



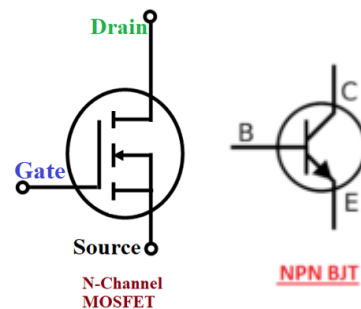
## FET transistorer Generelt.

Fet-transistorer er opbygget helt anderledes end bipolar transistorerne. Her er det ikke en basisstrøm, der styrer ledeevnen gennem transistoren, men et elektrisk felt. Dvs. der blot skal en spænding på indgangen, der her kaldes ”**Gate**”. Altså et elektrisk felt !!

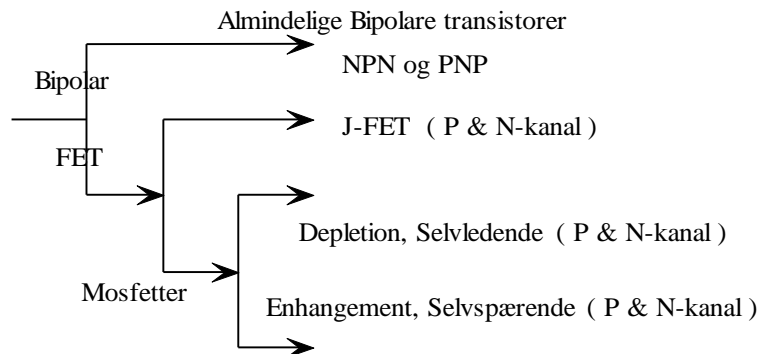
Heraf navnet, **F**ield **E**ffect **T**ransistorer.

I stedet for Base, Collector og Emitter er terminalernes navne nu

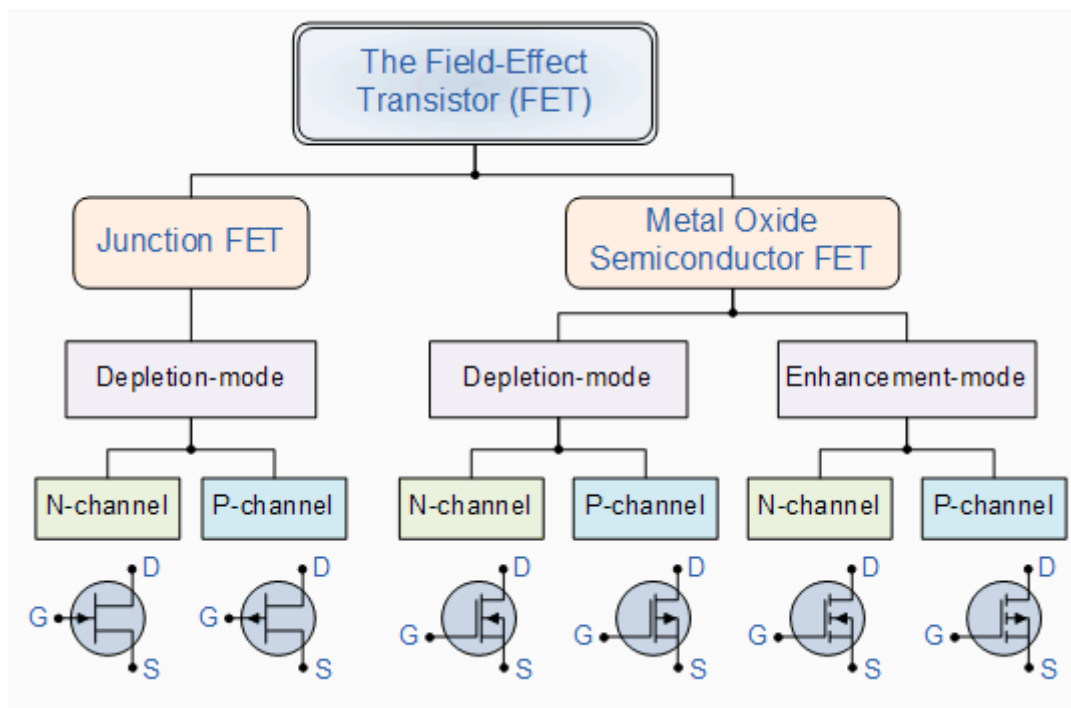
Gate, Drain og Source.



Familietræet for alle transistorer kan tegnes som denne skitse:



Der mangler en kombination af MOSFet selvspærende N-kanal og BJT PNP, kaldet IGBT.



Eller som her, gaflet fra nettet:

Her er også vist de ”standard” diagram-symboler, der bruges

Kilde: [http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran\\_8.html](http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_8.html)

Som der ses, findes der flere typer FET’er. Fælles for de forskellige FET-typer er at:

- Styres af spændingen på gaten.  $\Delta U_{GS}$
- Har stor indgangsmodstand  $R_i$  på gaten. Fx  $10^{12}$  Ohm statisk. Dynamisk vil kapaciteter på chippen spille ind !! og kræve en strøm i gaten, stigende ved højere frekvenser!
- Der er stor parameterspredning
- Transistorerne findes både som P & N-kanal ( svarende til NPN og PNP )
- Nogle forhold er ringere, nogle er bedre end hos Bipolar transistorer.
- FET-er har en lav forstærkning.

## MOSFET

For J-Fet transistorer – se et andet dokument.

For MOSFET’s ( **M**etal **O**xid **S**emiconductor FET’s ) gælder, at gaten er totalt isoleret fra halvlederkrystallet med en tynd metal-oxid-film. Der er ingen diode som i JFET’er. De kaldes også for ” Isoleret Gate FET”.

Dette giver en meget høj indgangsmodstand  $R_i$  på 10 til 100 TerraOhm. Men herved følger også problemer med følsomhed overfor statisk elektricitet. Dette fordi gatens isolering fra Drain-Source-kanalen er udført med et meget tyndt lag Metal Oxid, og derfor skal der ikke så stor spænding til på gaten før der sker gennemslag til Source, og ødelæggelse af transistoren.



Mosfet's bruges både til småsignal forstærkere hvor stor indgangsmodstand,  $R_i$  ønskes. Og til SWITCH-formål, både for småsignaler og til meget store strømme. De kaldes så fx for Power-MOS.

Det der sker i transistoren er, at når der er en spænding på ca. 3 – 5 volt på gaten i forhold til Source, kan der løbe strøm fra Drain til Source.

De er i princippet modstanden fra Drain til Source, der går fra at være næsten uendelig høj til næsten nul Ohm.

Så man kan godt opfatte det som om, at det er modstanden mellem Drain og Source der kan styres af en spænding på Gaten.

Se animation [her](#): fra 2:50 til 7:42:

Når transistoren er ”ON” – dvs. leder, - er det fordi modstanden  $R_{DS}$ ,  $R_{\text{Drain-Source}}$  er blevet meget lille. Måske kun nogle få milliohm. Der er derfor kun lille varmetab selv ved store strømme gennem transistoren.

Varmeafsætningen findes som bekendt som  $P = I^2 \cdot R [W]$

For Power-MOSFET'er til store strømme har man derfor tilstræbt, at modstanden  $R_{DS}$ , modstanden fra Drain til Source er så lille som muligt, for ikke at få for stor effektafsætning og dermed tab og opvarmning. Og der er tilstræbt at transistoren kan modstå meget høje Drain-spændinger – i Off-tilstand.

Der findes to typer MOSFET's: Selvspærrende, og Selvledende:

Og hver af typerne fremstilles i både småsignal og power-udgaver.

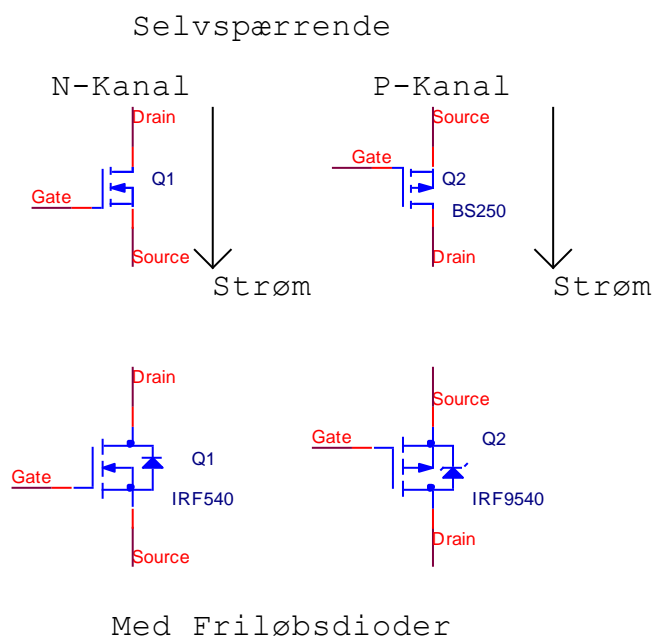
**Selvspærrende MOSFET, på engelsk: Enhancement MOSFET, til switch-formål !!**



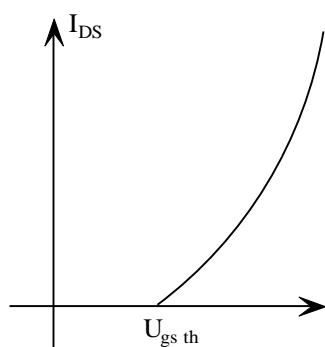
Til højre ses diagramsymbolerne for MOSFET.

I venstre side N-kanal, og i højre side P-kanal.

Linjen til højre for gaten er stiplet, for at indikere, at Mosfet'en spærres, altså ikke er ledende ved  $U_{gs} = 0$  Volt.

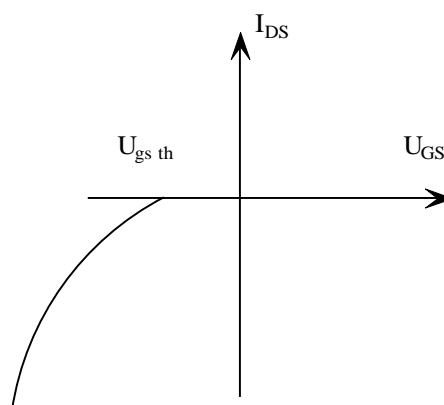


## Grafer for transistorernes lede-egenskaber.



N-kanal

Eks: BS170



P-kanal

Eks: BS 250

Opgave: Tjek grafen for småsignal BS170 [her](#):

Og for IRF540 fx [her](#):

At en MOSFET-transistor er **Selvspærrende** betyder, at ved en gate-spænding på 0 Volt i forhold til Source, vil den spærre.

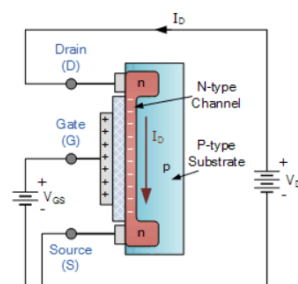
Kommer gatespændingen over en værdi, kaldet  $U_{gs\ threshold}$ , leder transistoren fra Drain til Source.

Opbygningen af transistoren kan skitseres med følgende:



Hvis  $V_{GS} = 0$ , er transistoren OFF. Der løber ingen strøm fra Drain til Source.

Transistoren er i dens "Cut Off Region".

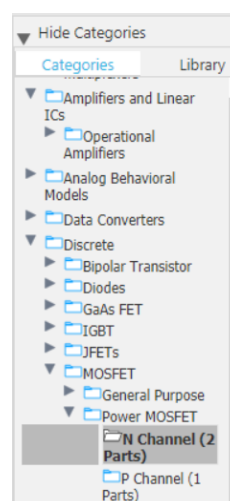


Hvis  $V_{GS}$  forøges, vil transistoren forblive i dens "cut off" indtil  $V_{GS}$  når et specielt niveau, kaldet dens Threshold Voltage,  $V_T$ .

