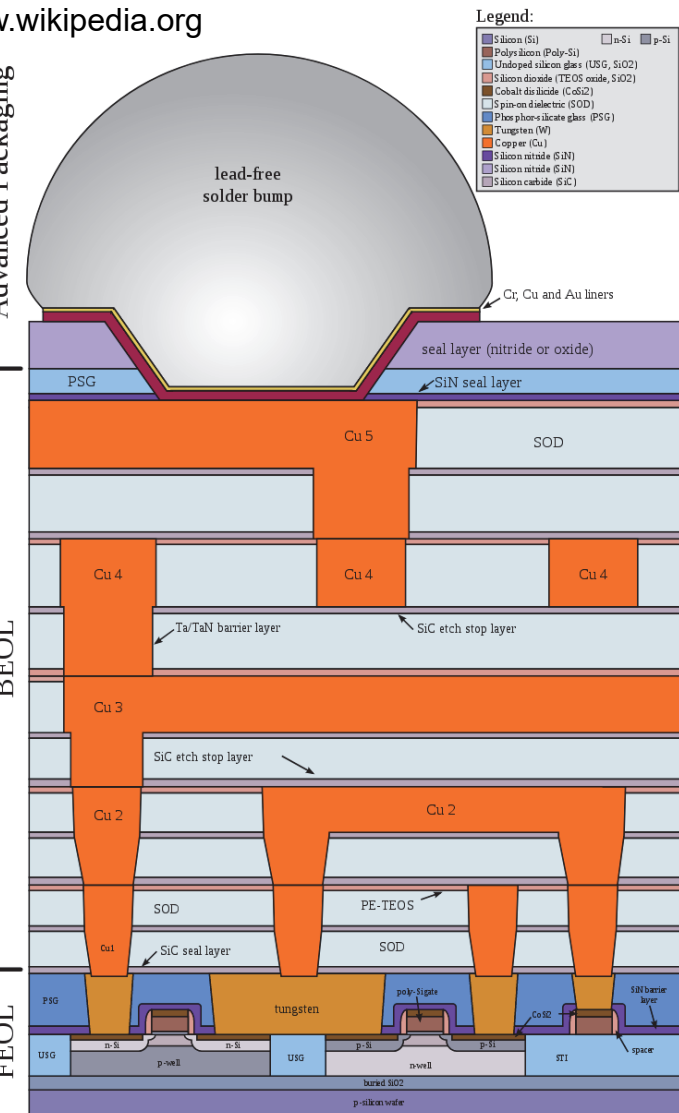


<https://www.mks.com/n/chemical-mechanical-polishing>

www.wikipedia.org

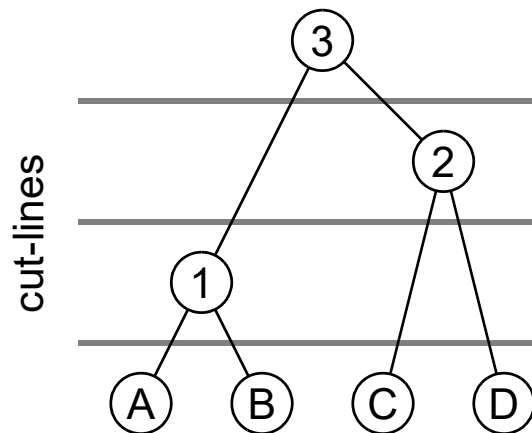
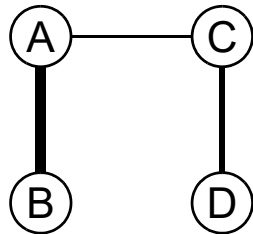
back-end /
"Advanced Packaging"

front-end

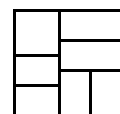
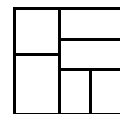
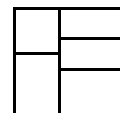
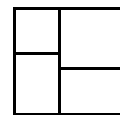
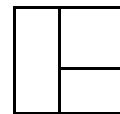
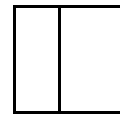


Pinnalaotuse süntees

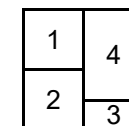
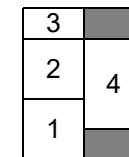
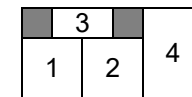
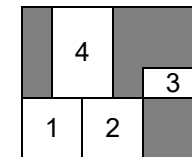
• Tükeldamine



• Pinnaplaneering



• Paigaldamine



Pinnalaotuse süntees

- Ruutimine (trasseerimine)**

- labürindi läbimine**
 - vajab palju mälu!
 - kahesuunaline otsimine
 - mitmekihiline ruutimine

