Terug naar de basis (1)
Diodes en LED's

Elektronica wordt steeds complexer, een losse stroomkring of transistor kom je nauwelijks nog tegen. Dit maakt het voor beginners steeds moeilijker om op gang te komen met elektronica. Daarom gaan we met deze artikelenreeks terug naar de basisbegrippen. En die zijn in de elektronica analoog. Maar omdat veel beginners ook geïnteresseerd zijn in digitale techniek, passen we het geleerde tevens toe in een microcontrollerschakeling.

Burkhard Kainka (Duitsland)

Bij een basiscursus kun je natuurlijk helemaal van voren af aan beginnen met stroom, spanning en vermogen, de Wet van Ohm, parallel- en serieschakelingen, met andere woorden alle onderwerpen uit de natuurkundeles die we al lang kennen of zouden moeten kennen. Maar het is veel leuker om direct aan de slag te gaan met kleine praktische experimenten.

Misschien vraagt u zich af voor wie deze cursus eigenlijk is bedoeld. In het ideale geval brengt de cursus nieuwe lezers naar het niveau dat in Elektor gebruikelijk is. Ook kan het een kans zijn voor kinderen van trouwe Elektor-lezers. Daarbij helpt het als ervaren elektronici en beginners de cursus samen volgen. We hebben voor deze artikelenreeks een forum ingericht (www.elektor.nl/basiscursus-forum), en het zou prettig zijn als de 'oude rotten' daar hun kennis en ervaring willen delen.

Ook zullen er misschien wel een paar Elektor-lezers zijn die al veel projecten in elkaar hebben gezet, maar het principe van de werking nooit helemaal hebben begrepen. Natuurlijk, deze cursus is geen wondermiddel, maar zal zeker bijdragen aan een beter inzicht.

De basisbegrippen behoren voor een groot deel tot de 'oude' analoge elektronica. Maar ook voor de huidige digitale elektronica zijn deze 'basics' van belang. Ook wie zich voor microcontrollertechniek

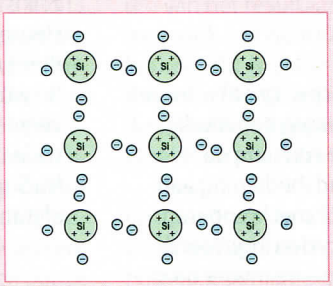
Halfgeleiders en sperlagen

De geleidbaarheid van een halfgeleider zoals silicium neemt in het algemeen toe bij verwarming, maar is bij kamertemperatuur nog erg laag. Dat komt doordat alle vier de buitenste elektronen in het kristalrooster gebonden zijn (**figuur 6**). Ze laten zich echter al door een kleine hoeveelheid toegevoerde energie losmaken.

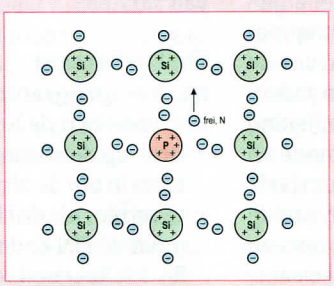
Met 'halfgeleider' worden ook componenten aangeduid die uit halfgeleidermateriaal zijn gemaakt, zoals diodes en transistors. Om een bepaalde geleidbaarheid te bereiken wordt bijvoorbeeld silicium gebruikt dat met opzet verontreinigd (gedoteerd) is. Worden hiervoor vijfwaardige stoffen zoals fosfor gebruikt, dan ontstaan er vrije elektronen en daarmee een negatieve (n-)geleidbaarheid (**figuur 7**). Met driewaardige stoffen zoals aluminium ontstaan er plaatsen waar elektronen ontbreken (gaten), die een positieve (p-) geleidbaarheid tot gevolg hebben. Daarbij verplaatsen de gaten zich als een soort positieve ladingsdrager door het kristal, doordat een ernaast gelegen elektron een gat vult en daarbij een nieuw gat achterlaat (**figuur 8**).

Diodes zijn halfgeleiderbouwstenen die de stroom maar in één richting doorlaten. Ze worden meestal opgebouwd uit een laag n-gedoteerd silicium met daarop een laag p-gedoteerd silicium. Op het grensvlak van deze twee lagen vormt zich een dunne niet-geleidende sperlaag. In dit gebied vullen vrije elektronen de gaten op (recombinatie), zodat er net als in zuiver silicium praktisch geen vrije ladingsdragers aanwezig zijn. De diode is daardoor in de eerste plaats een niet-geleider (**figuur 9**).