Typisk er  $V_T$  nogle få volt.  $i_d = 0$  for  $V_{GS} \leq V_T$

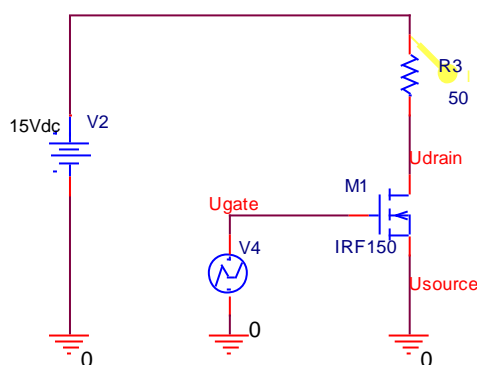
Der kan findes en PowerMosfet som vist her:

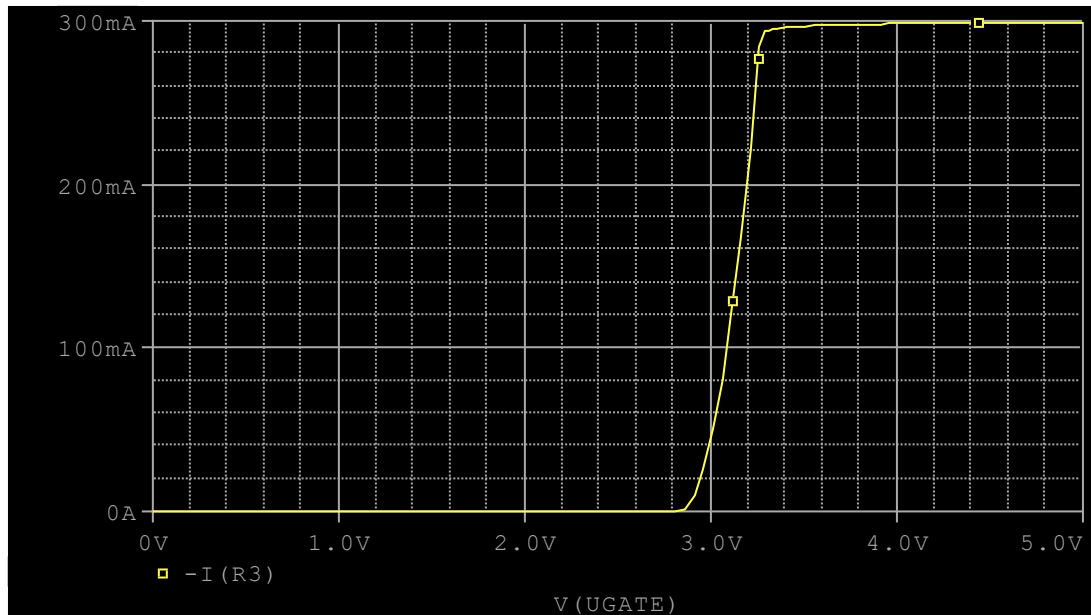
Eller blot i Place / Pspice Component / Discrete



ORCAD simulering.

VPWL er fra 0 til 5 Volt. Eller brug blot en VDC og vælg en DC-Sweep





Bemærk, ud ad X-aksen er Gatespændingen,  $U_{GS}$ .

I graf-visningsprogrammet ( vinduet ), gå ind i Plot, / Axis Settings / Axis Variables.  
Vælg her  $U_{gate}$ .

$I_{drain}$  kan beregnes af formlen:

$$I_D = K(U_{gs} - U_{gsth})^2$$

Der indgår en konstant, K, der beregnes af:

$$K = \frac{I_{Don}}{(U_{GS} - U_{GSth})^2}$$

Eksempel:

$I_{DON} = 3 \text{ mA}$  ved  $U_{GS} = 10 \text{ V}$ , og  $U_{GSth} = 5 \text{ Volt}$ .  $U_{GS}$  vælges til 8 Volt !

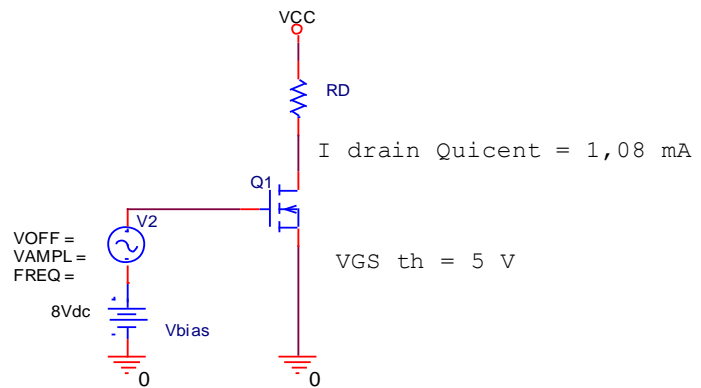
$$\text{Der findes : } K = \frac{I_{Don}}{(U_{GS} - U_{GSth})^2} \rightarrow K = \frac{3\text{mA}}{(10-5)\text{V}^2} = 0,12 \left[ \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \right]$$

$$I_D = K(U_{gs} - U_{gsth})^2, \rightarrow I_D = 0,12 \left[ \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \right] \cdot (8-5)[\text{V}^2] = 1,08 \text{ m[A]}$$



Her ses et eksempel på en MOSFET som småsignalforstærker.

Transistoren skal lede "Halvt" – og indgangssignalet skal så få transistoren til at lede mere eller mindre.



## Biasing E-MOSFET som signalforstærker:

Ved hjælp af to modstande indstilles en gatespænding, der bringer transistoren i et arbejds punkt. Gatespændingen må være så høj, at transistoren "leder halvt".

Bias-spændingen etableres af en spændingsdeler:

Gate spændingen er:

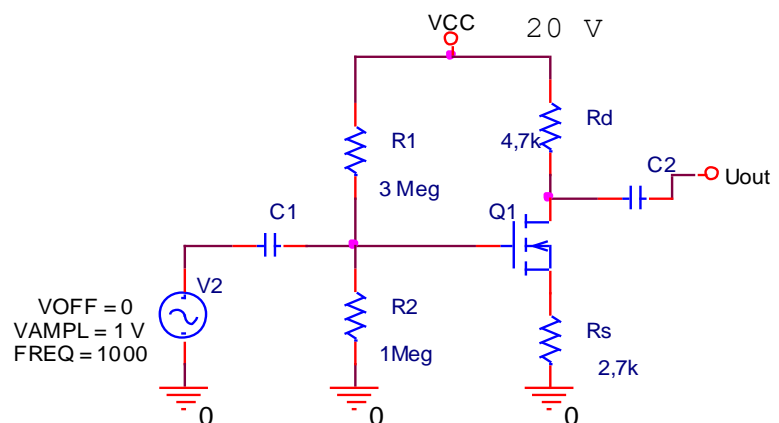
$$V_G = U_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$V_G = 5V$$

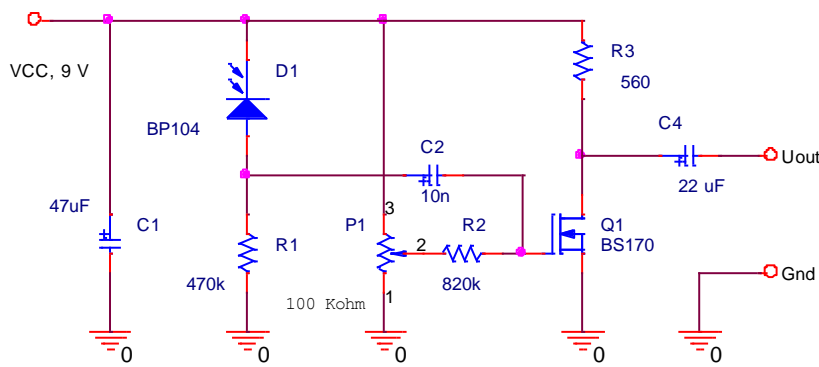
Der flyder ingen strøm ind i gaten pga. Den ekstrem høje indgangsmodstand.

Så Gate spændingen er lig:

$$V_G = V_{GS} + R_S \cdot i_D$$

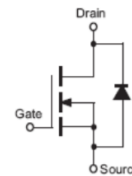


## Eksempel på brug af en MOSFET. IR-forforstærker:

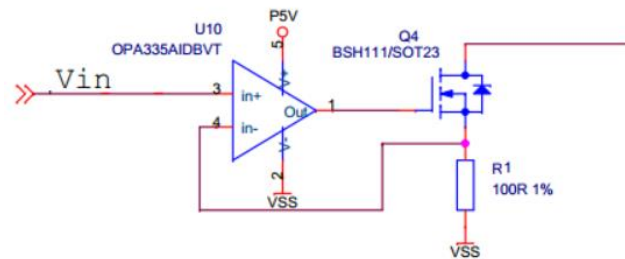


Kredsløbseksempel til at overføre audio via infrarød lys.

På udgangen tilsluttes et par hovedtelefoner!!



Forklar kredsløbet:



$$I_{out}(\text{mA}) = 10 \times V_{in}(\text{V})$$

**DEPLETION, D-MOSFET, SELVLEDENDE, ( Tysk: Verarmung) , Fås både i N-kanal og P-kanal.**

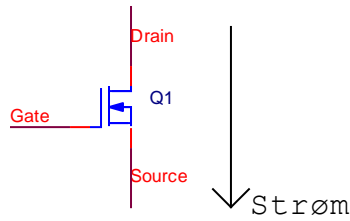
Der findes også en type MOSFet, der virker anderledes. De er ikke beregnet til Switch-brug, snarere til signal-forstærkning, fx i lyd-forstærkere! De kaldes selvledende, fordi de leder strøm fra Drain til Source selv ved 0 volt på gaten.

( I diagramsymbolet er linjen til højre for gaten fuldt optrukket, som indikation på, at transistoren er selvledende. )

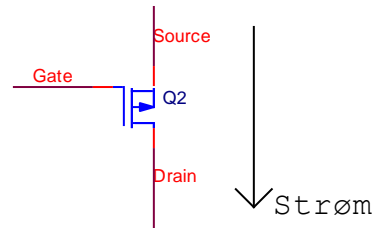




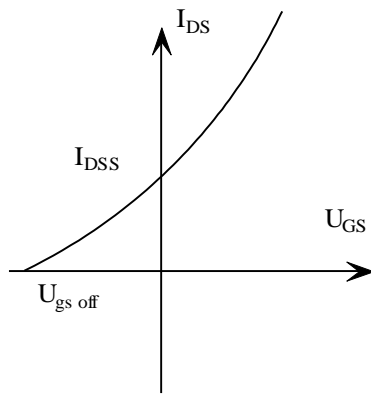
Selvledende



N-Kanal

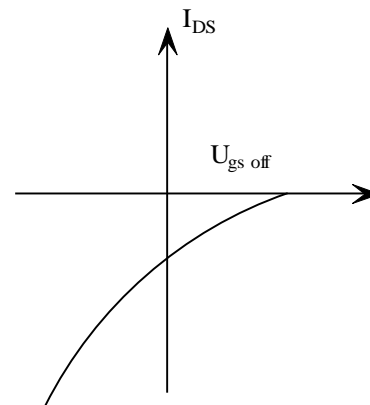


P-Kanal



N-kanal

Eks:



P-kanal

Eks:

At transistoren er selvledende betyder, at ved en gatespænding på 0 Volt, vil den lede!

$I_D$  beregnes af formlen

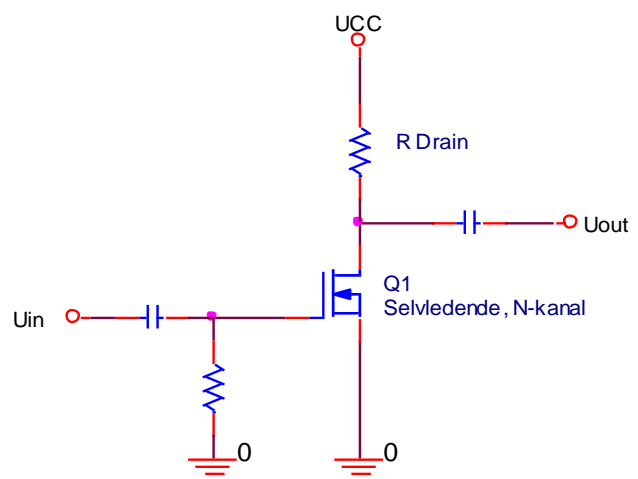
$$I_D = I_{DSS} \cdot \left[ 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GSoff}} \right]^2$$

## Biassing D-MOSFET

Transistoren leder af sig selv. Gaten skal blot stilles, for ikke at blive for højimpedant.

Dvs. et signal fra  $U_{in}$  kan "pumpe" gatespændingen op og ned, og derved påvirke transistorens  $I_{DS}$ .

Denne ændring i  $I_{DS}$  giver en ændring i delta  $U_{Rdrain}$ . Og derved et signal på  $U_{out}$ .



OBS:



Mosfets er meget følsom overfor statisk elektricitet. Skal opbevares i ledende poser, i ledende skum eller lignende. Dvs. der ikke kan være et sted på transistoren, der har et andet potentiale end de andre!

Arbejdsbordet skal stilles, der skal bruges ledende armbånd til arbejdsbordet, og der må ikke være spænding på, når man arbejder med transistorerne.

Følgende er en scannet oversigt over forskellige FET- og MosFET-typer:



# MOSFET

**JUNCTION FET**  
JFET gate for- lündet bil Hamd i nmerret-ning.

**FET**

**MOS-FET**  
gate iso- lret for Hamd.

**DEFLECTION TYPE**  
VERARMINGS-TYP

**ENHANCEMENT-TYPE**  
AURE ICHTRUNGUS-TYP

---

**N-KANAL**

Negativ  $V_{gs} \Rightarrow I_{DS} \rightarrow 0$   
 $I_D = I_{DSS} (1 - \frac{V_{gs}}{V_P})^2$   
 EKS. BC264, BF245, 2N5157, 58, 59, 2N4091, BD523

**P-KANAL**

Positiv  $V_{gs} \Rightarrow I_{DS} \rightarrow 0$   
 $I_D = -$   
 EKS. 3199, BD510?

---

**N-KANAL**

Negativ  $V_{gs} \Rightarrow I_{DS} = 0$ , ledet ved  $V_{gs} = 0$ , "relulerende"  
 EKS.