Ruutimine

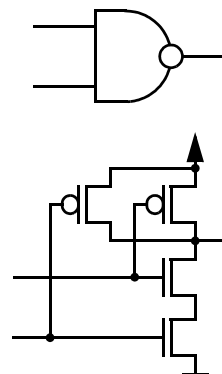
				9				9	
		9	8	9		9	8	9	
		9	8	7	8	9	8	7	8
	9	8	7	6			6	7	8
9			6	5	4	3	4	5	6
8	9		5	4	3	2	3		7
7					3	2	1	2	
6	5	4	3	2	1			5	6
7	6	5	4	3	2	1	2	3	4
8	7	6	5	4	3	2	3	4	5

4	3	2	3	4	5				
3	2	1	2	3	4	5			
2	1		1	2	3	4	5		
3	2	1	2	3	4	5			
4	3	2	3	4					
5	4		4	5	4	3	4	5	
	5		5	4	3	2	3		
				3	2	1	2		
	5	4	3	2	1			5	
		5	4	3	2	1	2	3	4
			5	4	3	2	3	4	5

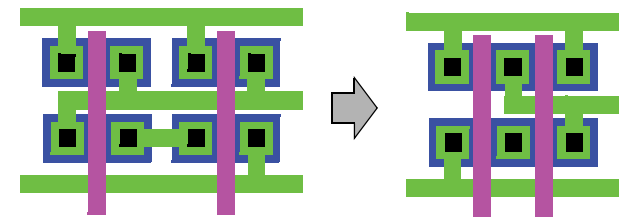
- Pinnalaotuse optimeerimine**

- Pinnalaotuse kontroll**

- DRC (Design Rule Check)

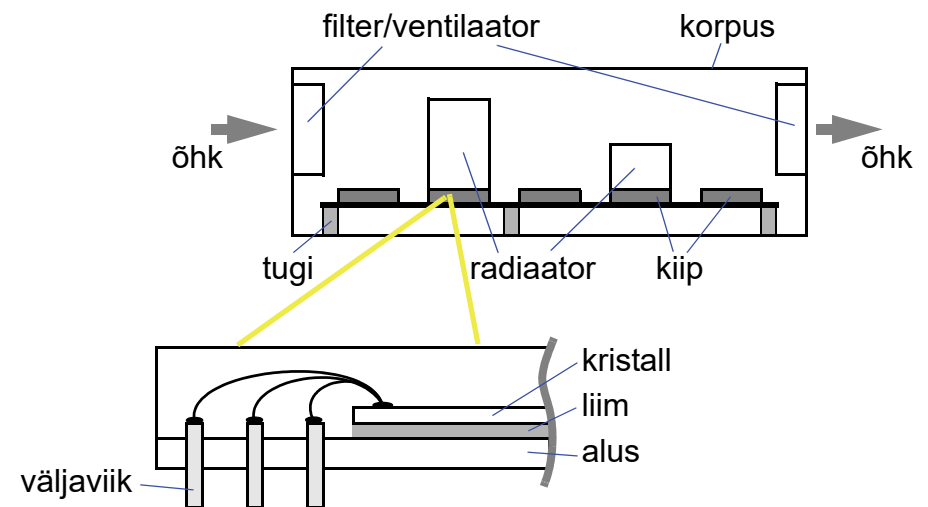
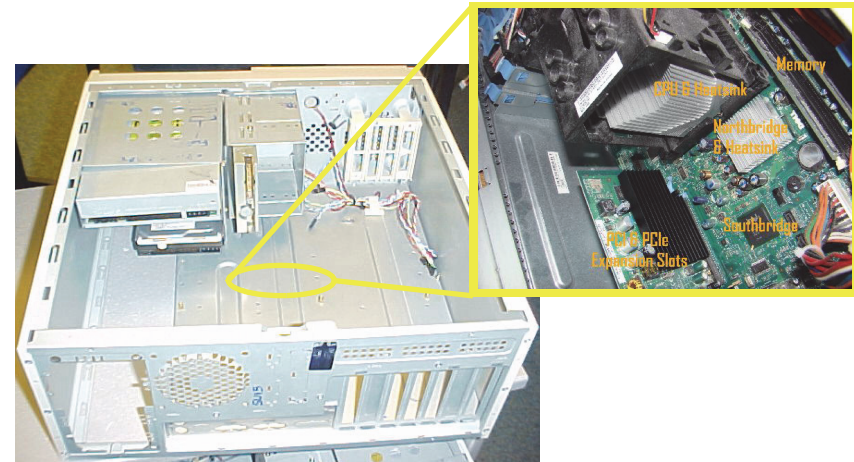


Optimeerimine



Pakendamine - korpused

- **Füüsilised nõuded ja piirangud**
 - mõõtmed, liidesed
 - vastupidavus - tolm, vibratsioon
- **Termilised nõuded ja piirangud**
 - töötemperatuuri vahemik
 - jahutamine / küte
- **Elektrilised nõuded ja piirangud**
 - elektritoide
 - kaitse - liigpinge, elektromagnetväljad
- **Ergonoomilised nõuded ja piirangud**
 - väljanägemine, kasutajaliides, müra

