



## FET transistorer Generelt.

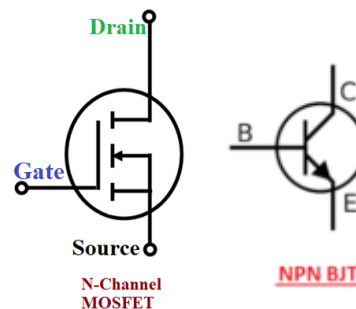
Fet-transistorer er opbygget helt anderledes end bipolar transistorerne. Her er det ikke en basisstrøm, der styrer ledeevnen gennem transistoren, men et *elektrisk felt*.

Dvs. der blot skal en spænding på indgangen, der her kaldes ”**Gate**”. Altså opstår der et elektrisk felt inde i transistoren, ligesom mellem pladerne i en kondensator. Og det er dette felt, der får transistoren til at lede !!

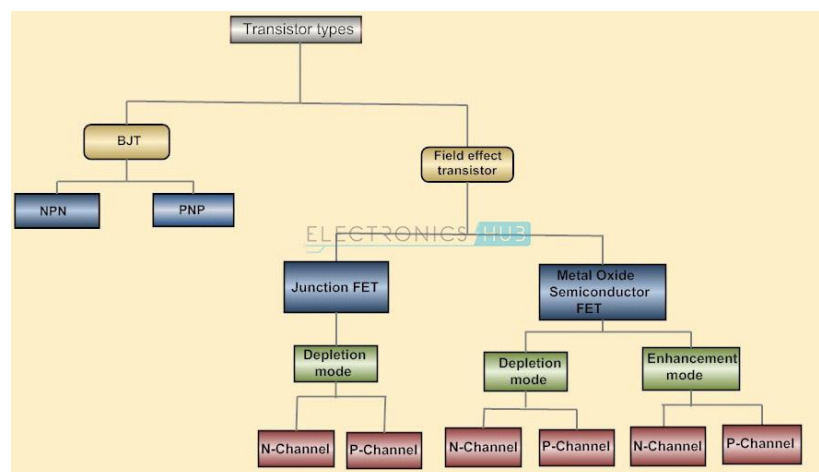
Heraf navnet, **F**ield **E**ffect **T**ransistorer.

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

Gate, Drain og Source.



Her er et billede af ” transistor-familietræet ”



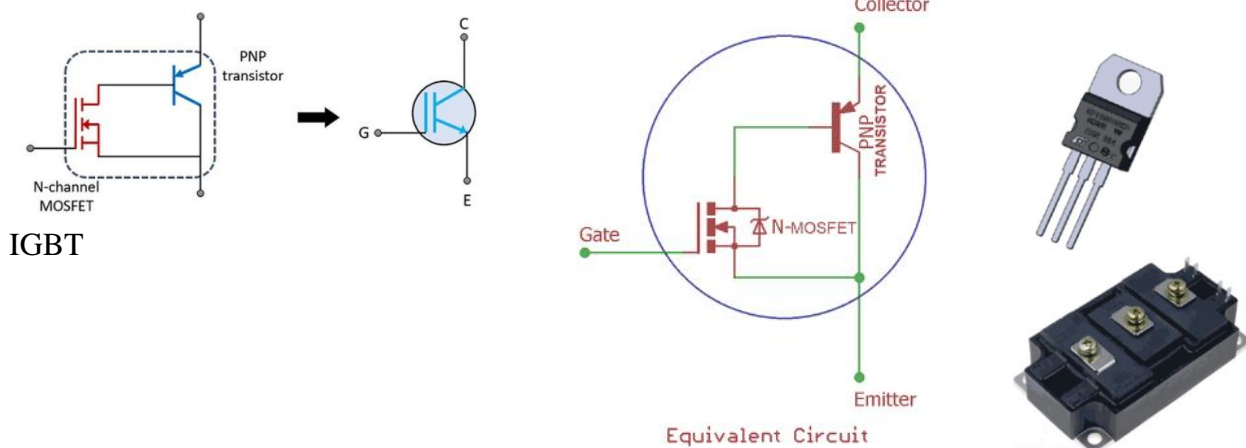
Kilde: <https://www.electronicshub.org/transistors-classification-and-types/>

De vi skal arbejde med her er Metal Oxide Semiconductor FET Enhancement mode, ( selvspærrrende ).

Eller kort, bare MOSFET.

Men så er familietræet dog ikke komplet. Der er i de senere år fremkommet en kombination af Mosfetter og bipolare transistorer. De kaldes IGBT'er. Det står for Isolated Gate Bipolar Transistor.

De ser ud som flg.



Her vil vi kun se på MOSFET, og vi vil bruge dem til at switche ” store strømme ”: Derfor kalder vi dem:

## PowerMOS

Mosfets beregnet til store strømme kom allerede på markedet ultimo 1970'erne. De er optimeret for store strømme.

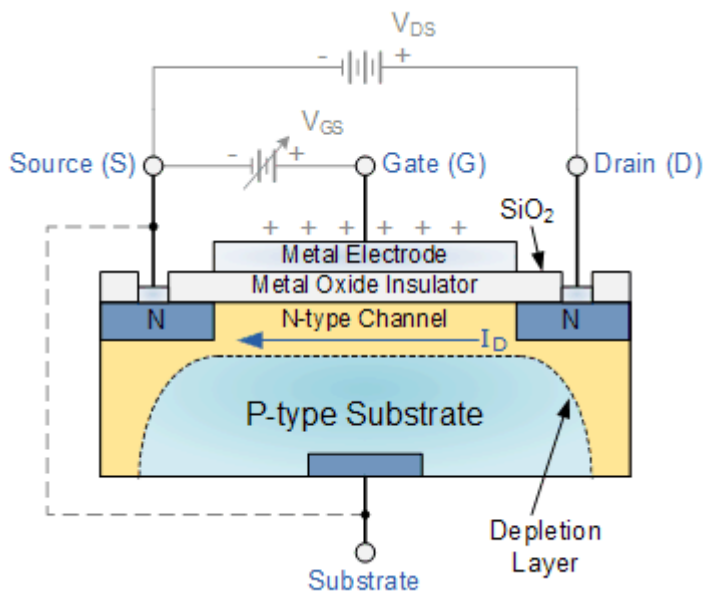
Forskellige firmaer har forsøgt at optimeret deres MOSFET transistorer ved at lave forskellige udformning af chippen:

Her en oversigt over forskellige firmaer, og eksempler på de navne, de giver deres POWERMOS chips.

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-salgsnavne som fx:

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



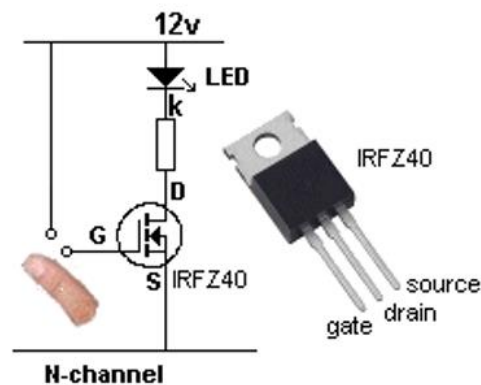
PowerMOS har en isolerende lag Metal Oxid mellem Gaten og selve transistoren.

Derfor har den en meget stor indgangsimpedans. Op imod  $10^{12}$  Ohm.

Når spændingen på Gaten i forhold til Source kommer over en tærskelværdi på ca. 3 Volt, bliver N-kanalen ledende.

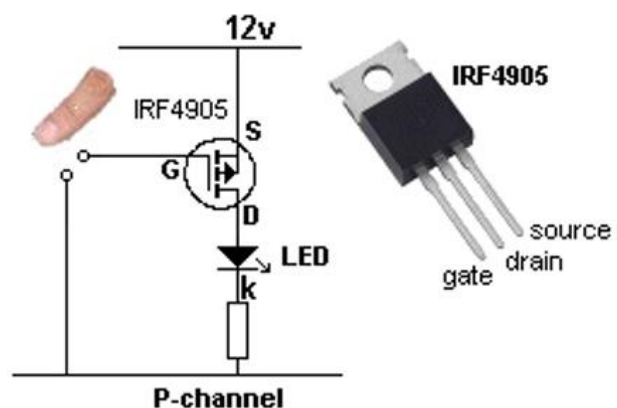
Fordi indgangsmodstanden i Gaten er så stor, og fordi Gaten udgør en lille kondensator både i forhold til Drain og Source kan man – som vist på dette billede – styre en transistor ”ON” bare ved den lille strøm, der går gennem en finger.

Og transistoren forbliver ”ON” indtil ladningerne fjernes igen. Fx ved at gaten forbindes til GND ( Source ), enten direkte, eller gennem en finger.



Ligesom i de ” almindelige ” transistorer, hvor der både er NPN og PNP-udgaver, findes der to udgaver af PowerMOS.

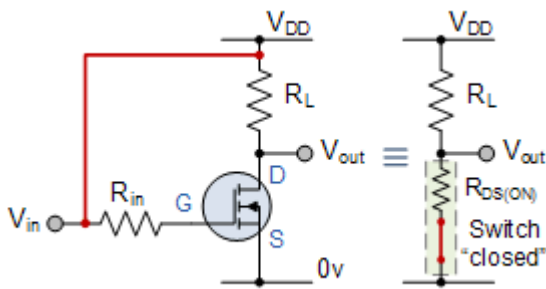
Her er vist en P-kanal, og hvordan den forbindes !.