**P-KANAL**

Positiv  $V_{gs} \Rightarrow I_{DS} = 0$ , ledet ved  $V_{gs} = 0$ , "selulerende"

---

**N-KANAL**

Negativ  $V_{gs} \Rightarrow I_{DS} = 0$ , s pannen ved  $V_{gs} = 0$ , "selspanende"  
 $R_i \sim 10^9 - 10^{11} \Omega$ ,  $R_{DS(on)} \sim 5 \Omega$   
 EKS. ITT 1B5190, FERRANTI ZVN1304A, silicou. VU10 LM, B5522, BD522

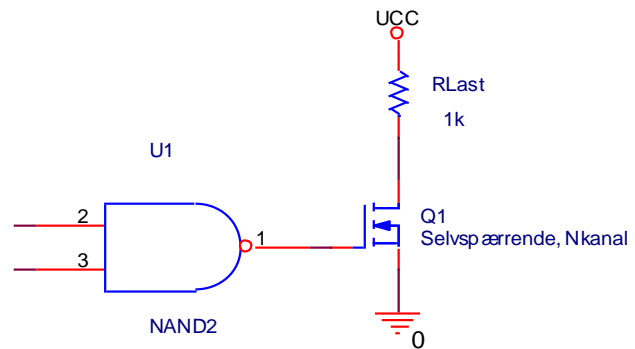
**P-KANAL**

Positiv  $V_{gs} \Rightarrow I_{DS} = 0$ , s pannen ved  $V_{gs} = 0$ , "selspanende"  
 EKS. ITT 1B5350 (V-MOS), silic, 3N163, 3N4069, BD578.

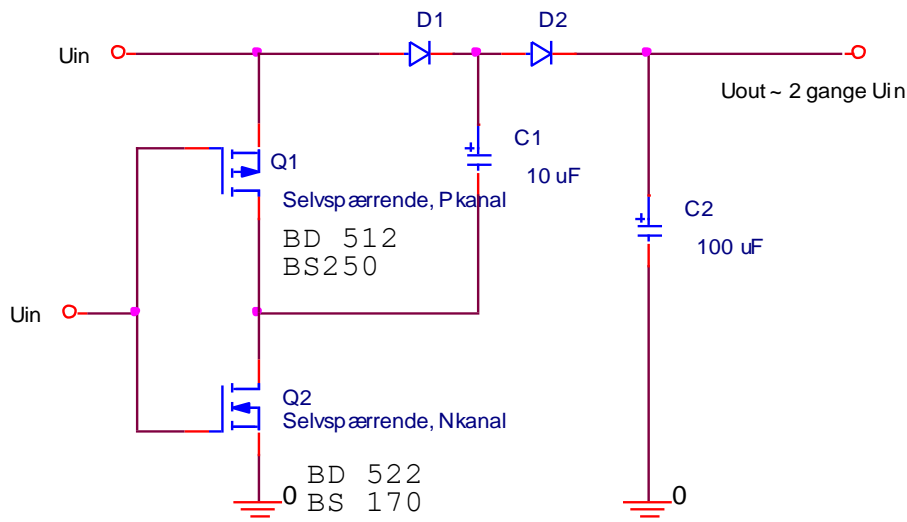


## Kredsløbseksempler med MOSFET's

Mosfet anvendt som switch.



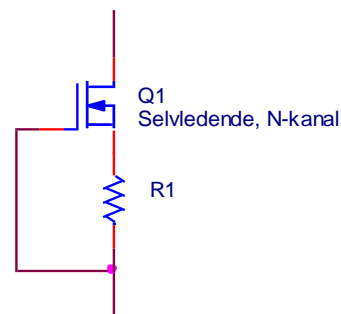
### Spændingsdobler



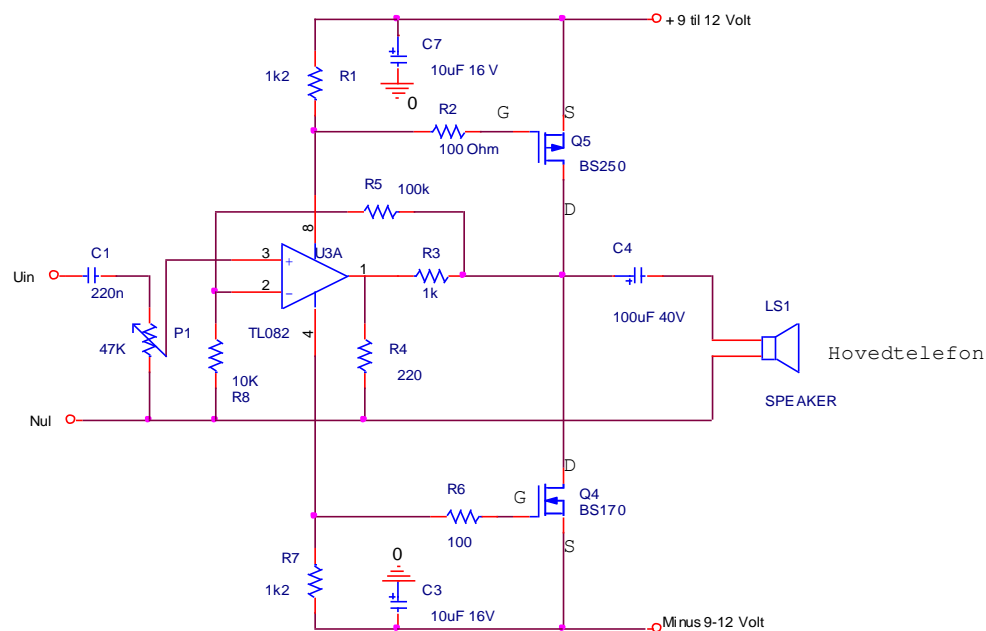
Spændingsdobler efter  
ladningspumpe-  
princippet:

Konstantstrøms-generator.

$$I_{Konst} \cong \frac{U_{GS}}{R}$$



Hovedtelefon-forstærker med MosFet.



Bemærk, at Operationsforstærkerens udgang ikke styrer udgangstransistorerne. Det gør OPAMP'ens forsynings-ledninger. Hvis opamp'ens udgang ønskes at gå opad, forsøger den, og den trækker mere strøm fra plus. Herved falder spændingsfaldet over R1.

## PowerMOS

Mosfets beregnet til store strømme kom frem allerede ultimo 1970'erne. De er optimeret for store strømme. Ved store strømme gælder det om, at modstanden mellem Drain og Source er så lav som muligt, for at holde delta  $U_{DS(on)}$  så lav som muligt, og derved få så lille en effektafsætning som muligt.

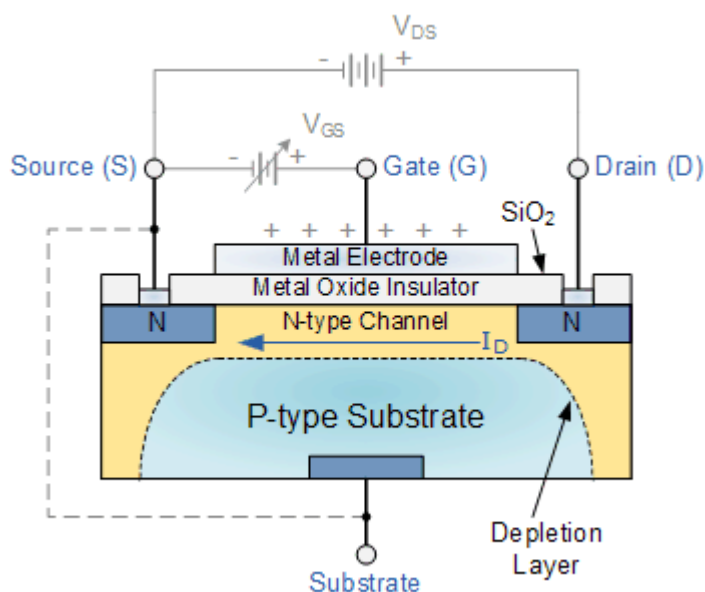
Forskellige firmaer har forsøgt at optimeret dette ved at lave forskellige udformning af chippen: Her en oversigt over forskellige firmaer, og eksempler på de navne, de giver deres POWERMOS chips.

Se video: <http://freecircuitdiagram.com/2010/03/31/transistor-mosfet-video-tutorial/> ( 4:49 )

Fabrikant	Navn	Kommentarer
IR, International Rectifier	HEXFET	Mange 6-kanter,
Siliconix	V-MOS	Udformet i V-form på Chippen
Siemens	SIP-MOS	Mange ( flere tusinde ) enkelte parallelle transistorer på chippen

En effekt MOSFET (eller power MOSFET) kan have fabrikant-salgnavne som fx:

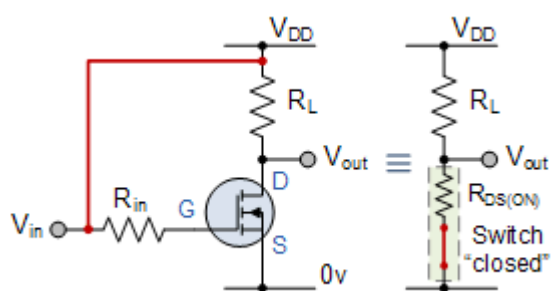
VMOS, TMOS, DMOS, MegaMOS, HEXFET, HiPerMOS, SIPMOS, TrenchMOS)



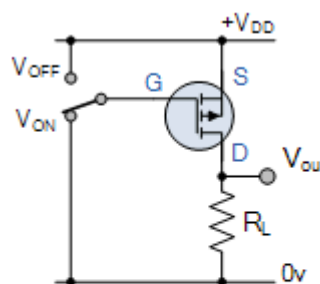
PowerMOS har en isolerende lag Metal Oxid mellem Gaten og selve transistoren.

Derfor har den stor indgangsimpedans.

Når spændingen på Gaten kommer over en tærskelværdi på få Volt, bliver N-kanalen ledende.



N-Kanal



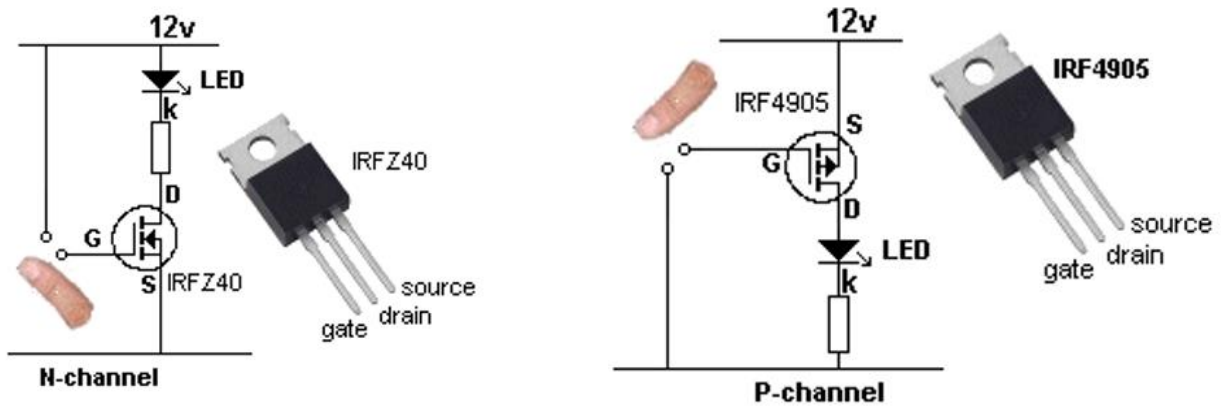
P-channel  
MOSFET Switch

P-Kanal

Herover er vist et par skitse-diagrammer, for en N-kanal og for en P-kanal.

Bemærk, at P-Mos har Source opad, og Gatespændingen skal være lavere end Source, dvs. negativ i forhold til Source.

De følgende to skitser viser, at bare den strøm, der går gennem fingeren, tilfører gaten så stor ladning, at transistoren kan styres on. Og den forbliver on indtil ladningen fjernes ved at forbinde gaten til GND.



<http://www.audiokarma.org/forums/showthread.php?t=453275&page=9>

For POWER-MOS gælder det om at få  $R_{DS\ on}$  så langt ned, som muligt.

Der fås Power-MosFets med  $R_{ds\_on}$  på få milli-Ohm, selv ved en strøm på fx 45 Ampere.

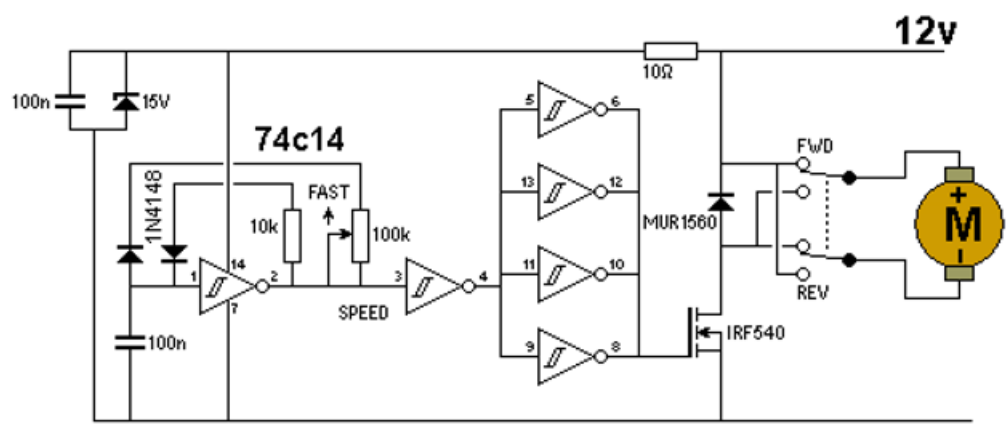
Jo lavere  $R_{ds\_on}$  jo mindre varme afsættes når der løber strøm.  $P = I^2 \cdot R$

Tjek fx  $R_{ds\_on}$  og  $U_{gs\_th}$  for IRF540N og IRL540

P-kanal MOSFet kan ikke laves så gode som N-Kanal typer. Deres  $R_{DS\ on}$  er ca. 2 gange så stor som for en tilsvarende N-Kanal transistor.