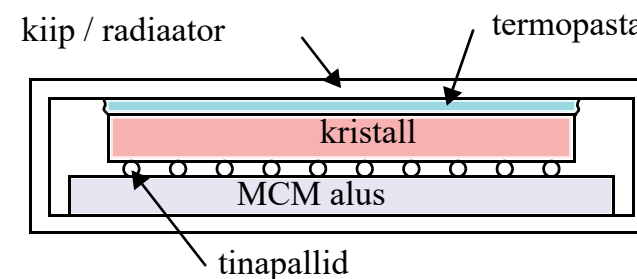
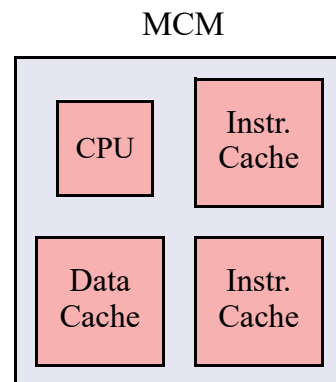


Termilised probleemid

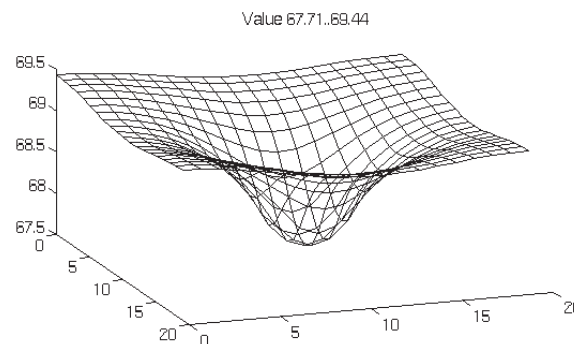
- Jahutamine

- Näidisdisain (MCM)

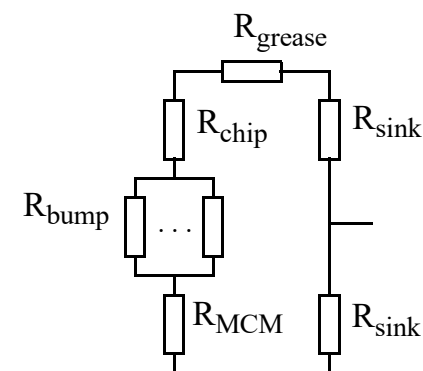
- CPU - 68 mm^2 , cache - 112 mm^2
- koguvõimsus - 72 W
- soojuse eemaldamine
 - kristall (GaAs): 46 W/mK
 - väljaviigud (tinapallid):
 $d 0.1 \text{ mm}$, samm 0.25 mm , 36 W/mK
(CPU 361 & cache 441)
 - termopasta:
paksus 0.2 mm , 1.1 W/mK
 - MCM alus (alumina):
 $27 \times 27 \text{ mm}$, 20 W/mK
 - kiip/radiaator (Al): 238 W/mK



Temperatuuri jaotus väljaviigu ümbruses



Soojusvoo mudel



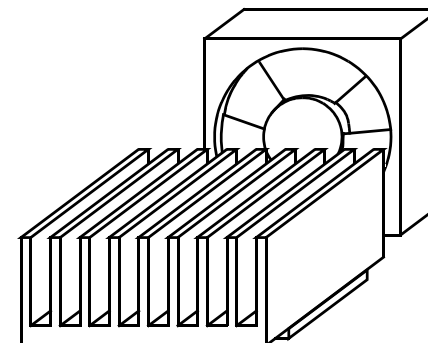
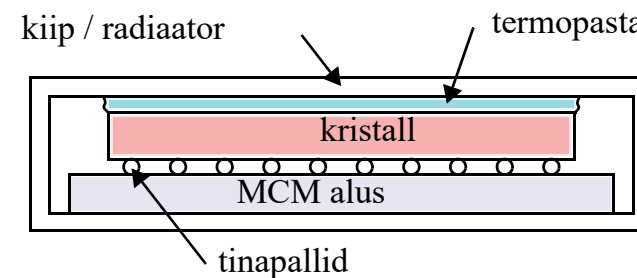
Termilised probleemid

- Jahutamine (järg)
 - temperatuuride vahed
 - väljaviik & MCM: 20-25 K
 - koos termopastaga: 15-16 K
 - radiaator
 - vaba õhuvool: 5 W/m²K
 - sundjahutus (ventilaator): 50 W/m²K
 - kristalli temperatuur ≤ 80°C
 - radiaatori pindala [cm²]:

Radiaatori temperatuur [°C]	Keskkonna temperatuur			
	vaba õhuvool		sundjahutus	
	50°C	30°C	50°C	30°C
64.0	10286	4237	1029	424

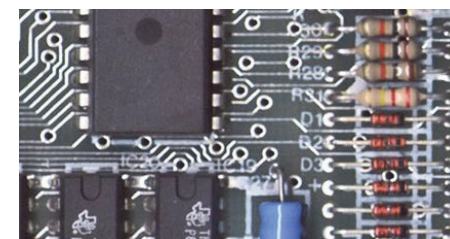
- Termiline paisumine

- kristall (GaAs): $6.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (paisub kuni 1.4 μm); MCM alus (alumina): $7.7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$