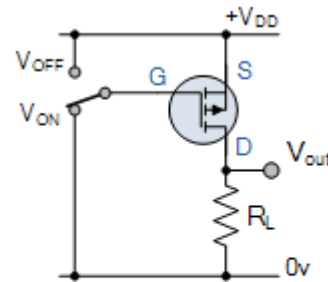
<http://www.audiokarma.org/forums/showthread.php?t=453275&page=9>



De to typer er også vist her: Bemærk strømretningen, og placeringen af belastningen.



N-Kanal



P-channel  
MOSFET Switch

P-Kanal

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

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

## MOSFET

For MOSFET's ( **M**etal **O**xid **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor ) gælder, at gaten er totalt isoleret fra halvlederkrystallet med en tynd metal-oxid-film. De kaldes også for "Isoleret Gate FET".

Dette giver en meget høj indgangsmotstand  $R_i$  på 10 til 100 TerraOhm.

Men hermed følger desværre også problemer med følsomhed overfor statisk elektricitet.

Det er fordi gatens isolering til 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, så transistoren ødelægges.

Mosfet's bruges både til småsignal forstærkere hvor stor indgangsmotstand,  $R_i$  ønskes. Og til **SWITCH-formål**, både for småsignaler og til meget store strømme.

MOSFet til store strømme kaldes 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 evt. en animation af, hvordan elektronerne flyder i MOSFet'en [her](#): fra 2:50 til 7:42:

Når transistoren er ”ON” – dvs. leder, - er det fordi modstanden mellem Drain og Source  $R_{DS}$ , 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  $P = I^2 \cdot R [W]$

Tjek lige  $R_{DSon}$  for IRF540 og IRL540

For Power-MOSFET'er 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.

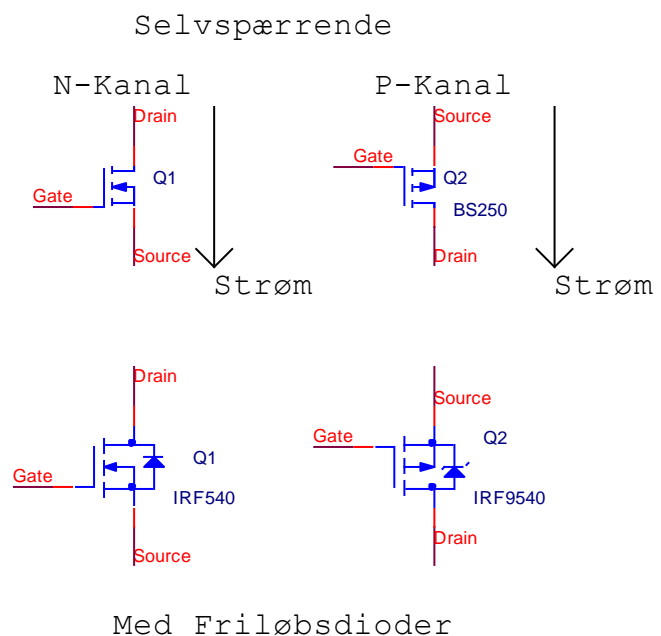
Og der er tilstræbt at transistoren kan modstå meget høje Drain-spændinger – i Off-tilstand.

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

Til højre ses diagramsymbolerne for MOSFET.

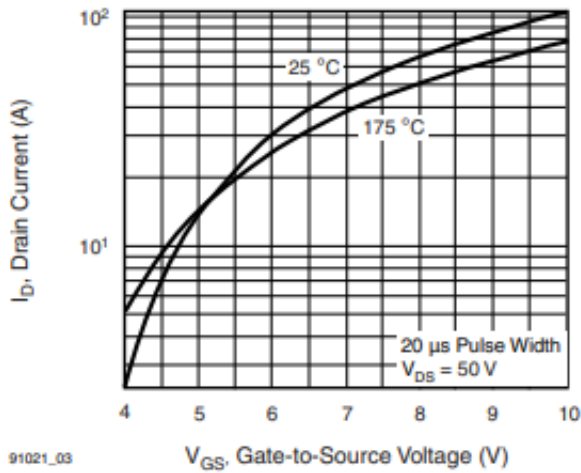
I venstre side N-kanal, og i højre side P-kanal.

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

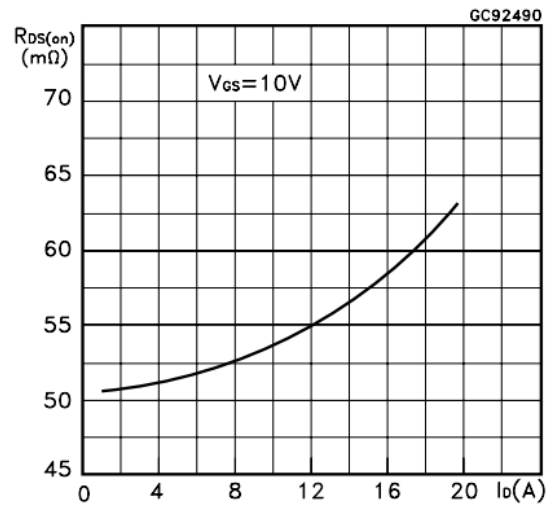


Den Mosfet, vi typisk bruger, er IRF540.  
Se datablad for den fx [her](#):

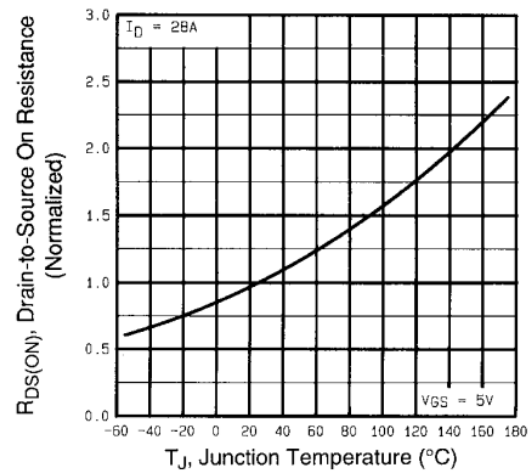
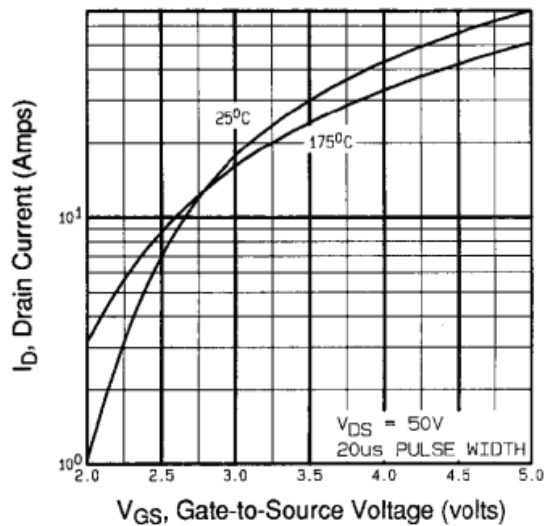
Her er der et par grafer. Først for IRF540



Static Drain-source On Resistance



For IRL540



$R_{DS(on)}$

## Gatespænding vs. Strømforhold:

Kommer gatespændingen over en værdi, kaldet  $U_{gs\ \text{treshold}}$ , begynder transistoren at lede fra Drain til Source.

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

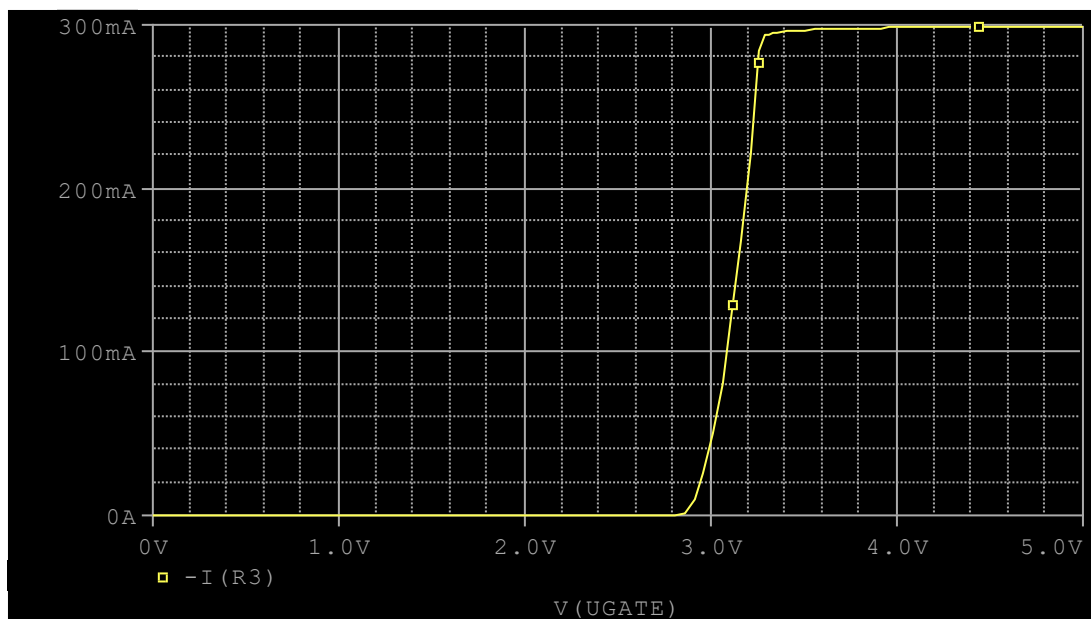
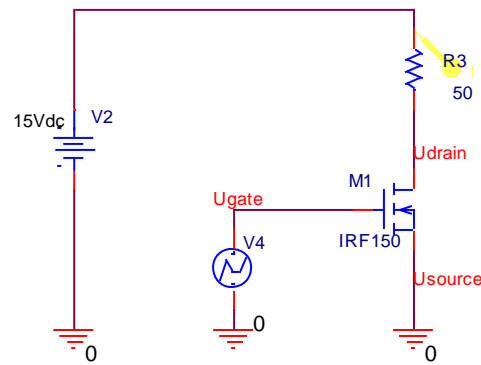


Et eksempel på ORCAD-simulering.