$R_{DS\ on}$  stiger ved stigende temperatur.

Eksempel på  
bore-skrue-  
maskine  
kontroller.



## Gatedriver

I MOSFETs er gaten totalt isoleret fra Drain og Source, i størrelsen TerraOhm.



Derfor vil der **tilsyneladende** ikke gå en strøm i Gaten. Dette gælder dog kun for **statisk** brug.

Ofte bruges MOSFETs til at pulsbreddemodulere energiafsætning i fx en motor, så man kan styre omdrejningshastigheden. Dvs. der switches on og off mange gange pr sekund med en bestemt duty cycle.

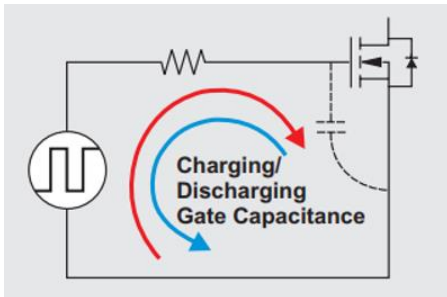
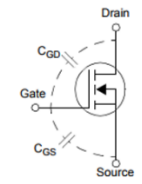
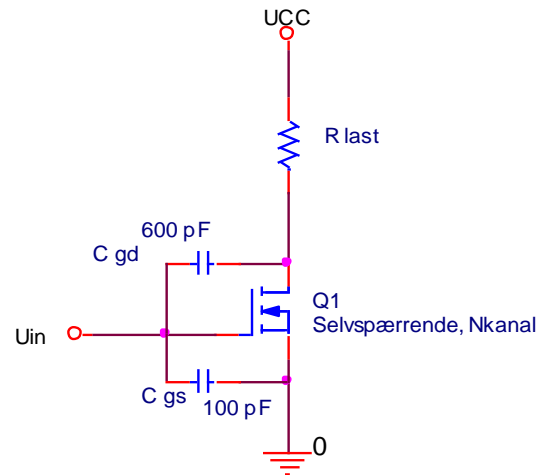
Desværre er der nogle små kapaciteter ( kondensatorer ) mellem Gate og Drain og mellem Gate og Source.

Det vil altså sige, at for at ændre spænding på gaten skal kapaciteterne lades op / af.

Der skal altså flyttes ladninger til eller fra gaten i skifteøjeblikket. Altså løber der en strøm.

Og det er jo sådan, at hvis transistoren switches on "ret langsomt" - vil der blive afsat en del varme i form af  $\Delta U_{DS} \cdot I_{DS}$  imens transistoren er ved at switsche on. – Eller tilsvarende Off.

Derfor gælder det om, at skiftene sker så hurtigt som muligt. Altså skal gate-kapaciteterne lades Op/Af på meget kort tid. Altså vil der kræves en ret stor gatestrøm.



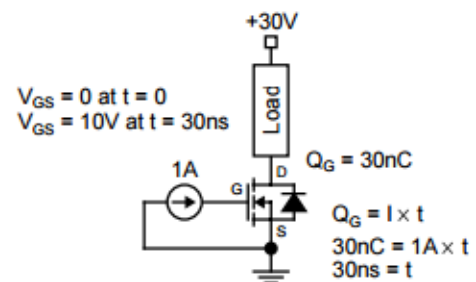
Men gatestrømmen er jo begrænset af udgangsmodstanden i driverkredsløbet.

Gatestrømmen må være bestemt af  $Q_G = I \times t$

Så hvis der skal switches on på kort tid, må strømmen være større.

Her et tænkt eksempel:

De ligninger, der kan komme i spil er flg:



$$Q = C \cdot U$$





( ladning = kapacitet x spænding )

$$Q = I \cdot t$$

( ladning = strømmen x tiden )

$$I = C \cdot \frac{dU_{gate}}{dt}$$

dt er turn on time, tiden fra 0 til max på gaten.

C er gate-kapacitansen.

I er gate peak strøm.

Der findes:  $I \cdot t = C \cdot U$  og heraf:  $I = \frac{C \cdot U}{t}$  [A]

Det betyder, at hvis fx gate-ladningen er 20nC ( Coulomb ) vil det med en gatestrøm på 1 mA tage 20 µS at switche ON, eller på 20 nS ved 1A.

Oplade- eller afladetiden kan groft beregnes af  $U \cdot C / I$ .

Eksempel:

En Mosfet skal styres af en uC, der kan source / sinke 20 mA.

$C_{in}$  i MOSFET-en er 2 nF.

Oplade – eller aflade - tiden kan groft regnes efter  $(U \cdot C) / I$ .

Dvs.

$$\frac{5[Volt] \cdot 2 \cdot 10^{-9}[F]}{20 \cdot 10^{-3}[A]} = 0,5 mS$$

Altså ikke så hurtig switch-tid.

( Kilde: Elektor 10/2011 )

Hvis man arbejder med PulsBreddeModulering, ( PWM ) fx ved 10 kHz, vil 1 cycle vare = 100 µS. Og så må switch-tiden selvfølgelig helst kun være en brøkdel heraf.

Ønsker man at oplade ( eller aflade ) nogle få nF fx fra 0 til 12 Volt, ved PWM kræver det hundreder af mA drive-kapacitet.

Typiske switch-tider er i størrelsen uSekunder. Switch-tiden vil være omvendt proportional med strømmen, der skal lade gate-kapaciteten. Derfor er det ofte nødvendig med en strøm på flere hundrede mA eller mere for at ændre en gatespænding fra 0 til 5 Volt.

Et eksempel mere:



En N-kanal MOSFET styres med en gatespænding fra 0 til 10 Volt i løbet af 25 nS. Den har en gateladning på 50nC.

$$I_{Gate} = \frac{Q_{Gate}}{t_{Transition}} = \frac{50 \cdot 10^{-9}}{25 \cdot 10^{-9}} = 2 A$$

Hvis en driver ikke kan yde strøm nok, vil det jo selvfølgelig øge switch tiden. Og dermed øge varmeafsætningen i MOSFET'en.

Derfor kræves der en god gatedriver ved høje frekvenser. En uC kan typisk kun levere fra få til 30 mA

## Gode råd!

*Keep the connections from microcontroller to MOSFET short, both gate and source. The gate-source capacitance is relatively large and wires act as inductors. The combination of long wires,  $C_{GS}$  and sharp edges will introduce ringing. (Oscillations). Instead of turning the MOSFET quickly on and off, it will spend a relatively long time in its linear mode of operation, where a lot of heat is dissipated.*

*To dampen ringing, a small resistor 100~220  $\Omega$  in series with the gate is good practice.*

*Kilde: <https://electronics.stackexchange.com/questions/65944/mosfet-for-pwm-application?rq=1>*

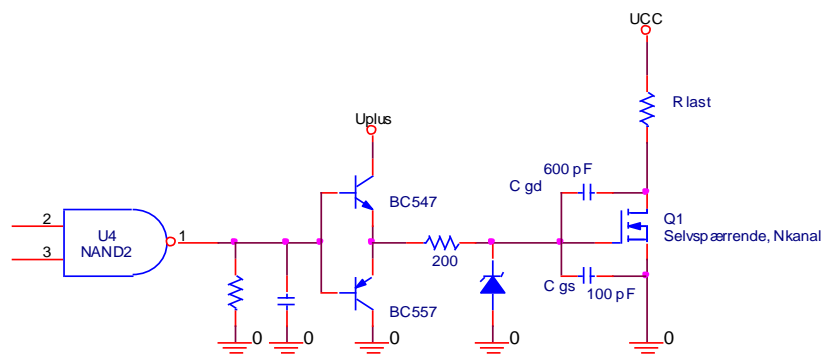
Se også: <https://www.re-innovation.co.uk/docs/open-charge-regulator/charge-controller-project-power-switching/>

## Gate driverkredsløb

Ved fx PWM kræves der altså et godt driverkredsløb, der kan levere / synke en stor strøm. Her er vist nogle eksempler:

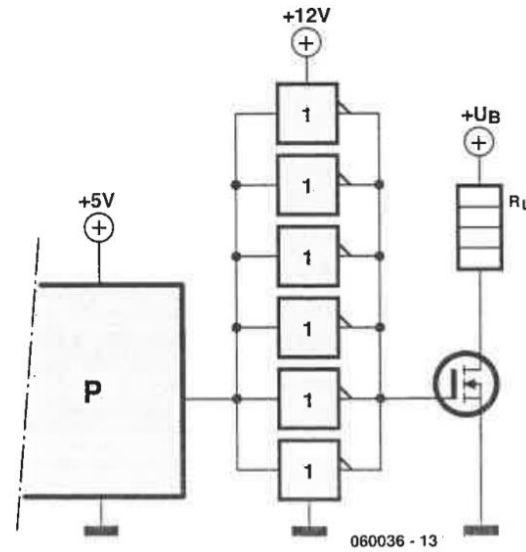
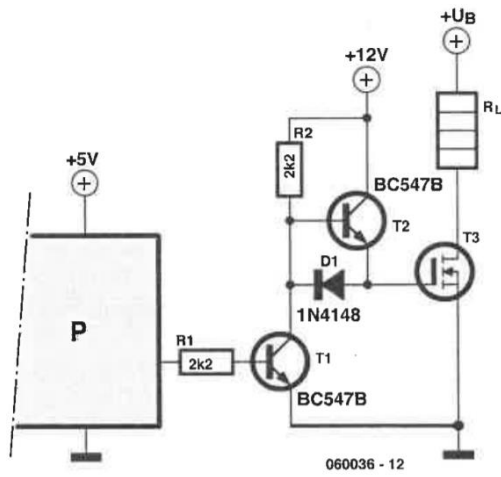
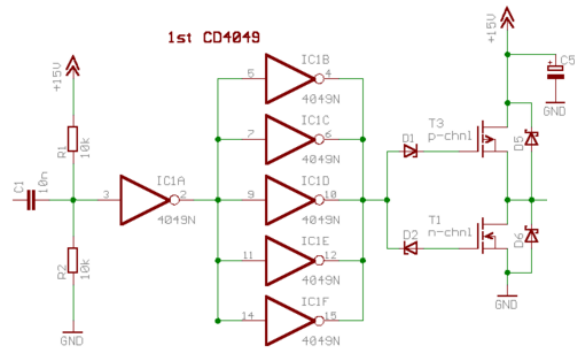
Modstanden på 200 Ohm – kan være mindre, fx 100 Ohm, - skal begrænse strømmen ind ud af driveren, idet en kondensator vil optræde som en kortslutning lige når driveren bliver høj.

Og forhindre ringning !!

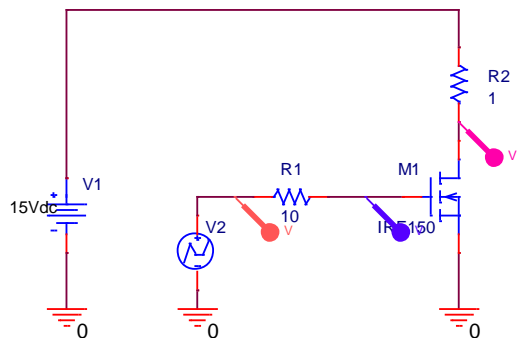




Evt. kan en driver bygges ved at flere gates kobles sammen i parallel.



Gatene til højre er såkaldte buffere. 4049 eller 4050. De kan håndtere lidt større strøm, source ca. 4 mA og sink ca. 16 mA hver. De 12 volt forsyning er vist noget for højt til at indgangen kan triggeres. Men ifølge kilden ( Elektor 10/2011 ) er det OK med 9 Volt.



### Opbyg og simuler kredsløbet.

Her skal R1 simulere udgangsmotstanden i driveren.

Mål Ugs ved forskellige R1.

Se også på  $I_{gate}$  ved forskellige switch-hastigheder.



## Opladeforløbet af Gate-kapaciteterne

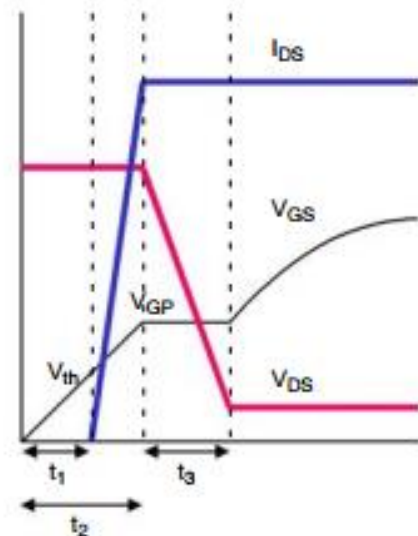
Ved switching af en Mosfet skal gaten gøres høj.