Trükkplaadid

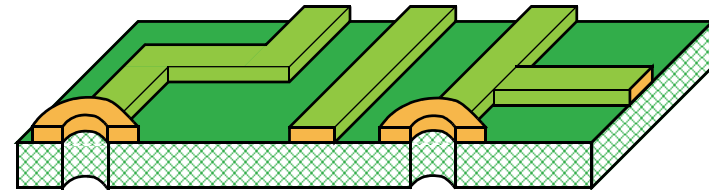
- **PCB (Printed Circuit Board)**
- **Valmistamine ja projekteerimine**
 - töökindlus, maksumus, jõudlus...
 - **Komponendid**
 - mikroskeemid, transistorid, takistid, kondensaatorid jne.
 - Ühendused
 - Liidesed
 - Kinnitused
- **Trükkplaadi valmistamine**
- **Komponentide paigaldamine (ja kinnitamine)**
- **Elektriliste ühenduste loomine (nt. jootmine)**



Trükkplaatide valmistamine

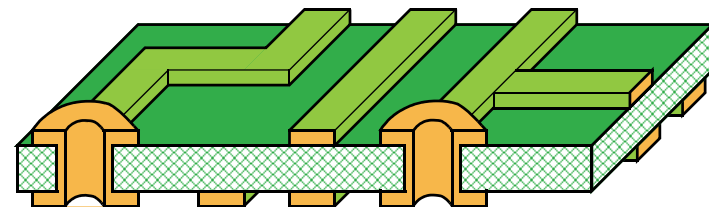
- Vasega (Cu) kaetud tekstoliit (klaasriie+epoksüvaik)

Ühekihiline



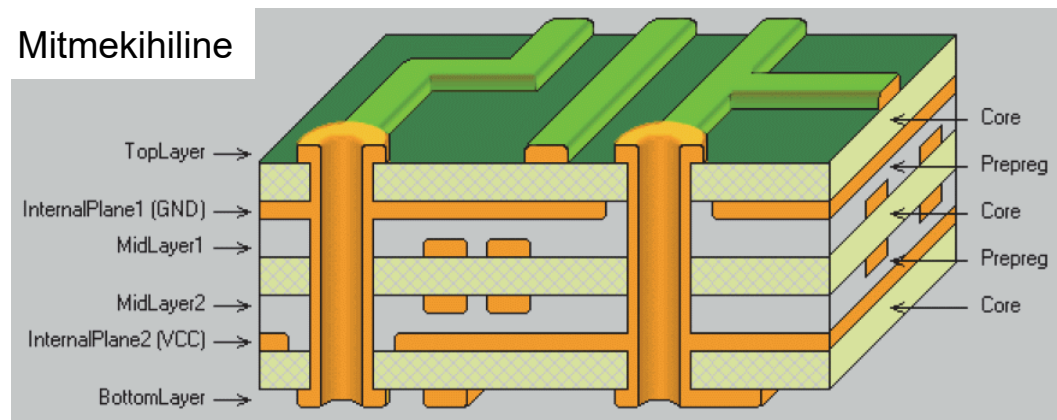
- Ühekihiline trükkplaat
- ühendusrajad (alumine pool)

Kahekihiline



- Kahekihiline trükkplaat
- ühendusrajad
- metalliseeritud läbiviigud

Mitmekihiline



- Mitmekihiline trükkplaat
- mitu kahekihilist plaati
- läbiviikude asukohad!

Trükkplaatide valmistamine

Väikeseeriad / üksikeksemplarid

- Täielikult vasega kaetud plaat (1- või 2-kihiline)
- Läbiviikude puurimine (drilling)
- Läbiviikude galvaaniline metalliseerimine
- Ühendusradade loomine == liigse vase eemaldamine
 - liigse metalli söövitamine (etching)
 - 1) kaitsekihi peale kandmine (radade positiivkujutis)
 - a) kaitselaki / -värvi joonistamine / siiditrükk
 - b) printimine (fototundlik materjal, termokiled jne.)
 - 2) söövitamine (FeCl_3 , HNO_3 jne.)
 - liigse metalli välja freesimine (milling)
- Komponentide paigaldamine
 - vajaduse korral ka kinnitamine (nt. liimimine)
- Jootmine
 - mehhaniseeritud (tinalaine) või käsitsi