Der er brugt en IRF150.

Gatespændingen ændres lineært fra 0 til 5 Volt.

Der måles på strømmen i Drain.



Bemærk, ud ad X-aksen er Gatespændingen, Ugs.

## OBS:

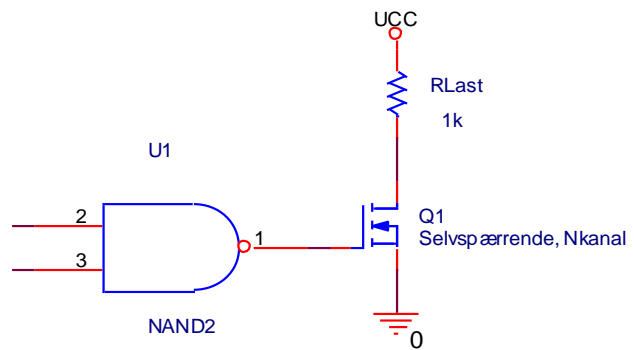
Mosfets er meget følsom overfor statisk elektricitet. Derfor bør de opbevares i ledende poser, i ledende skum eller lignende. Dvs. der ikke kan være et sted på transistoren, der har et andet potentiale en de andre!

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

## Kredsløbseksempler med MOSFET's



Mosfet anvendt som switch.



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.

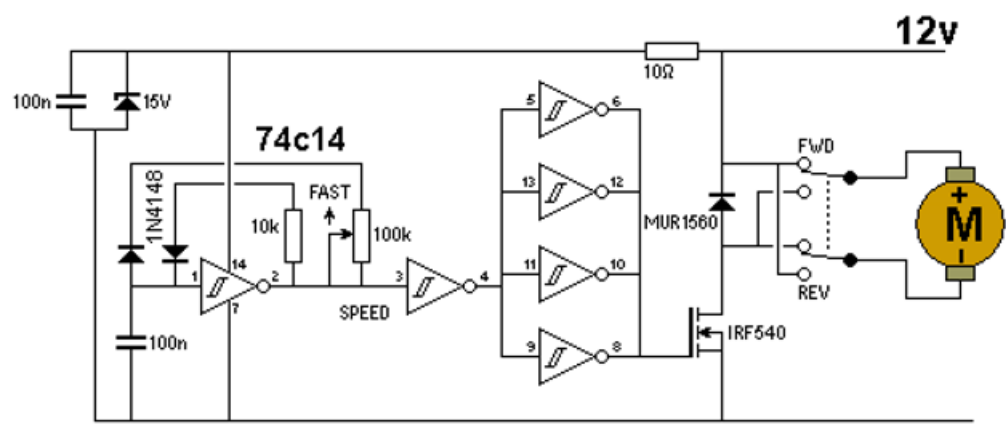
Jo lavere  $R_{ds\ on}$  jo mindre varme afsættes når der løber strøm.  $P = I^2 \cdot R$

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 også ved stigende transistor-temperatur.

Her er vist et eksempel på en bore-skrue-maskine kontroller.



Vha. en gate – her en 74C14 er der lavet en oscillator, hvor man vha. et potmeter kan justere på duty cyclen. Faktisk en simpel Puls Bredde Modulator.

Og så er der brugt 4 invertere som Gatedriver. Hvorfor det mon ??

## 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 dutycycle.

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

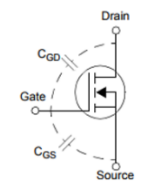
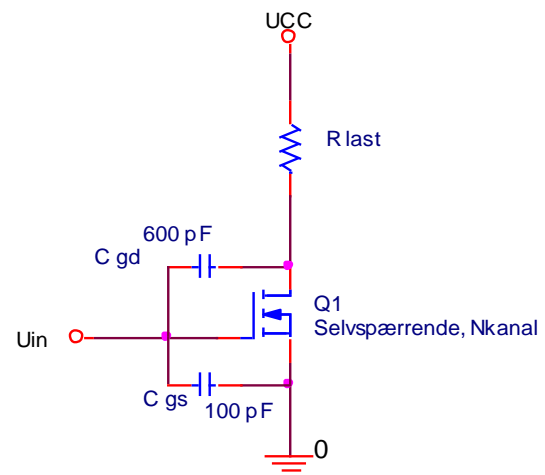
Det vil altså sige, at for at ændre spænding på gaten skal kapaciteterne lades op / af.

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 modstanden mellem Drain og Source også ændres ” ret langsomt ”.

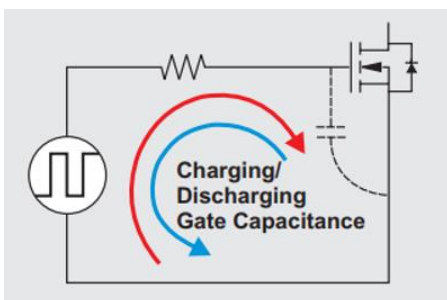
Og derfor vil strømmen  $I_{DS}$  jo heller ikke ændre sig momentant. Det tager lidt tid.

Og hvis transistoren fx er ” Halvt On ” er der jo en spænding over den – og der løber en strøm.



Altså bliver der afsat en del varme i form af  $\Delta U_{DS} \cdot I_{DS}$  imens transistoren er ved at switche 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 lige i switche-øjeblikket. Også selvom Gatens Indgangsmodstand nærmest er uendelig .



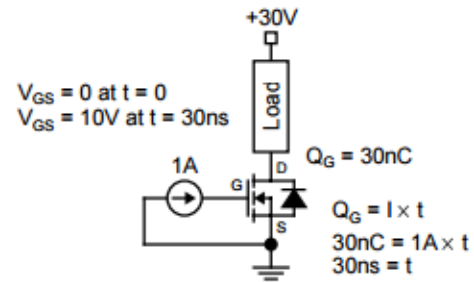
Men gatestrømmen er jo begrænset af udgangsmodstanden i driverkredsløbet.

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  $\mu$ S at switche ON. Eller tage 20 nS ved 1A gatestrøm !.

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

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  $(U \times C) / I$ .

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  $\mu$ S.



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 5 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 uController kan typisk kun levere fra få mA 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/>

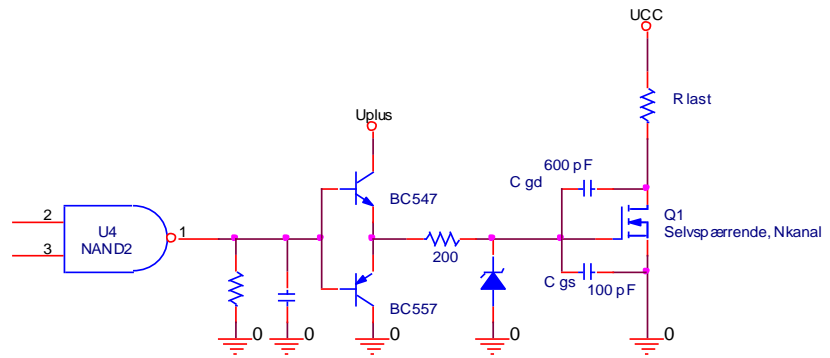
## **Gate driverkredsløb**

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

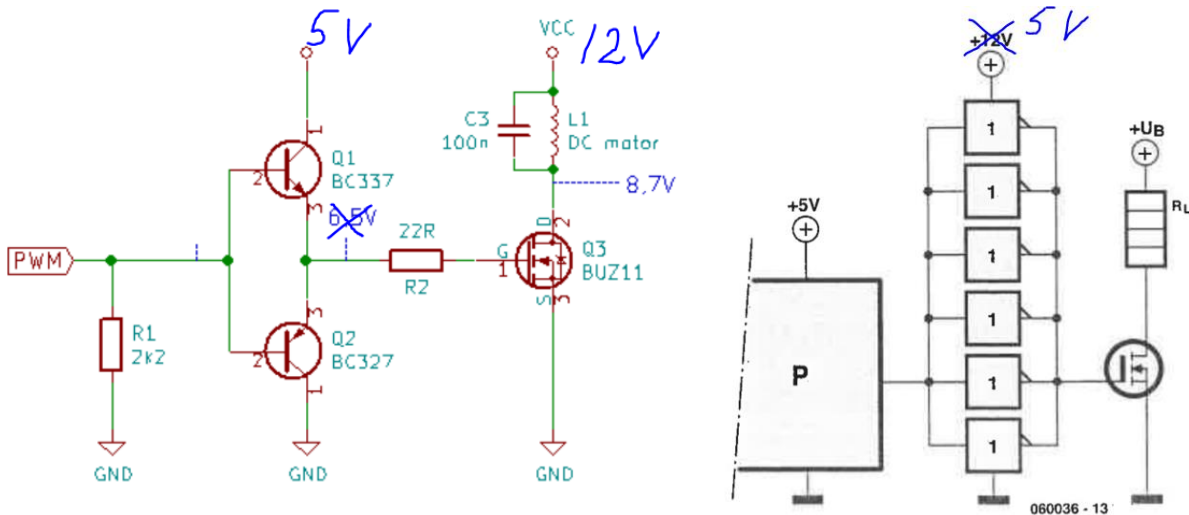


Modstanden på 200 Ohm – kan være mindre, fx 100 Ohm Den skal begrænse strømmen ind ud af driveren, idet en kondensator vil optræde som en kortslutning lige når driveren bliver høj.