Og man er nødt til at oplade kondensatorerne  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$ .

Men når  $V_{th}$  nås, begynder transistoren at lede, og Drainspændingen falder. Dvs. at kondensatoren  $C_{gd}$  trykker spændingen på gate fordi  $U_{drain}$  falder.

Der skal derfor i en periode af opladningen tilføres ekstra ladninger uden at  $U_{gs}$  stiger.

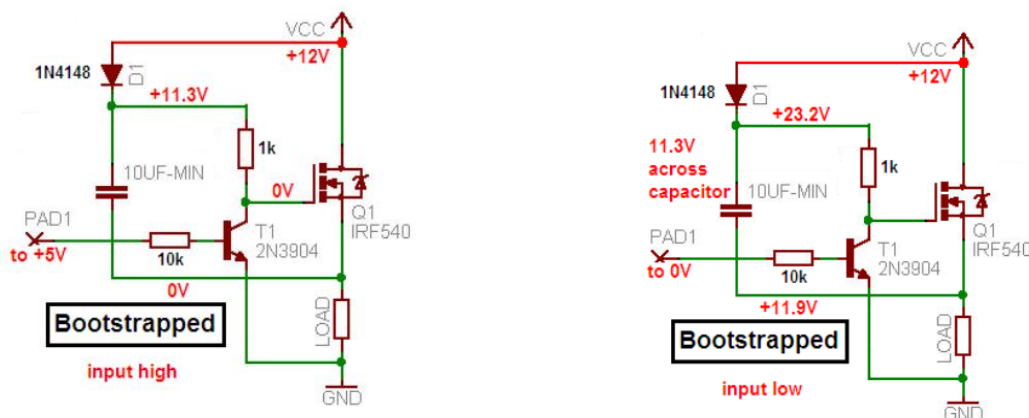
Altså vil gatespændingen teoretisk se ud som her til højre !!



Turn-on transient of the MOSFET.

Fra: [http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Vishay\\_8026/PDF/VishaySiliconix\\_MOSFETBasics.pdf?redirected=1](http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/Vishay_8026/PDF/VishaySiliconix_MOSFETBasics.pdf?redirected=1)

For at undgå dyre gate-drivere : se fx <https://www.re-innovation.co.uk/docs/open-charge-regulator/charge-controller-project-power-switching/>



Bemærk: Her er belastningen sat ned under source.

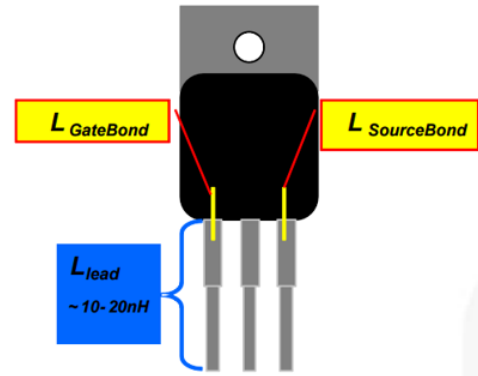
## Induktionsproblemer



Ydermere opstår der problemer fordi en ledning også optræder som en selvinduktion, dvs. som en spole.

Selv i tilledningerne til Mosfets er der en selvinduktion.

Dvs. at der ved store skiftehastigheder af store strømme opstår store induktionsspændinger.



Fra: <https://www.fairchildsemi.com/application-notes/AN/AN-9005.pdf>

Her et eksempel, der illustrerer Source wire induktansen.

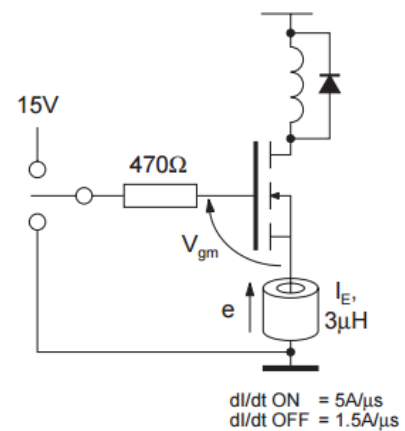
Ændres en strøm i en spole, vil der genereres en spænding:

$$U_L = -L \frac{di}{dt}$$

Eksempel:

En ledningen har en selvinduktion på 50 nH. En strøm på 60 Ampere switches i løbet af 25 n[sek.]:

$$U = L \cdot \frac{di}{dt} = 50 \text{ nH} \cdot \frac{60 \text{ A}}{25 \text{ nS}} \approx 120 \text{ Volt.}$$



Fra: [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00003900.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00003900.pdf)

Wire-induktanser gælder jo også for printbaner.

En printbane har som tommelfingerregel en induktans på 6 til 10 nH pr cm.

Rule of thumb: For straight round conductor ~0.5 mm,  $L = 10 \text{ nH/cm}$

På nettet findes et hav af kalkulatorer.

Her et par eksempler:

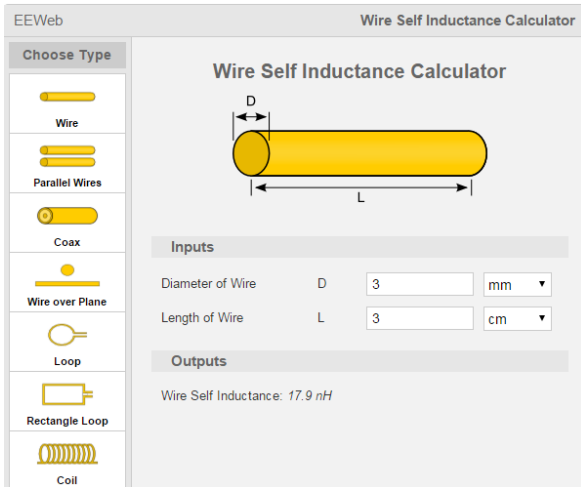
Flat Wire Inductance Calculator

rectangular cross section), can be found using the calculator or the formula given below.

Enter the Length:	20.0	cm			
Enter the Width:	0.3	cm	Inductance:	215.385789	nH
Enter the Thickness:	0.035	mm			

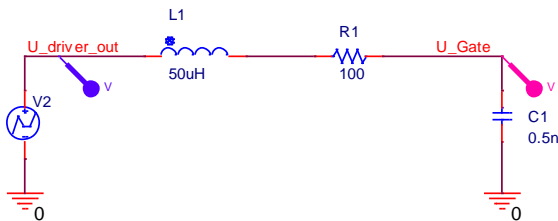
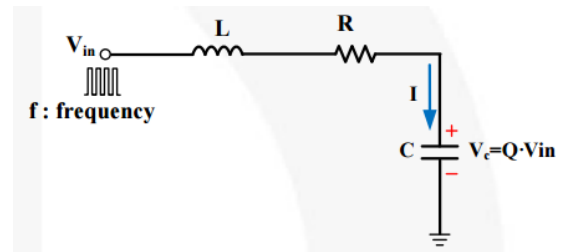


<http://chemandy.com/calculators/flat-wire-inductor-calculator.htm>

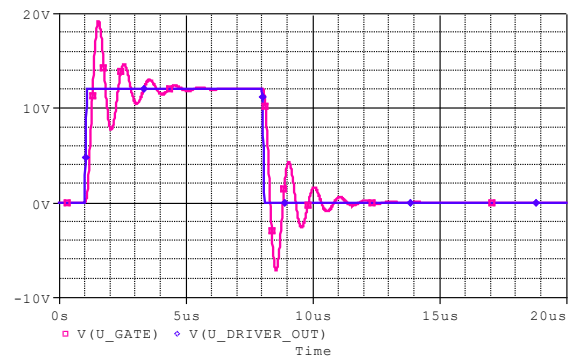


<https://www.eeweb.com/tools/wire-self-inductance-calculator/>

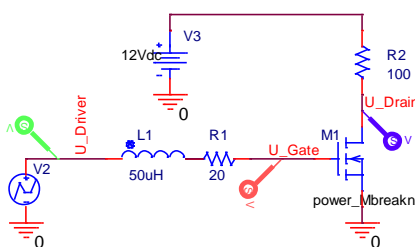
Eksempel på virkningen af en induktion i Gate-tilledningen:



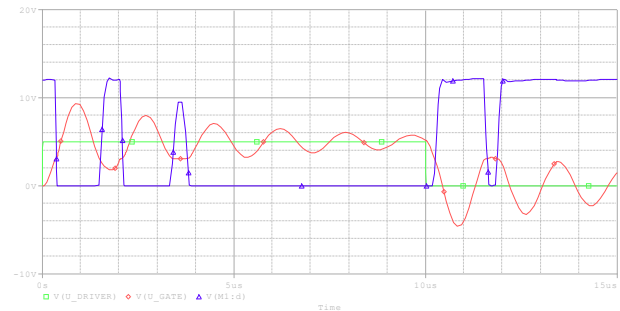
Der opstår "ringning".



I næste eksempel er vist, hvor galt det kan gå, hvis forholdene er til det !!



Grafen:





## Kredsløbs-eksempler med MOSFETs:

Forklar kredsløbet:

### Komponentliste:

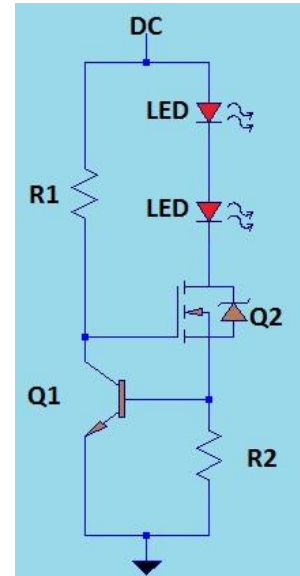
R1: 1 kilo-ohms resistor 1/2W

Q1: 2N2222 NPN transistor or similar

Q2: IRF530 power mosfet, or similar

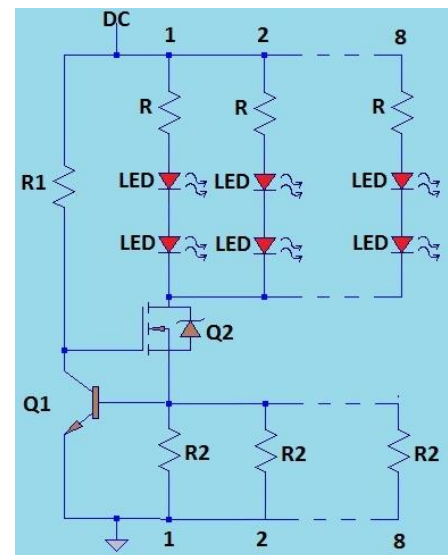
DC: 9V to 15V DC

LED POWER Watts	LED Current mA	R2(planned)		R2(actual)
		ohms	rating	
1	300	2.33	1/2W	2.5
	700	1	1W	
3	800	0.875	1W	parallel two 1.8 ohms
5	1200	0.583	1W	parallel two 1.2 ohms



Fra: <http://www.simple-electronics.com/2011/09/high-current-led-driver-using-fet.html>

Ovenstående kredsløb kan udvides således:

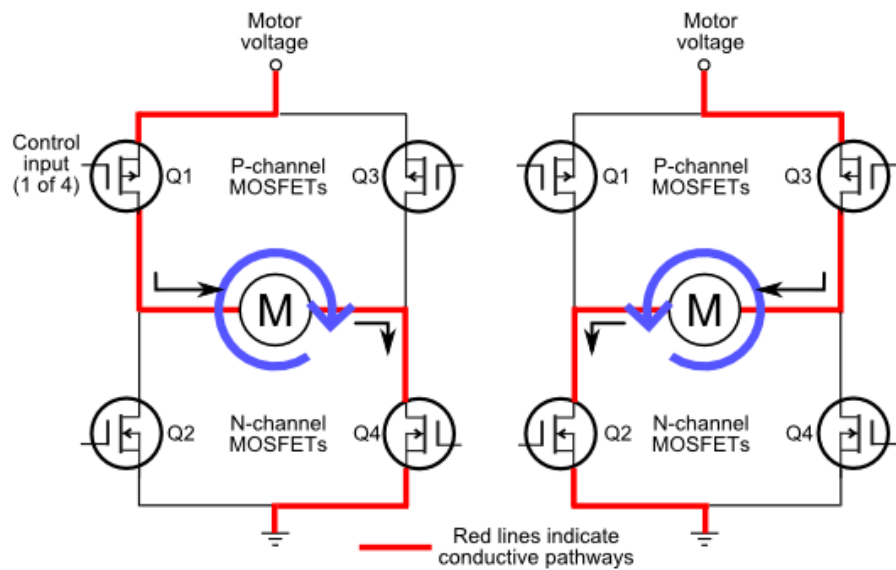


## "H-Bro" til motorstyring !

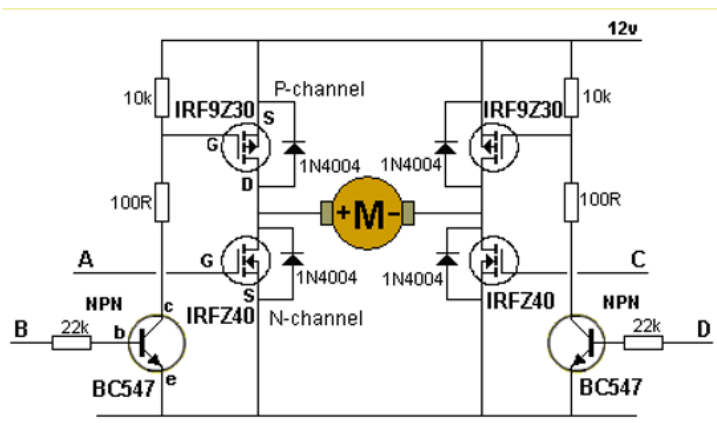


Skal man ha en 12 Volt motor til at kunne styres så den kan køre begge retninger, er man nødt til at bruge en såkaldt H-Bro.