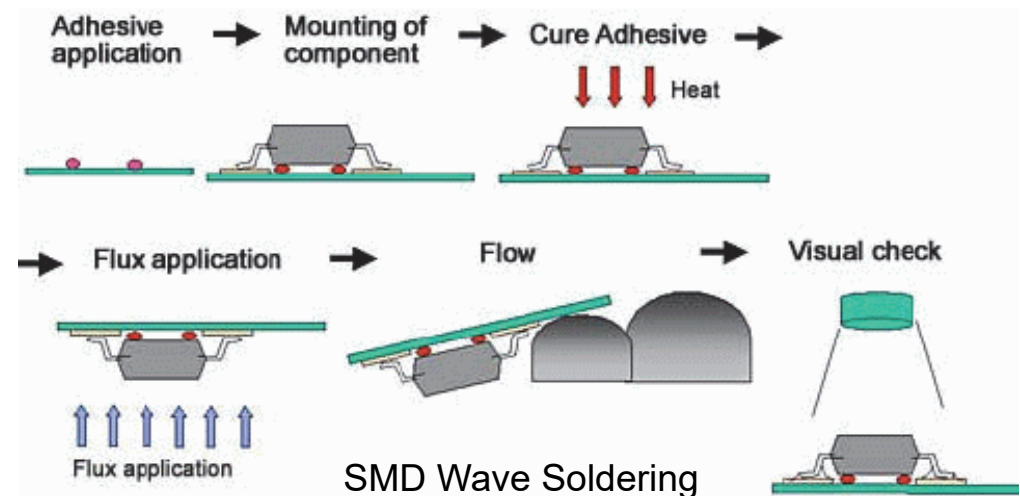
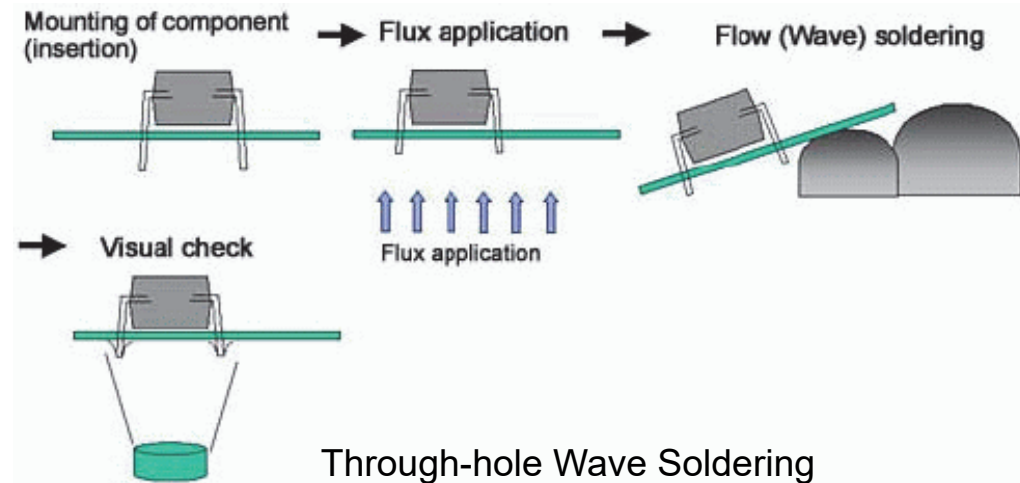
Trükkplaatide valmistamine

Suurseeriad

- **Läbiviikude puurimine (metalliga katmata plaat)**
- **Ühendusradade loomine == vasekihi galvaaniline kasvatamine**
 - keemiliselt kantakse peale õhuke vasekiht
 - radade asukohtade trükkimine (fotolitograafia)
 - galvaaniline radade kasvatamine vajaliku paksuseni (tagab ka läbiviikude metalliseerimise)
 - liigse vase eemaldamine (söövitamine)
- **Kaitsekihi (-laki) ja jootevedeliku/-tinaga katmine**
- **Komponentide (mehhaniseeritud) paigaldamine**
 - vajaduse korral ka kinnitamine (nt. liimimine)
- **Jootmine**
 - mehhaniseeritud

Trükkplaatide valmistamine

- **Valmistamine**
 - komponentide kinnitamine
 - jootmine
 - jootevedelik / -tina
 - termilised probleemid
 - suured vasespinnad
 - komponentide ülekuumenemine
- **kvaliteedi kontroll**
 - visuaalne
- **lõppviimistlus**
 - puhastamine
 - kaitselakkimine
- **lõpptestimine**
 - funktsionaalsuse kontroll