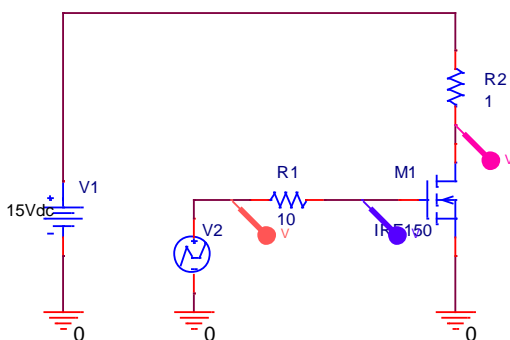
Og forhindre ringning !!



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



Gatene til højre er såkaldte buffere. HEF4049 eller 4050. De kan håndtere lidt større strøm, source ca. 4 mA og sink ca. 16 mA hver. ??



## 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

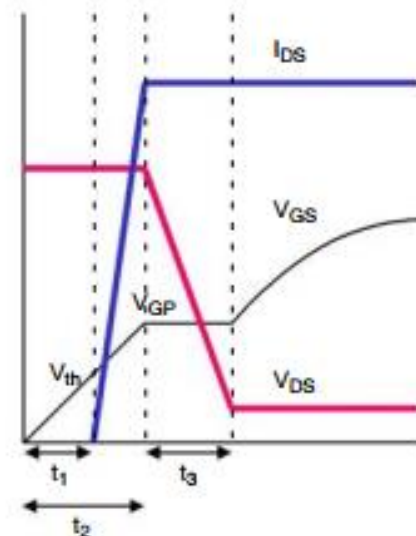
Ved switching af en Mosfet skal gaten gøres høj, ( og kort efter lav igen ).

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.

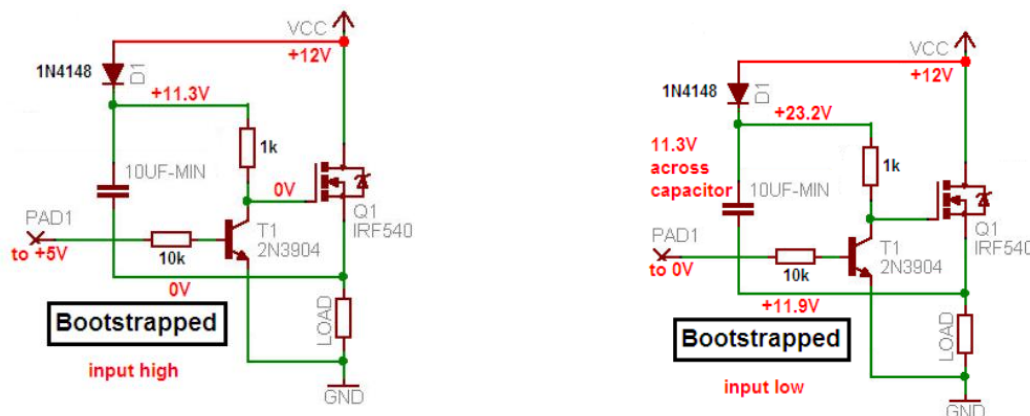
Altså vil gatespændingen teoretisk se ud som her til højre !!



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 disse kredsløb. Der kan bruges en BC547 eller BD337 i stedet for 2N3904.



Bemærk: Her er belastningen sat ned under source.

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

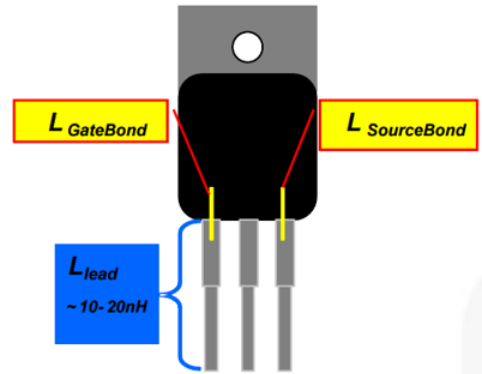
## Induktionsproblemer



Ydermere opstår der problemer fordi en ledning jo også virker 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 blive genereret en spænding:

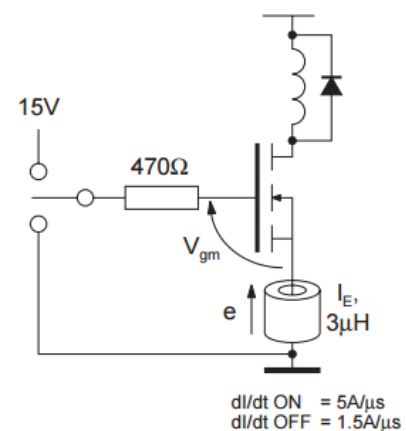
$$U_L = -L \frac{di}{dt}$$

Eksempel:

En ledning har en selvinduktion på 50 nH.

En strøm på 60 Ampere switches i løbet af 25 n[sek.]:

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



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 fra 6 til 10 nH pr cm.

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



På nettet findes et hav af kalkulatorer.

Her et par eksempler:

**Flat Wire Inductance Calculator**

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

Enter the Length:  cm  
Enter the Width:  cm Inductance:  nH  
Enter the Thickness:  mm

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

EEWeb Wire Self Inductance Calculator

Choose Type

- Wire
- Parallel Wires
- Coax
- Wire over Plane
- Loop
- Rectangle Loop
- Coil

Wire Self Inductance Calculator

Inputs

Diameter of Wire D  mm  
Length of Wire L  cm

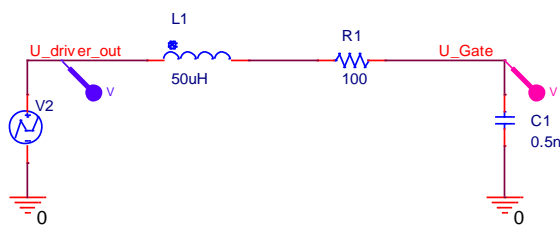
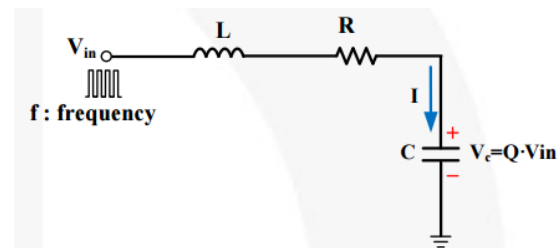
Outputs

Wire Self Inductance: 17.9 nH

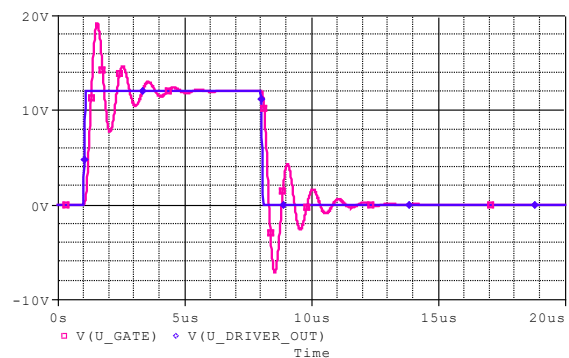
<https://www.eeweb.com/tools/wire-self-inductance-calculator/>

Her en anden.

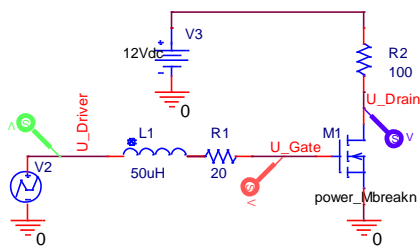
Eksempel på virkningen af en induktion i Gate-tilledningen:



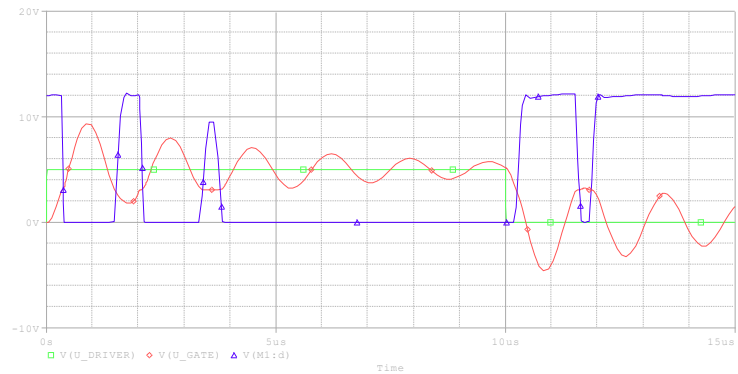
Der opstår "ringning".



I næste eksempel er vist, hvor galt det kan gå!! På grund af ringningen bliver MOSFET'en fejlagtig styret On og Off flere gange.