Skematisk diagram.



<http://www.robotoid.com/my-first-robot/rbb-bot-phase2-part1.html>



Eksempel på et diagram:

Der er 4 styreindgange !!

I næste kredsløb er der kun 2

Fra: <http://www.talkingelectronics.com/projects/H-Bridge/H-Bridge-1.html>



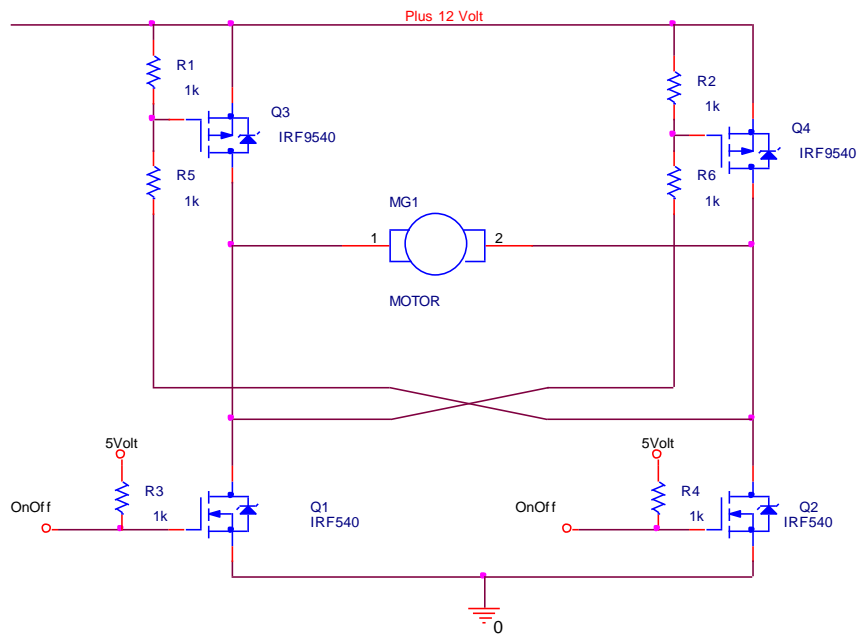


Bemærk, at det er absolut nødvendigt, at sørge for, at begge transistor-indgange, mærket med OnOff, ikke på noget tidspunkt er høje samtidig.

Sker det, vil der være en direkte kortslutning fra Plus 12 Volt til Stel.

Kredsløbet kan direkte styres af en uC, men så bør IRF540 nok erstattes af IRL540.

Obs: R3 og R4 skal ændres til Pull Down modstande.



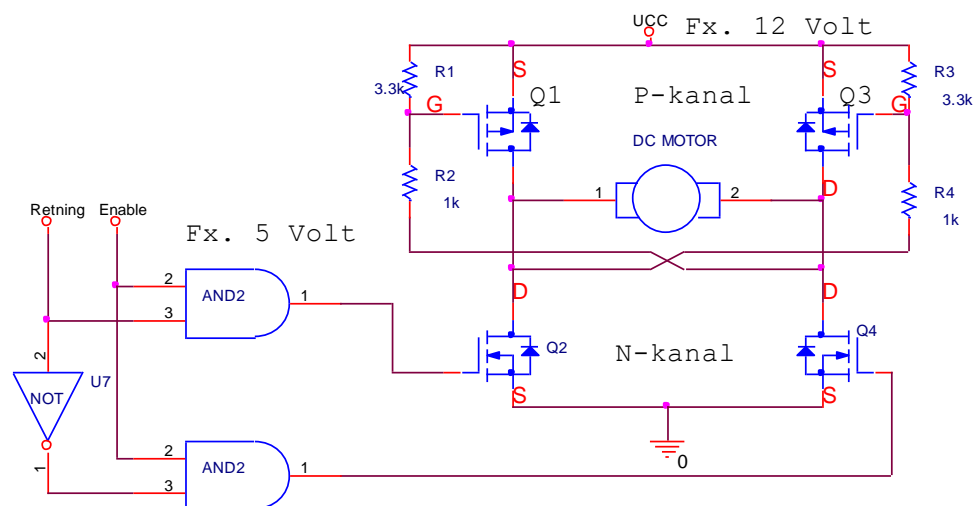
Obs: Det kan være en fordel at sætte lysdioder på parallelt over motoren, for at indikere, hvornår motoren kører. – husk også formodstand !!

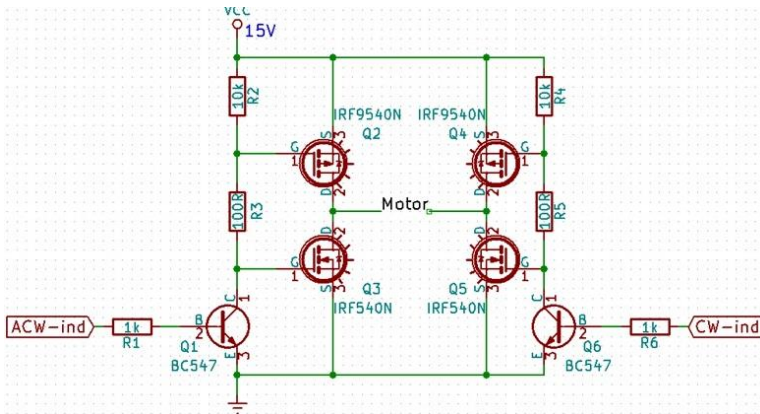
Obs.: Ved 6 Volt og 6 Volt motor:

$\Delta$ Ugs for IRF9540 bliver ikke stor nok ved 6 Volt. - Derfor skal R5 og R6 ændres til fx 120 Ohm.

## Motorstyring.

Her er kredsløbet forsynet med gates, der forhindrer, at der kan opstå kortslutning hvis alle 4 transistorer leder samtidig.





Her et andet kredsløb.

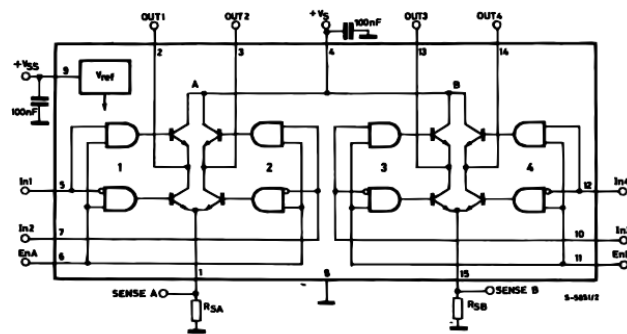
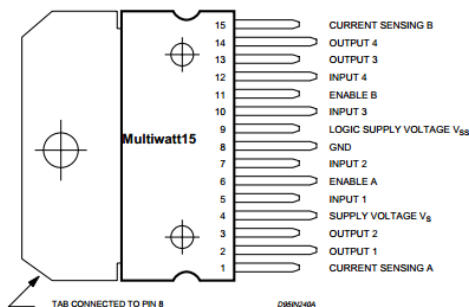
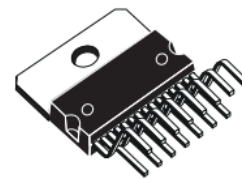
I erfagruppen på fjæseren siges, den er lidt langsom, måske fordi mosfetter er lidt langsomme til at slukke.

En H-bro kan også fås som integreret kredsløb.

Se: L298N

Undersøg kredsløbet!

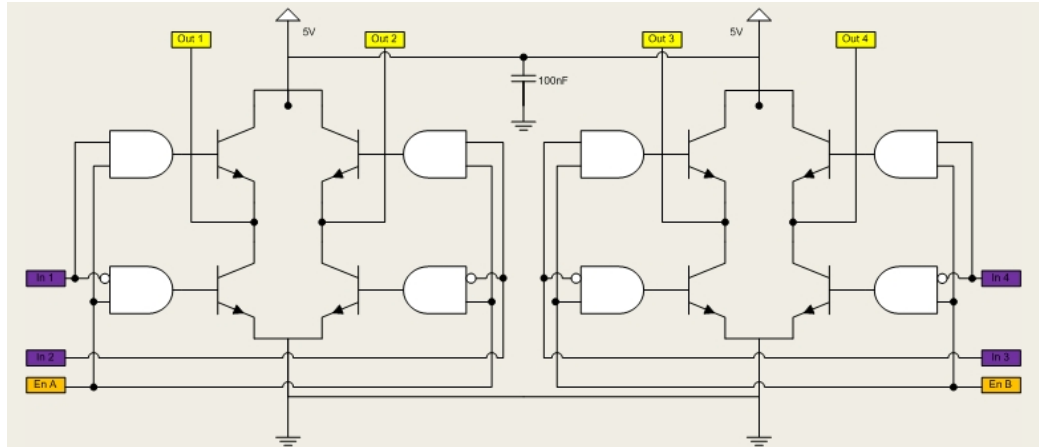
Der skal 5 Volt på ben 9 til at forsyne kredsens digitale dele. Men der må godt sættes 12 Volt på ben 4 til motoren!!



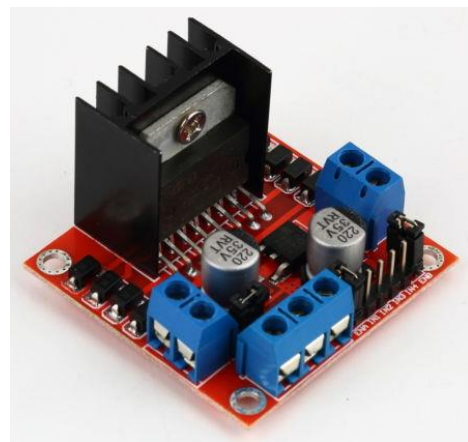
Forklar modstandene på ben 1 og 15 !!



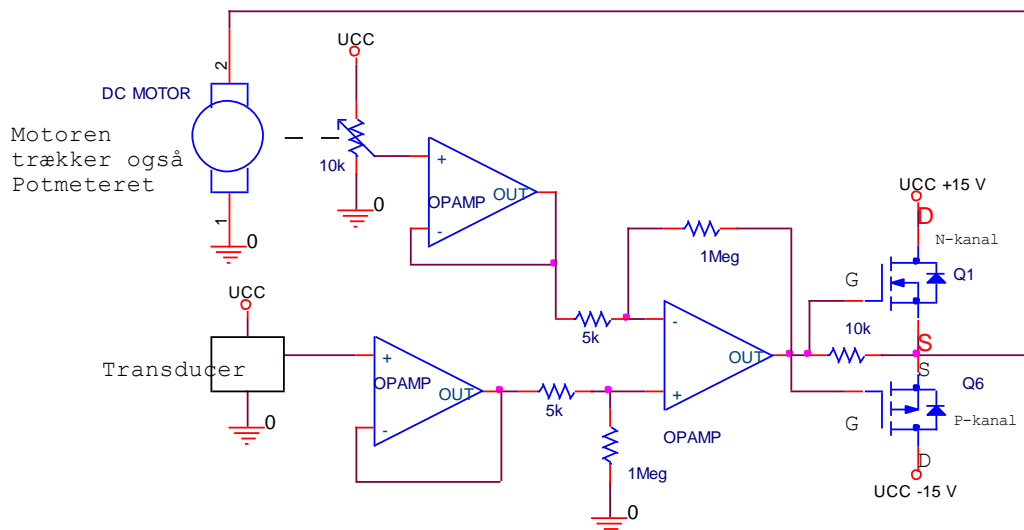
Her et principdiagram af indmaden i IC-en L298N



Her et eksempel på et kit til motorstyring.



## Eksempel på et servosystem:



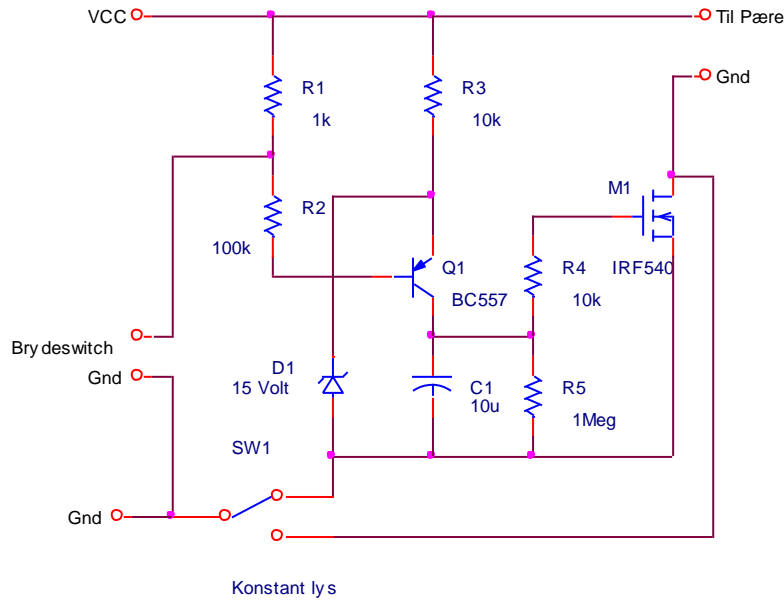
## Øvelse:

Der skal bygges et kredsløb, med en Powermos, en IRF 540, der kan lysdæmpe en forlygtepære til en bil.