Trükkplaatide valmistamine

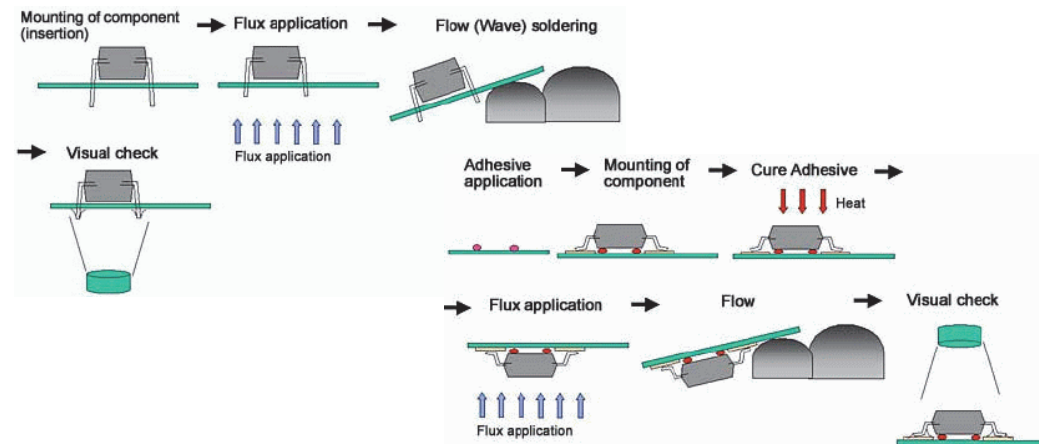
Wave Soldering

Electro Soft Inc.

<https://www.youtube.com/watch?v=inHzaJIE7-4>

Agrowtek Inc.

<https://www.youtube.com/watch?v=VWH58QrprVc>



SMD Reflow Soldering

GIGABYTE factory tour

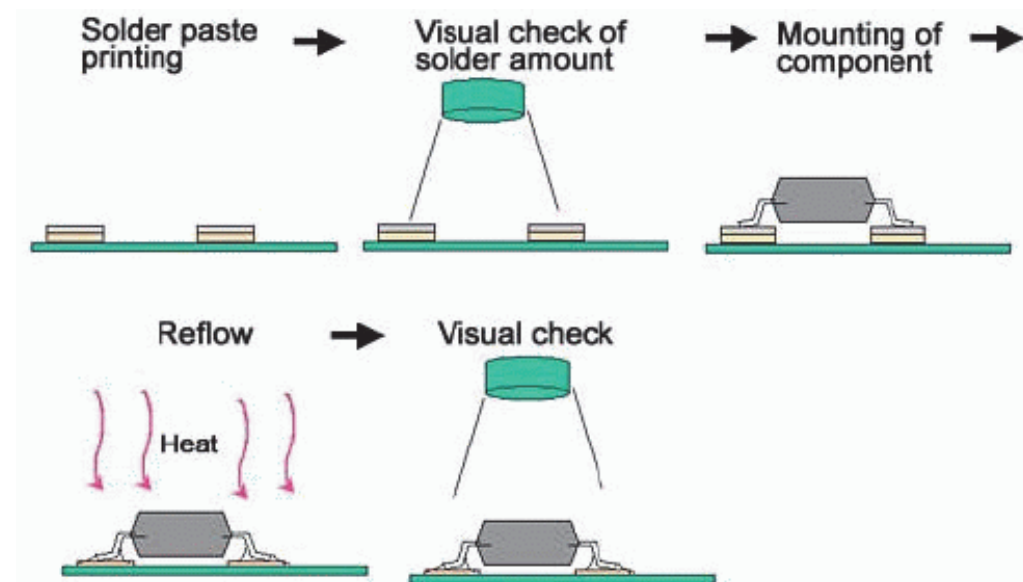
<https://www.youtube.com/watch?v=Va3Bfn4inA>

Tutorial

<https://www.youtube.com/watch?v=gu0v8lfLcKg>

SMD reflow at home

<https://www.youtube.com/watch?v=U48Nose31d4>



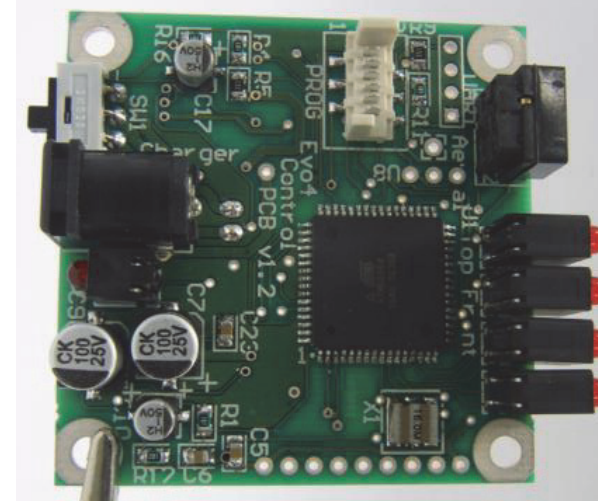
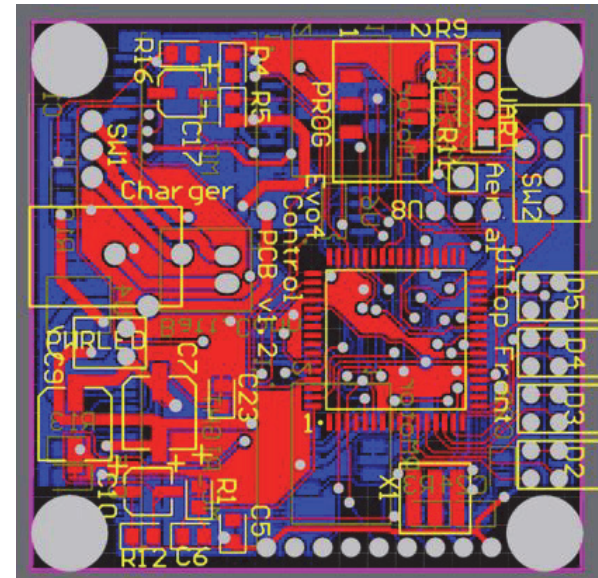
Trükkplaatide valmistamine