Grafen:

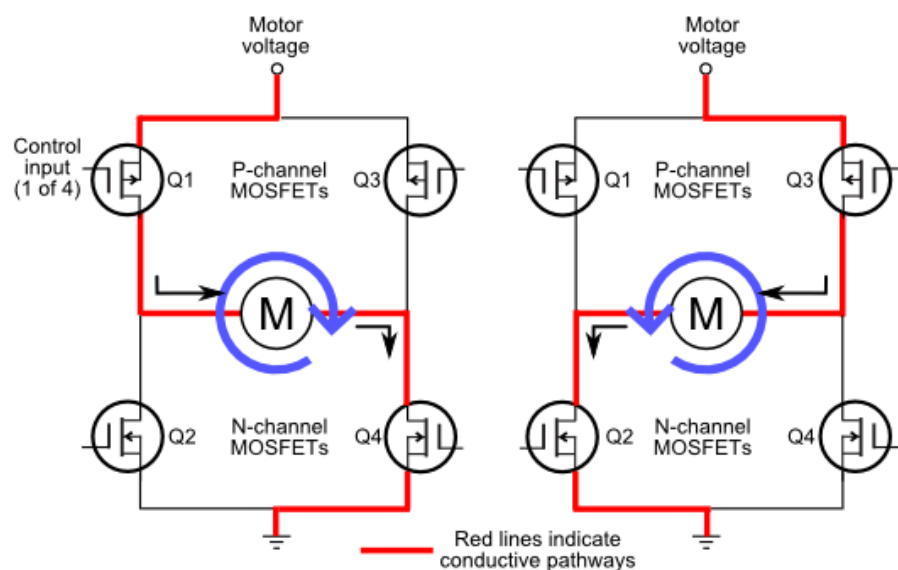


## ”H-Bro” til motorstyring !

Skal man kontrollere en 12 Volt motor så den kan køre begge veje, er man nødt til at bruge en såkaldt **H-Bro**.

Her er vist et Skematisk diagram.

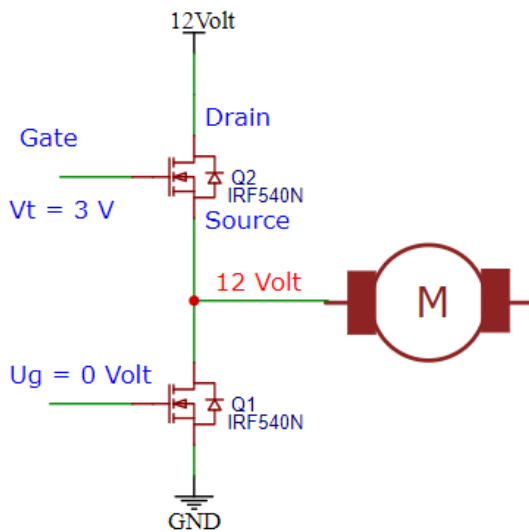
Løber strømmen gennem motoren den ene vej, drejer motoren den ene vej,  
Løber strømmen modsat, drejer motoren også modsat.



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

Her har vi to transistorerer, én i bunden, der kan styres direkte af en uC. Og én i toppen, direkte til 12 Volt.





Her er kun vist den ene halvdel af H-Broen:

Den nederste transistor, Q1 kan styres direkte af en uC. Dens Treshold-spænding er ca. 3 Volt.

Vi Antager, at den nederste transistor, Q1, er Off, og at vi ønsker at switche Q2 On.

Motoren skal ha 12 Volt. ( på venstre side )

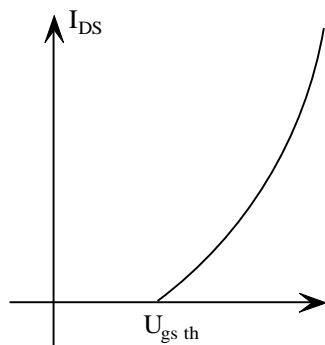
Q2's Tærskelspænding er også ca. 3 Volt.

Så for at Q2's kan gå "ON", må dens gate-spænding mindst være 3 Volt højere end dens Source. Dvs.  $12 + 3 = 15$  Volt.

Er den højeste spænding, vi har i kredsløbet = 12 Volt, har vi et problem !!  
Og næste problem er jo, at uC-ens udgang højst er 5 Volt.

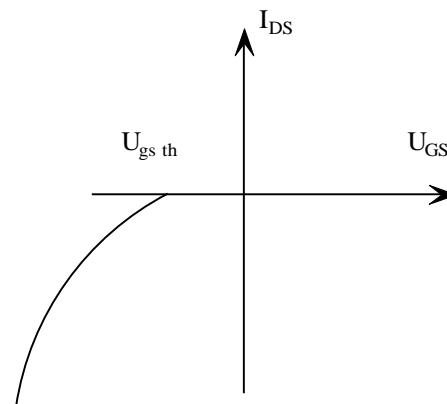
Derfor er vi nødt til at bruge en anden type transistor som Q2 øverst.

## Grafer for transistorernes lede-egenskaber.



N-kanal

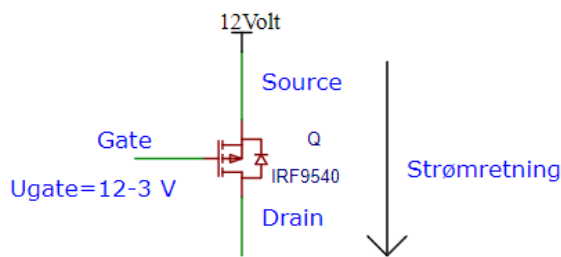
Eks: IRF540



P-kanal

Eks: IRF9540

N-Kanal transistoren har vi brugt. Dens Gate-Source-spænding skal være positiv.



P-Kanal transistoren virker modsat. Her skal gatespændingen være negativ i forhold til dens Source, for at den leder.

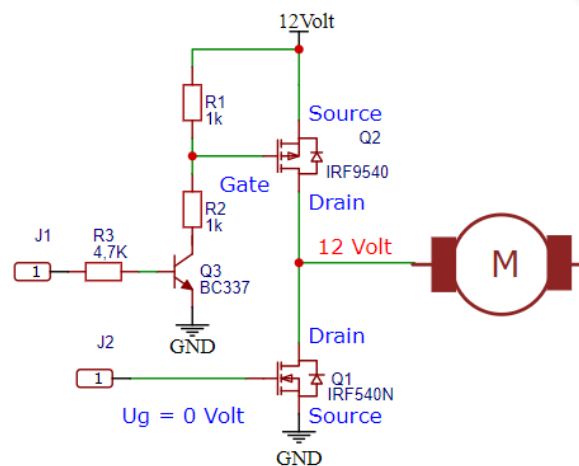
Men dens Gatespænding skal jo være oppe på 12 Volt, for at dens  $U_{\text{Gate-Source}}$  er 0 volt, når den skal spærre.

Så det kan ikke umiddelbart styres af en uC.

Men ved at tilføje endnu en transistor, en "almindelig" BC337, kan det klares.

Når Connectoren J1 er 0 Volt, er Q3 Off, og leder ikke til Gnd. Herved er Q2's Gate forbundet "direkte" til 12 V, og spærres.

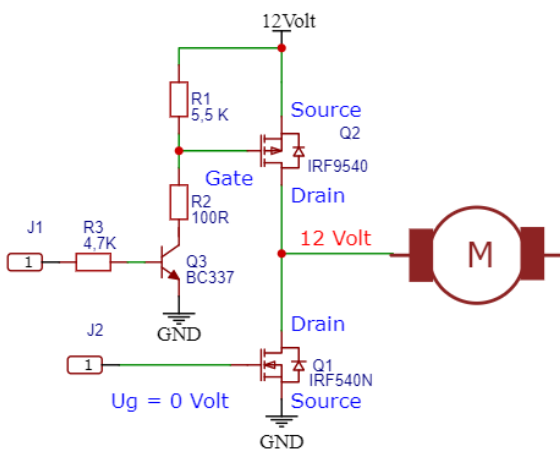
Er J1 derimod 5 Volt, leder Q3. dvs. R2 er forbundet til Gnd. Og R1 og R2 udgør en simpel spændingsdeler. Med de valgte modstande vil Q2's Gate få 6 Volt, som jo er minus 6 Volt i forhold til dens Source Og derfor leder den !!

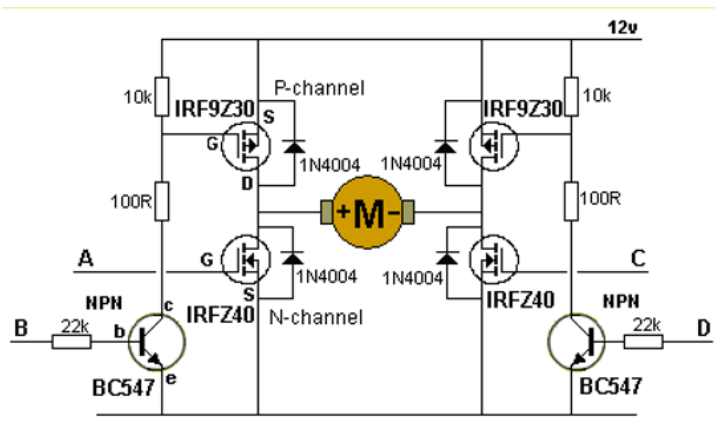


Vælges R1 og R2 til som vist her, vil Q2's Gatespænding være tæt på Gnd.

Det er nemlig en fordel, hvis der arbejdes med 6 Volts motorer.

Så er man sikker på, at Gaten har tilstrækkelig spænding, til at overvinde dens  $U_{\text{gs-Treshold}}$ .





Der findes mange kredsløbseksempler derude.

Her er vist et diagram, der har 4 styreindgange !!

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

I næste kredsløb er der kun 2 styreindgange.