Test også kredsløbet på en aktuator og en DC-motor

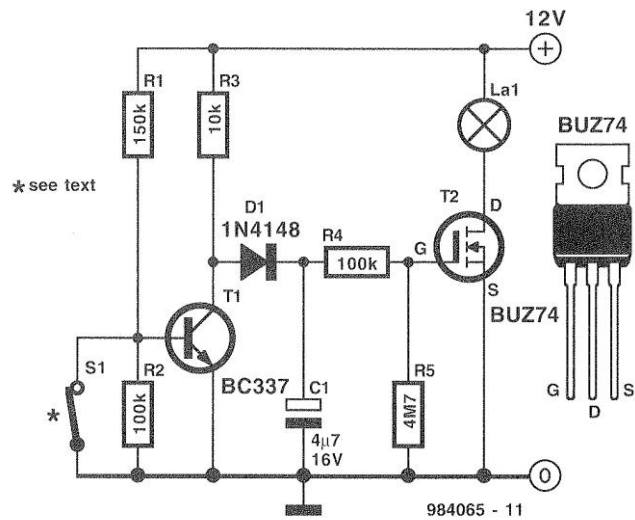
## Lidt forskellige kredsløb med MOSFet

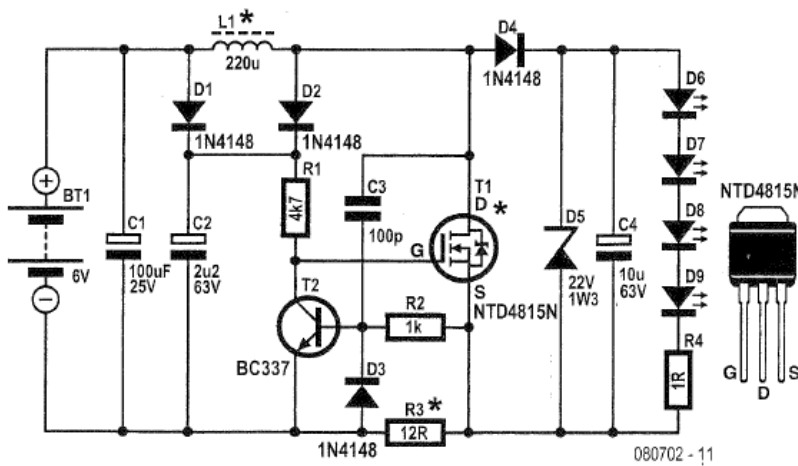


Kredsløb til at slukke kabinebelysningen i en bil efter en tid.

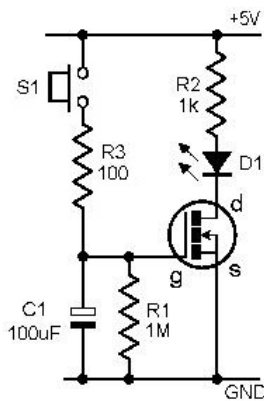
Undersøg kredsløbet!!

Kredsløbet er gaflet fra Elector.





Switch Mode regulator til lysdioder.



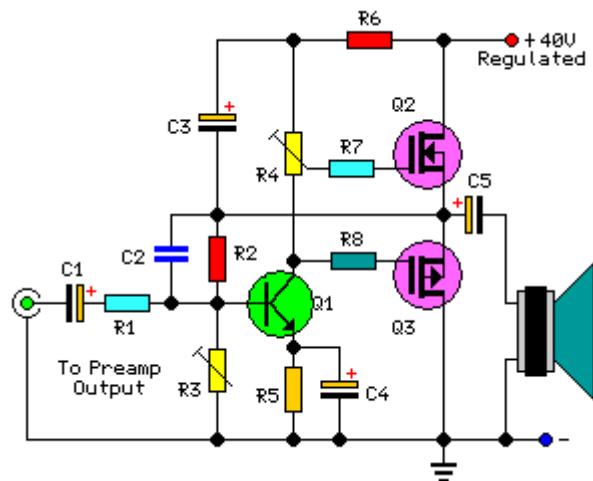
Trappeautomat?

Med et tryk på S1 tændes lysdioden i en periode.

Forklar !!

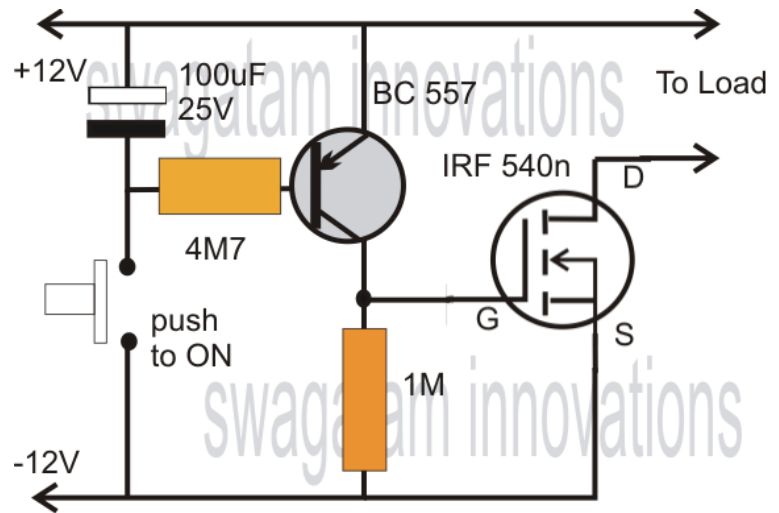
<http://www.learningelectronics.net/circuits/30-watt-audio-power-amplifier-schematic.html>

Audioforstærker med Mosfet

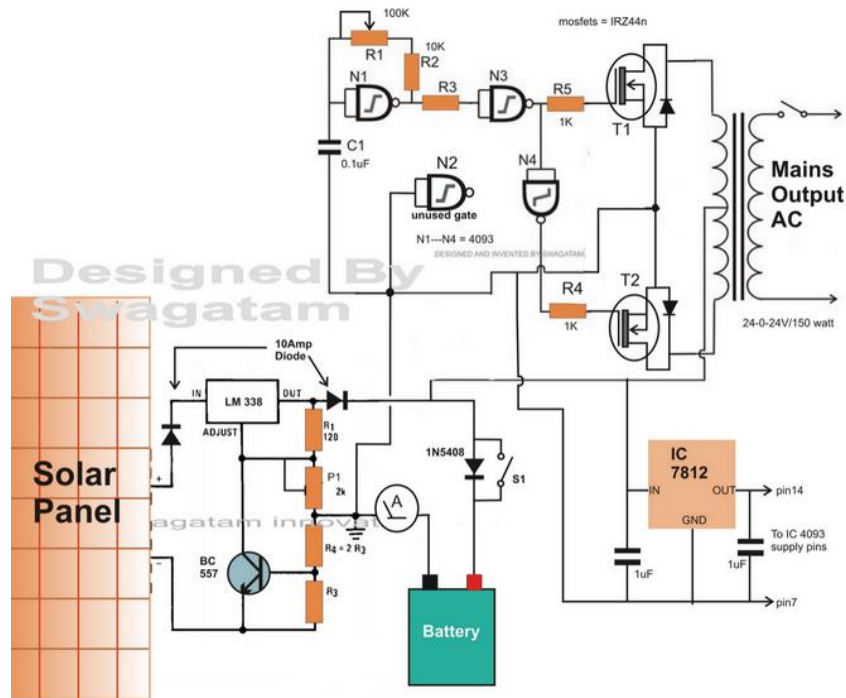




Forklar !!



Eksempel på et solcelle / batteri-poweret kredsløb der kan forvandle 12 V DC til 230 V AC.

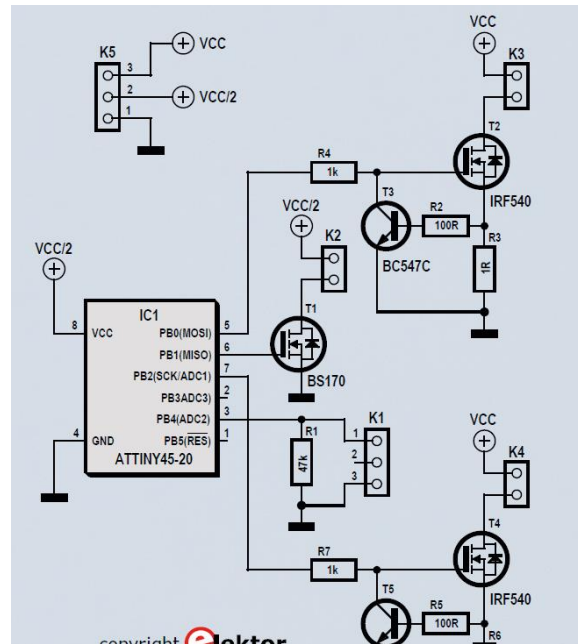


<http://homemadecircuitsandschematics.blogspot.dk/2012/02/how-to-make-solar-inverter-circuit.html>

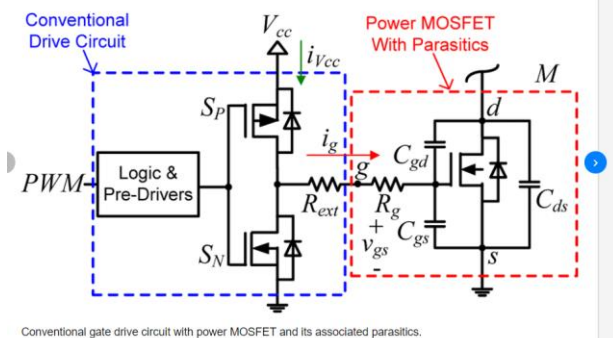


Fra: Elektor 2017-07 side 123

Hvordan kan man styre en P-kanal MOSFet, der fx skal bruges til at strømføde multiplexede 7-segmenter ?

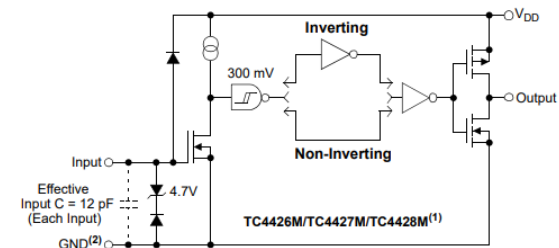


## Gate Driver IC



TC4427CPA, Dual Kanaler, MOSFET strøm-  
driver, 1.5A, 8 ben, PDIP Ikke-inverterende.

Blokdiagram:



Gate drive tab er jo frekvensafhængig. Der er tab både ved turn on, og turn off.

It is generally a good idea to include a gate resistor to avoid ringing. Ringing (parasitic oscillation) is caused by the gate capacitance in series with the connecting wire's inductance and can cause the transistor to dissipate excessive power because it doesn't turn on quickly enough and hence the current through drain/source in combination with the somewhat high-ish drain-source impedance will heat the device up. A low ohm resistor will solve (dampen) the ringing.

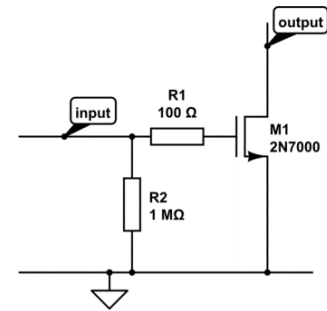


A high value resistor to ground is a good idea to avoid capacitive coupling driving the transistor when it is otherwise not connected.

A gate series resistor is recommended in most applications. The resistor limits the instantaneous current that is drawn when the FET is turned on. If you are driving a FET directly from a low-current device (microcontroller or logic gate) then gate resistors are recommended. Anywhere from 5 to 100 ohms is fine.

They also can be viewed as slew-rate limiting devices for the gate signal, or as devices to eliminate ringing at the gate.

If you are driving the FET from something like a dedicated half bridge driver or similar then they can be eliminated, the drivers are usually meant to be directly connected to the FET.



$$R_{gate} = \frac{V}{I} = \frac{3.3V}{20mA} = 165\Omega$$

Kilde: <https://electronics.stackexchange.com/questions/68748/question-about-mosfet-gate-resistor>  
<https://www.electro-tech-online.com/threads/does-a-mosfet-need-a-gate-resistor.87419/>

## Logic Level Gate Mosfet

Som det ses af de to Ugs-grafer herunder, kan det være svært at tænde en standard IRF540 med fx en udgang fra en Arduino. Man kan ikke regne med at Uout er 5 Volt. Måske kun 4 Volt.