Praktilisi nõuandeid

- Mõõtühik on *mil* (1/1000 tolli, st. 0,0254 mm)
- Augud
 - mida väiksem auk, seda kallim plaat
 - väikseimad augud võiksid olla 0,5 mm või suuremd
 - mida paksem plaat, seda suuremad augud – 2 mm plaat -> mitte alla 0,4 mm augud
- Ühendusrajad
 - liiga kitsad rajad ja radadevahed tekitavad probleeme
 - soovitatav laius 0,25 mm (10 mil)
- Polügonid (suured pinnad, nt. maakiht)
 - kasutatakse ekraaniks, jahutamiseks jne.
 - väikseim vahe polügoni ja radade vahel vähemalt 0,25 mm
- Jootemask
 - kõikide jooteplastside jaoks peaks olema jootemaskis (kaitselakk) vastav auk
- Markeering
 - ei tohi sattuda jootekohtadele, täpsus ~0,5 mm

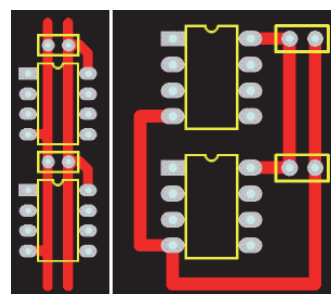
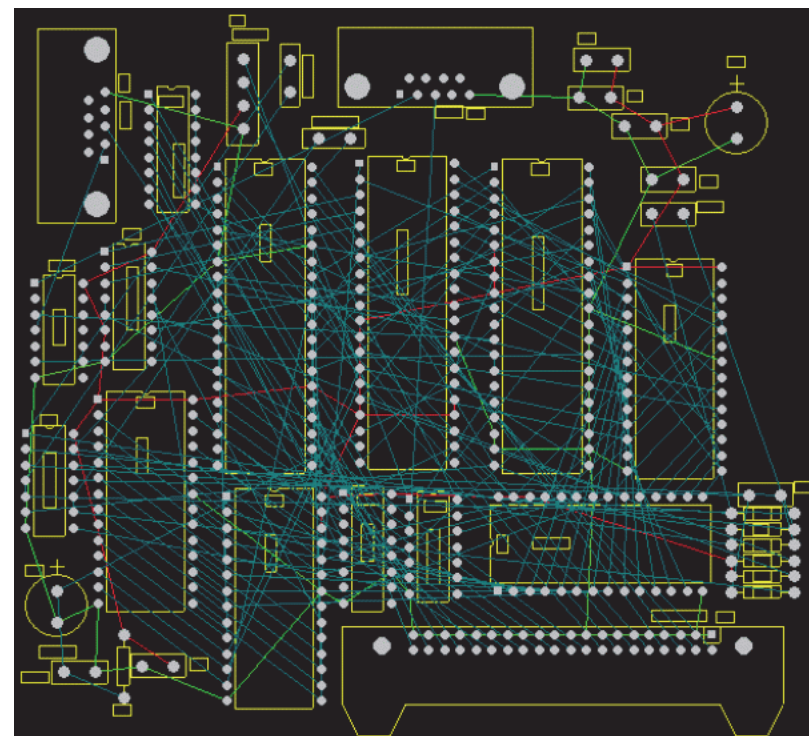
Trükkplaatide projekteerimine

- **Skeemist moodulini**
 - Skeemi sisestamine
 - Komponentide paigaldamine
 - siinide asukohad
 - tugikomponendid
 - Ruutimine
 - harakapesa (rat-nest) asendamine traatidega
 - toiteühendused
- **Kontroll (DRC)**
 - radade mõõtmised
 - radadevahelised kaugused
 - aukudevahelised kaugused
 - jne.

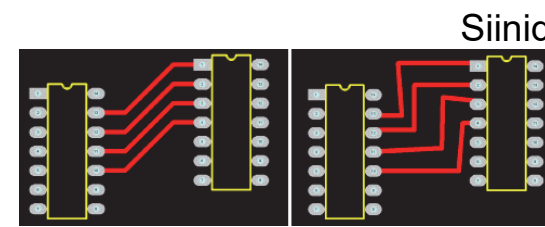


Trükkplaatide projekteerimine

- **Projekteerimine**
- **PCB Design Tutorial**
 - David L. Jones
 - <http://www.alternatezone.com/>
- **Mõningaid soovitusi**
 - **Toite ühendamine**
 - filterkondensaatorid
 - **Siinide ühendamine**
 - **Mitmekihilised plaadid**
 - läbiviikude tüübid – läbi terve plaadi, (osaliselt) peidetud
 - läbiviikude asukohad – sünkroniseerimine
- **EAGLE**
 - Easily Applicable Graphical Layout Editor
 - CadSoft Online – <http://www.cadsoft.de/>