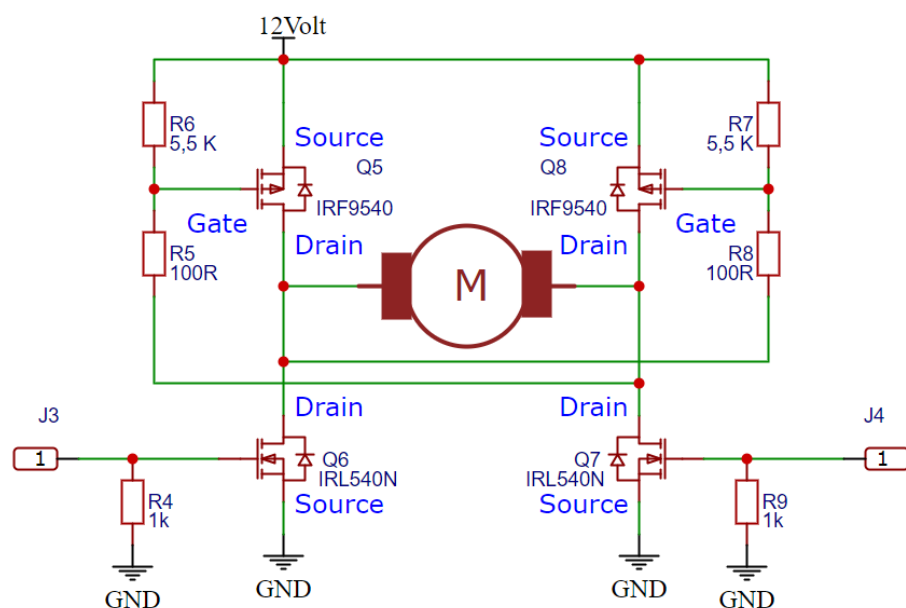
De øverste – P-MOS transistorer virker som slaver af de nederste – modsatte – MOSFets.

Bemærk, at det er **absolut nødvendigt** at man ikke styrer begge transistor-indgange høje samtidig.

Så vil der jo opstå en direkte kortslutning fra Plus 12 Volt til Stel.

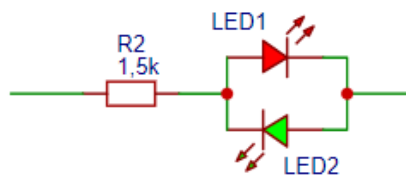
Kredsløbet kan styres direkte fra en uC.

De nederste transistorer er her erstattet af en IRL540, der er en speciel ” Logic ” udgave.



Dens  $U_{gs}$ -treshold spænding er lidt lavere end 3 Volt.

Obs: R4 og R9 er til Pull Down modstande. De sikrer, at Q6 og Q7 ikke utilsigtet styres ON af fx elektrisk støj.

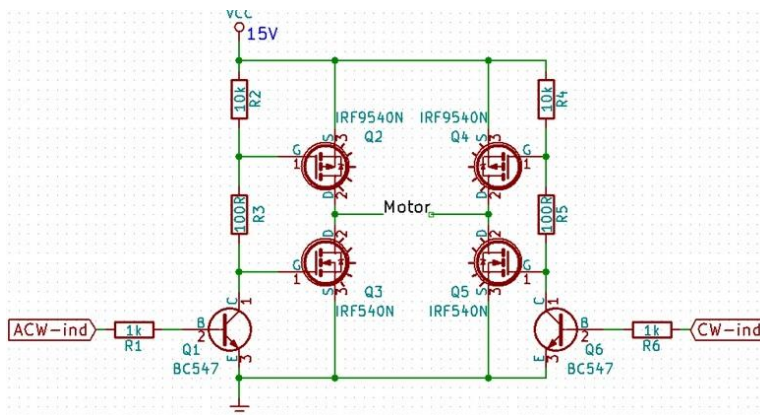
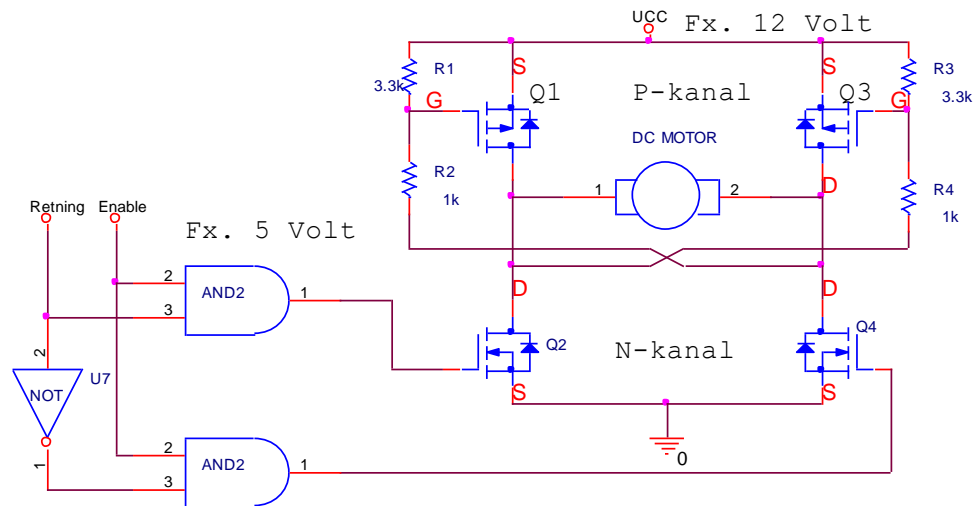


Det kan være en fordel at sætte lysdioder på parallelt over motoren, for at indikere, hvornår motoren kører. – husk også formodstand !!

Her ses et kredsløbseksempel !

## Motorstyring.

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



Her et andet kredsløb.

I Strømspaser-erfagruppen på fjæseren siges, den er lidt langsom.

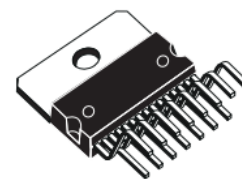
Det er måske fordi mosfetter er lidt langsomme til at slukke.

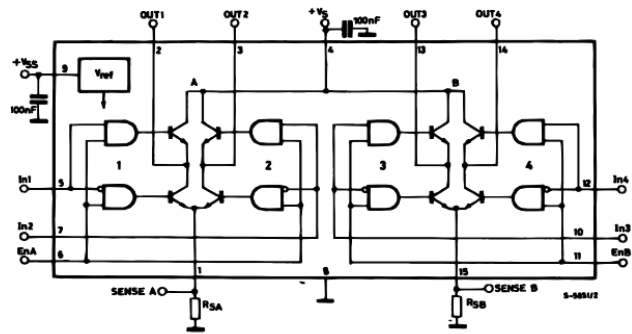
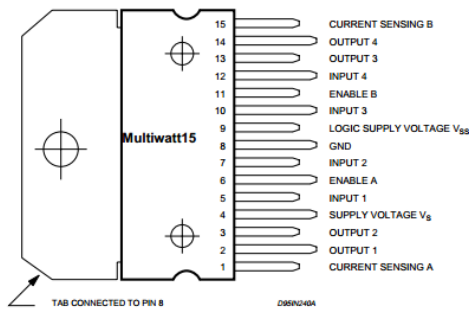
## Integrerede kredse:

En H-bro kan også fås som integreret kredsløb. Fx L298N

Undersøg kredsløbet!

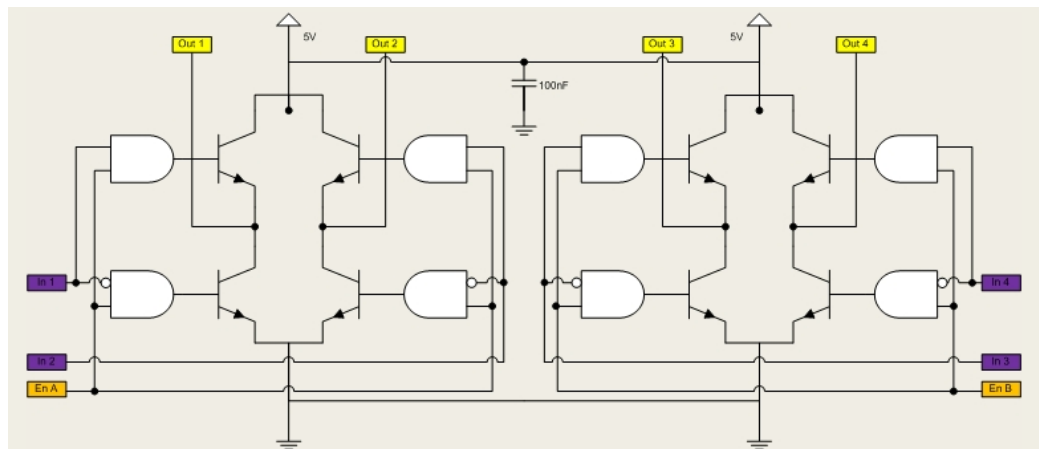
Der skal 5 Volt på ben 9 til at forsyne kredsens digitale dele. Men der må godt sættes 12 Volt på ben 4 til motoren!!