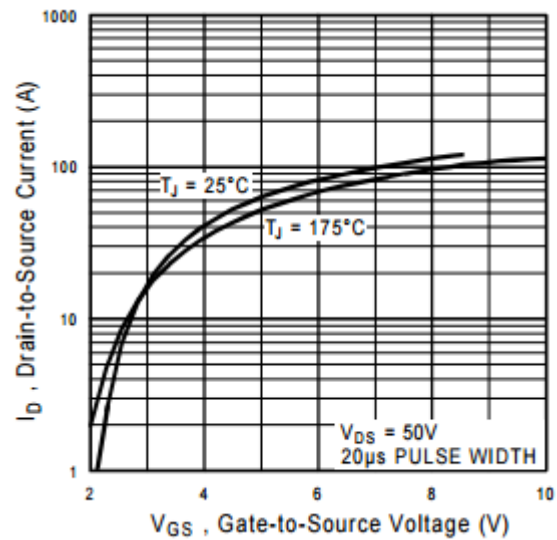
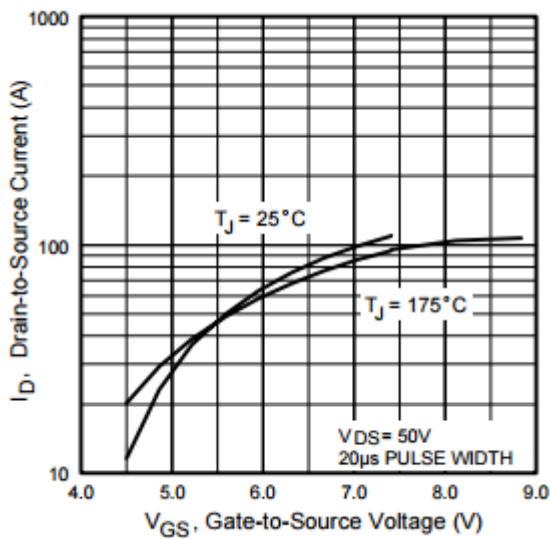
Derfor kan det være en fordel at vælge in Logic level Mosfet, der har en lavere treshold-spænding, Vt. Altså bliver det lettere direkte at styre mosfetten fra en processor.

Her er data opgivet ved 5 Volt.

### IRF540

### Logic gate FET IRL540N





Det ses tydeligt, at Logic Gate-typen har meget lavere  $U_{GS}$  on spænding.

Det ser også ud til, at modstanden  $R_{DS}$  on er lavere ved en højere gate-spænding !!

		Min	Max		
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.044	$\Omega$
		—	—	0.053	
		—	—	0.063	
				$V_{GS} = 10V, I_D = 18A \text{ \textcircled{A}}$	
				$V_{GS} = 5.0V, I_D = 18A \text{ \textcircled{A}}$	
				$V_{GS} = 4.0V, I_D = 15A \text{ \textcircled{A}}$	

## Samlet:

### Logic Level Gate MosFet.

Fordelen ved at bruge såkaldte Logic Level Gate Mosfets er, at de starter med at lede ved en lav  $V_{GS}$ .

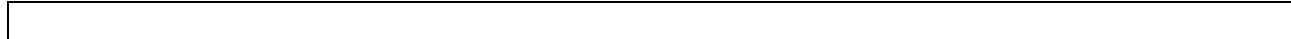
Men ulempen er, at de har tendens til at have højere gate-kapacitet og gateladning. Dvs. der skal større ladning til at switche on **ved samme gatestrøm**. ??

Herudover har de højere ON-modstand ( $R_{DS-on}$ ) – og kan tåle en lavere maksimal Drain-spænding  $V_{DS}$  end standard MOSFETs.

### Fordelen ved Bipolar transistorer i forhold til MOSFETs

Bipolære transistorer er hurtigere end MOSFETs. Ved højere frekvenser kan den energi, der skal til at switche MOSFETs blive større end ved at bruge Bipolære transistorer.

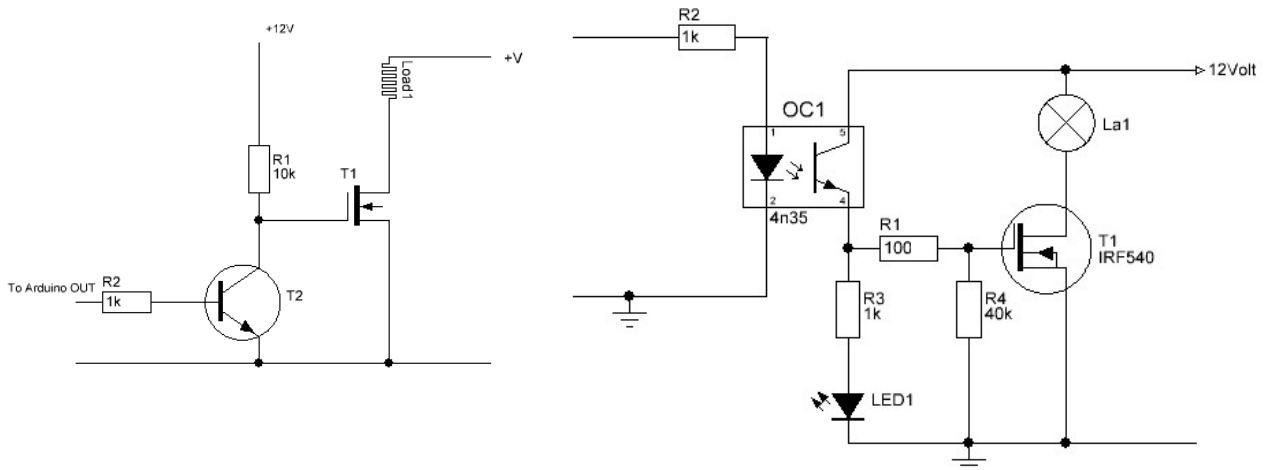
Mosfets er gode i digitale kredsløb, fordi i de har meget lille læk-strøm både ved logisk 0 og 1.



<http://www.edaboard.com/thread236378.html>

Og: <https://www.electro-tech-online.com/threads/logic-level-vs-normal-mosfets.91756/>

Hvis en Arduino ikke kan styre en MOSFET on, - kan følgende diagrammer overvejes!!



<https://arduino diy.wordpress.com/2012/05/02/using-mosfets-with-ttl-levels/>

YouTube der samler op: ( starter mærkeligt ) 7:45 [her](#):

Jeg har fundet en oversigt over forskellige International Rectifier typer: Om oplysningerne er korrekte, ved jeg ikke!!

Type	
IRF:	Alle "Standardtransistorer", også TO-220-huse
IRFB	Højspændings-MosFETs
IRFD	MosFETs i Dip-4-huse
IRFI	MosFETs i isolerede TO-220-huse
IRFP	MosFETs i TO-247AC-huse
IRFR	MosFETs i D-Pak ( " ret store " SMD-huse)



IRFU	MosFETs i I-Pak, som TO-220 men med en kort kølefane
IRFZ	? alle med ca. 50-60V og med relative lav Rds(on), altså for mellem-belastninger.
IRG	Vist nok IGBTs
IRL	Logic-Level MosFETs
IRLD	Logic-Level MosFETs i Dip-4 hus
IRLI	Logic-Level MosFETs i isoleret TO-220-hus
IRLR	Logic-Level MosFETs i D-Pak
IRLU	Logic-Level MosFETs i I-Pak, som TO-220 men med kort kølefane

Alt der ender på "S" har en D<sup>2</sup>Pak-hus  
Alt, der ender på "N" er en nyere version af en FET

Fra: <http://www.mikrocontroller.net/topic/44331>

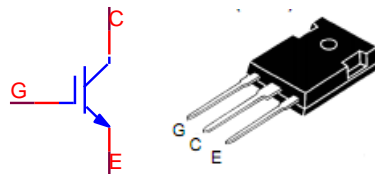
**IGBT**, Isolated Gate Bipolar Transistor

Se: <https://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html>

En IGBT-transistor er en blanding af de to typer. Der er en MOSFET i indgangen, og en almindelig bipolar transistor i udgangen. Dvs. en transistor med Collector, Emmitter og Gate. Altså en spændingsstyret alm. Transistor.

Diagramsymbolet:

ORCAD !! IXGH40N60.

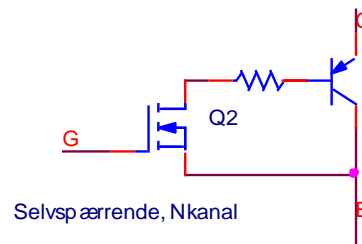


<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/125935/IXYS/IXGH40N60.html>

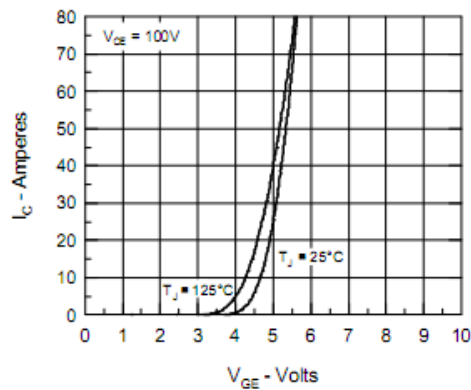


Opbygningen på chippen er som flg:

Kan switche 75 A.

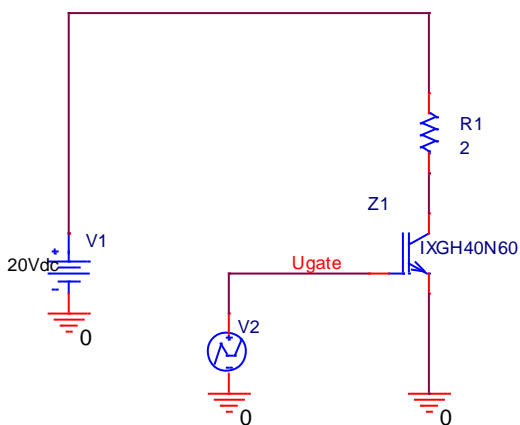


Undersøg databladet!



Se youTube: 7:00:

[https://www.youtube.com/watch?v=RxRJW09A\\_XA&ab\\_channel=GreatScott%21](https://www.youtube.com/watch?v=RxRJW09A_XA&ab_channel=GreatScott%21)



Opbyg et kredsløb med en IGBT.

Undersøg  $V_p$  for transistoren.

Undersøg  $\Delta U_{CE}$

Lad  $U_{gate}$  være konstant 5 Volt, og undersøg  $\Delta U_{CE}$  som funktion af  $I_C$ .

IGBT-moduler til store strømme fås fx i sådanne moduler





## Søg IGBT hos Cypax

Delta  $U_{CE} \sim 1$  Volt.  $R_{on}$  effektiv er mindre end for MOSFET. ???

$I_C/I_G > 10^9$

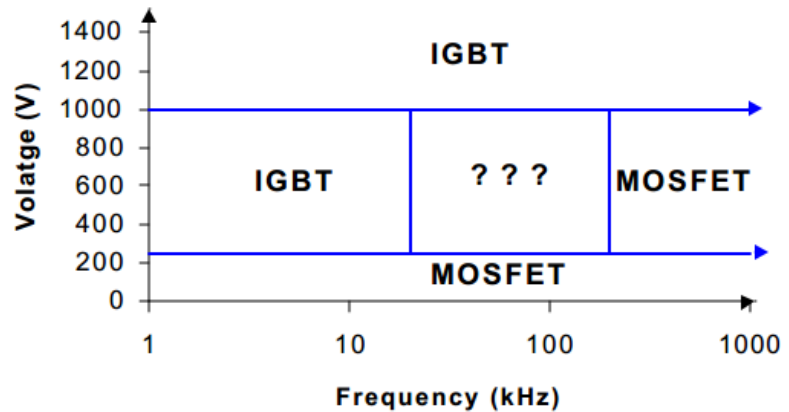
IGBT's fås til fx 1000 Volt og 300 A. Switchning kan udføres op til  $F_{\text{øvre}} \sim 20$  KHz. ??

Eks. Siemens, BUP 304, 1000 V 25 A

$U_{GS \text{ on}} \sim 2$  til 5 Volt.

Fordele ved Mosfet vs. IGBT

Tilføj fra siden:



<http://www.irf.com/technical-info/whitepaper/choosewisely.pdf>

Se video: [https://www.youtube.com/watch?v=RxRJW09A\\_XA](https://www.youtube.com/watch?v=RxRJW09A_XA) ( 7:00 )

Se: <http://www.electronics-tutorials.ws/blog/insulated-gate-bipolar-transistor.html>

Se YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=3HDzqDZaprE>



Sammenligningstabel:

Device Characteristic	Power Bipolar	Power MOSFET	IGBT
Voltage Rating	High <1kV	High <1kV	Very High >1kV
Current Rating	High <500A	Low <200A	High >500A
Input Drive	Current, $h_{FE}$ 20-200	Voltage, $V_{GS}$ 3-10V	Voltage, $V_{GE}$ 4-8V
Input Impedance	Low	High	High
Output Impedance	Low	Medium	Low
Switching Speed	Slow ( $\mu$ S)	Fast (nS)	Medium
Cost	Low	Medium	High

Fra: <http://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html>