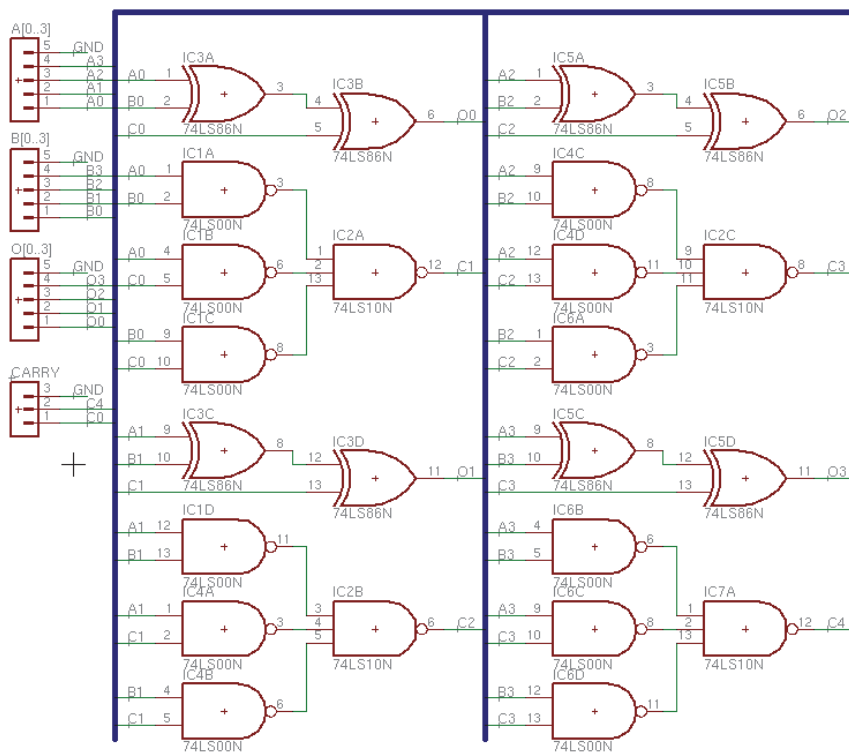
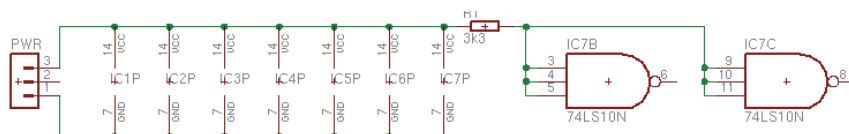
Toide



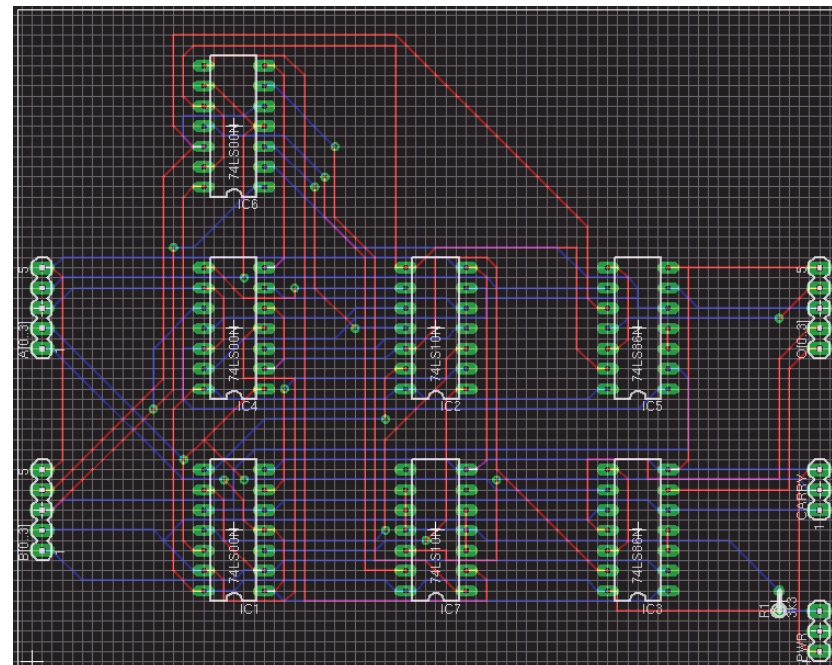
Siinid

Näidisdisain – 4-bitine summaator

7 kiipi: 2x(4x2-XOR), 3x(4x2-NAND), 2x(3x3-NAND)



36 ahelat, 82 ühendust, 17 läbiviiku



36 ahelat, 82 ühendust, 64 läbiviiku