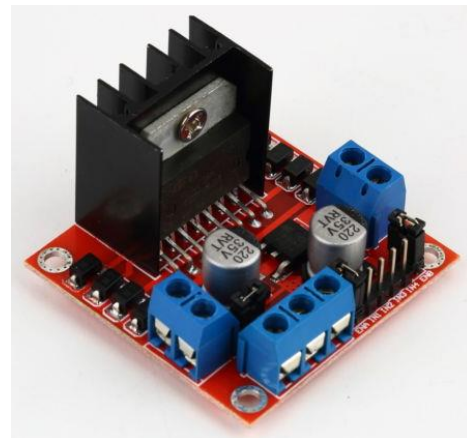
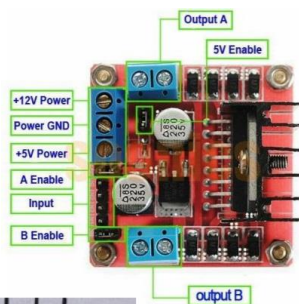
**Forklar modstandene på ben 1 og 15 !!**

Her er vist et princip-diagram af indmaden i IC-en L298N



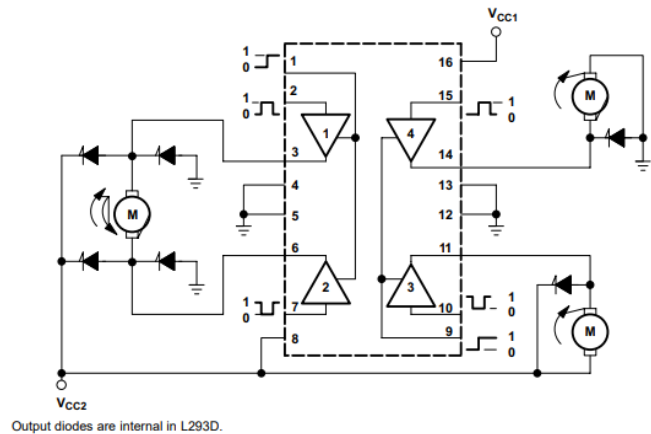
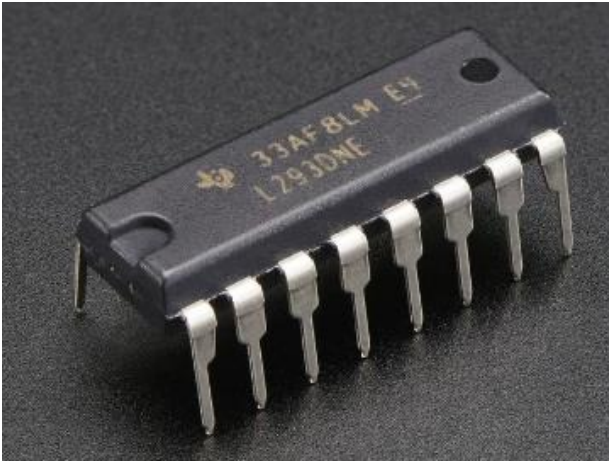
Og der fås også færdige breakout boards til ” Arduino-verdenen

Her et eksempel på et kit til motorstyring.



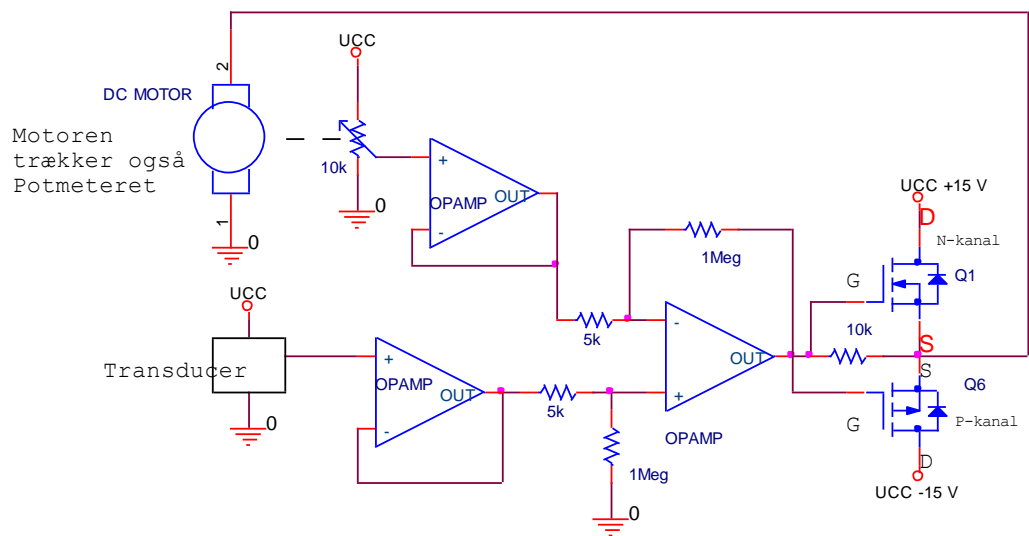
Se evt. video om breakout boards [her](#): 8:20

Herudover findes der IC-motordrivere, der kan fungere som H-Bro. Her L293D fra Texas Instruments.



Kilde: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>

## Eksempel på et servosystem:

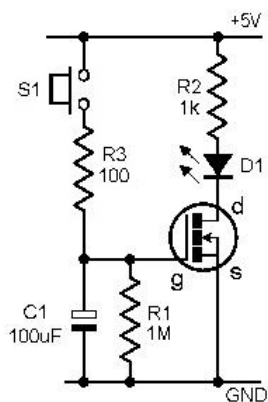
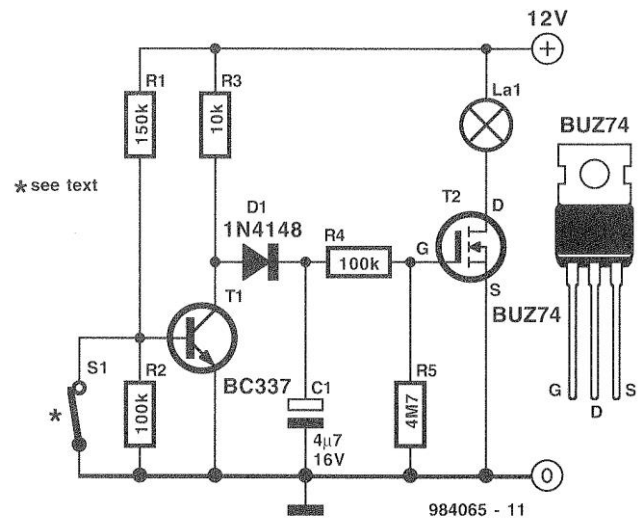


## Lidt forskellige kredsløb med MOSFet



Undersøg kredsløbet!!

Kredsløbet er gaflet fra Elektor.



Trappeautomat?

Med et tryk på S1 tændes lysdioden i en periode.

Forklar !!

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

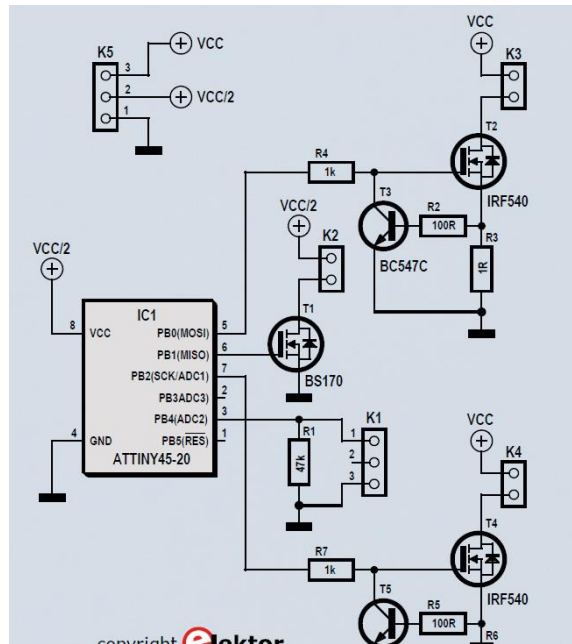
<http://homemadecircuitsandschematics.blogspot.dk/2012/02/how-to-make-solar-inverter-circuit.html>



Fra: Elektor 2017-07 side 123

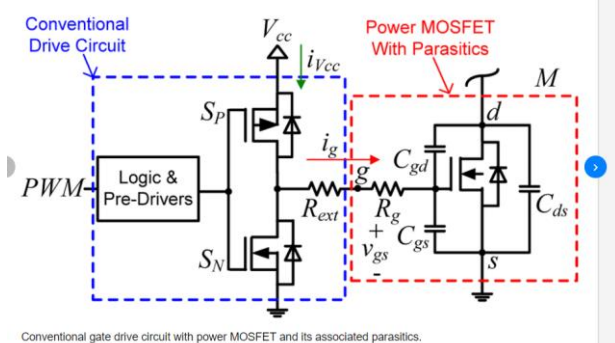
Her er der monteret strømbegrænsner på T2.

Hvis strømmen gennem R3 bliver for stor, så der opstår en spænding på ca. 0,7 Volt, begynder T3 at lede, og den stjæler så Gate-spænding fra T2.



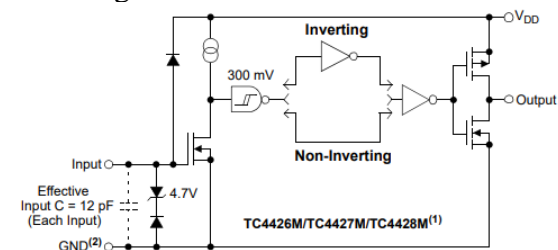
## Gate Driver IC

Man kan købe færdige Gate-driver-IC'er



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

Blokdiagram:



Gate 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.*



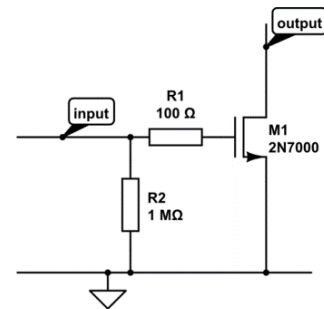


A high value resistor to ground is a good idea to avoid capacitive coupling driving the transistor when it is otherwise not connected.

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

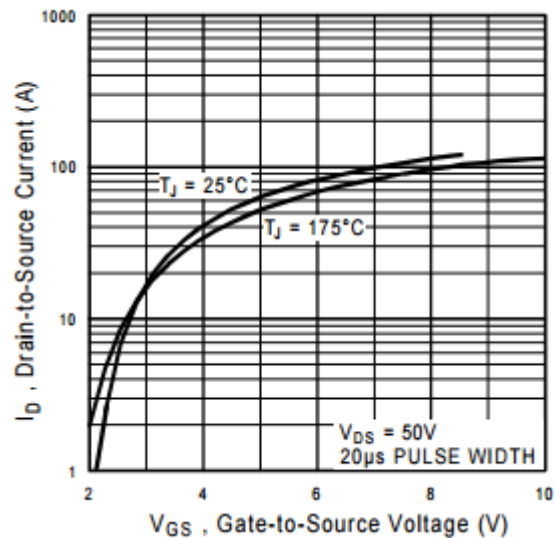
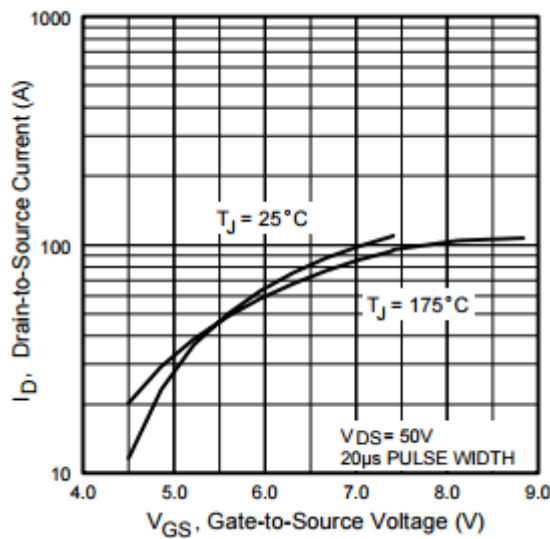
Som det ses af de to U<sub>gs</sub>-grafer herunder, kan det være svært at tænde en standard IRF540 med fx en udgang fra en Arduino. Man kan ikke regne med at U<sub>out</sub> er 5 Volt. Måske kun 4 Volt.

Derfor kan det være en fordel at vælge in Logic level Mosfet, der har en lavere treshold-spænding, V<sub>t</sub>. 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	
				$V_{GS} = 10V, I_D = 18A \text{ Ⓢ}$	
				$V_{GS} = 5.0V, I_D = 18A \text{ Ⓢ}$	
				$V_{GS} = 4.0V, I_D = 15A \text{ Ⓢ}$	

## Samlet:

### Logic Level Gate MosFets.

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.

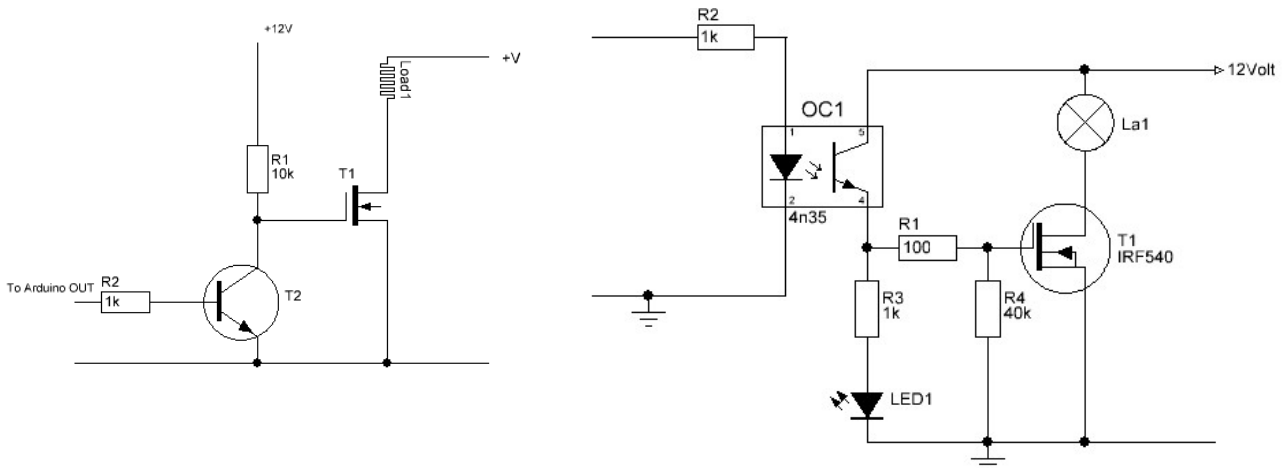
Mosfets er gode i digitale kredsløb, fordi i de har meget lille læk-strøm både ved logisk 0 og 1.



<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](#):

Her er 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 køleflade



IRFZ	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 køleflade

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

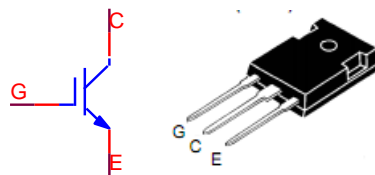
## **IGBT, Isolated Gate Bipolar Transistor**

Se evt.: <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, Emitter og Gate. Altså en spændingsstyret "almindelig" transistor.

Diagramsymbolet:

ORCAD !! IXGH40N60.



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

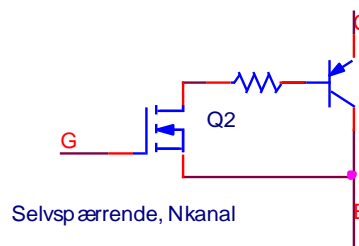
*The IGBT Transistor takes the best parts of these two types of common transistors, the high input impedance and high switching speeds of a MOSFET with the low saturation voltage of a bipolar transistor, and combines them together to produce another type of transistor switching device that is capable of handling large collector-emitter currents with virtually zero gate current drive.*

*The result of this hybrid combination is that the "IGBT Transistor" has the output switching and conduction characteristics of a bipolar transistor but is voltage-controlled like a MOSFET.*

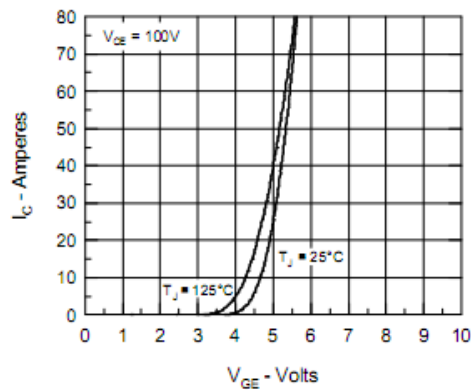


Opbygningen på chippen er som flg:

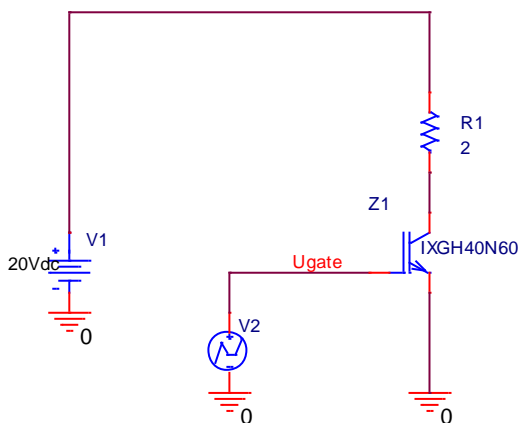
Kan switche 75 A.



Undersøg [databladet for IXGH40N60](#)



Se evt. 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 test-kredsløb med en IGBT.

Undersøg  $I_{CE}$  som funktion af  $U_{GE}$  for transistoren.

IGBT-moduler fås til store strømme i fx sådanne moduler



## Søg IGBT hos Cypax

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 20-200 h <sub>FE</sub>	Voltage V <sub>GS</sub> 3-10V	Voltage V <sub>GE</sub> 4-8V
Input Impedance	Low	High	High
Output Impedance	Low	Medium	Low
Switching Speed	Slow (μs)	Fast (ns)	Medium
Cost	Low	Medium	High

Fra: <https://www.altronautomation.in/2019/01/igbt-bipolar-transistor.html>

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

$I_C/I_G > 10^9$

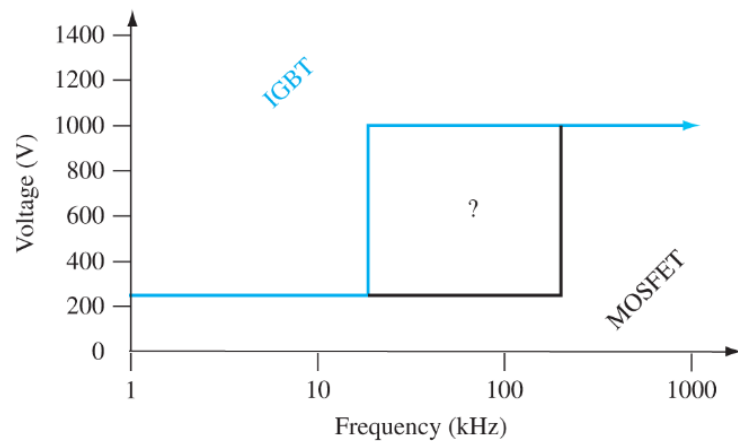
IGBT's fås til fx 1000 Volt og 300 A. Switching kan udføres op til  $F_{\text{øvre}} \sim 20$  KHz. ??

Eks. Siemens, BUP 304, 1000 V 25 A

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



Hvornår bør man bruge IGBT fremfor MOSFET ??



Kilde: [https://www.linkedin.com/pulse/power-mosfet-vs-igbt-which-better-your-design-ahmed-sheikh?trk=articles\\_directory](https://www.linkedin.com/pulse/power-mosfet-vs-igbt-which-better-your-design-ahmed-sheikh?trk=articles_directory)

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>