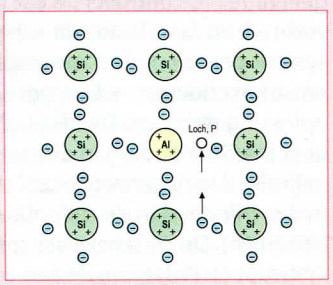
Wordt er op de buitenste contacten van de diode een kleine spanning aangelegd, dan wordt de sperlaag dunner of dikker. Eerst verbinden we de n-aansluiting met de minpool en de p-aansluiting met de pluspool. De ladingen op de aansluitingen duwen dan hun bijbehorende ladings-



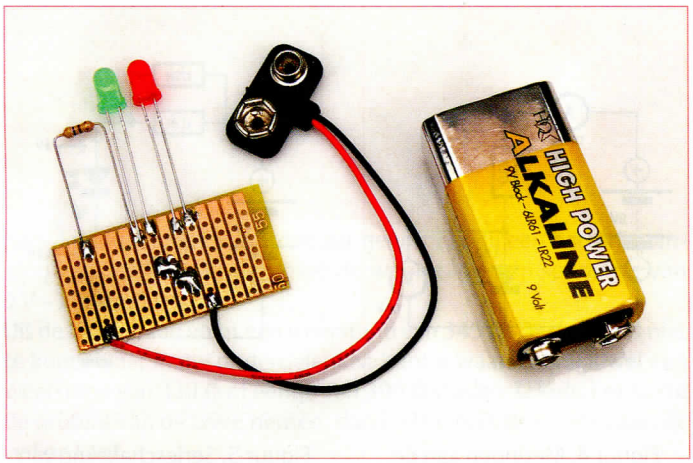
Figuur 6. Kristalrooster van silicium.

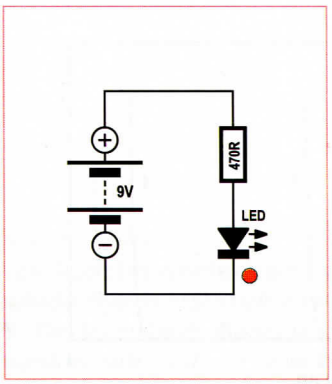


Figuur 7. Met fosfor gedoteerd n-silicium.

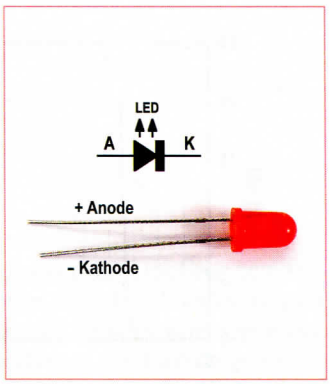


Figuur 8. Met aluminium gedoteerd p-silicium.





Figuur 1. Schakeling van de LED-lamp.



Figuur 2. Een LED.

interesseert krijgt te maken met analoge techniek. We laten dit zien aan de hand van eenvoudige voorbeelden uit de 'embedded wereld' waarbij controllers onder andere worden ingezet bij het meten van analoge grootheden. Daarmee is de cursus ook geschikt voor beginners op het gebied van deze kleine rekenwondertjes.

LED + voorschakelweerstand

We beginnen met het bouwen van de schakeling uit **figuur 1** met een LED, een weerstand (470 Ω) en een batterij. De uitvoering maakt niet uit, los op tafel aan elkaar gesoldeerd, met krokodilklemmen of op een experimenteerprint (een speciaal hiervoor ontworpen print loont waarschijnlijk niet de moeite). Hoe dan ook, u krijgt de LED ongetwijfeld aan.

Bij LED's moet altijd op de polariteit worden gelet. De plus-aansluiting is de anode. De min-aansluiting heet kathode en is verbonden met de kortste aansluitdraad. Bovendien is de behuizing aan de kant van de kathode vlak gemaakt. Binnen in de LED ziet u een bekervormige houder voor het LED-kristal die vaak (maar niet altijd) met de kathode is verbonden. De anode-aansluiting is via een heel dun draadje verbonden met een contact aan de bovenkant van het kristal. Als u de LED ompoolt, dan geeft deze geen licht meer. Zo gaat dat bij elke diode, stroom vloeit er maar in één richting doorheen, daarom wordt deze ook wel een elektrisch ventiel genoemd.

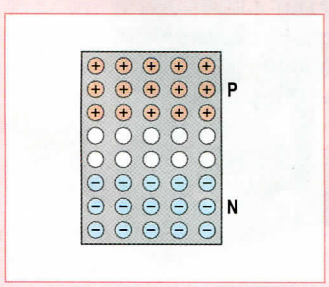
Een LED mag nooit direct op een batterij worden aangesloten. Als de stroom die door de LED vloeit tegen de spanning wordt uitgezet,

dragers in de richting van de sperlaag. Vanaf een spanning van ongeveer 0,5 V beginnen de n- en de p-laag elkaar te raken en gaat er ook stroom lopen (**figuur 10**). Bij ongeveer 0,7 V is een goede geleiding bereikt. De diode wordt nu in de doorlaatrichting gebruikt.

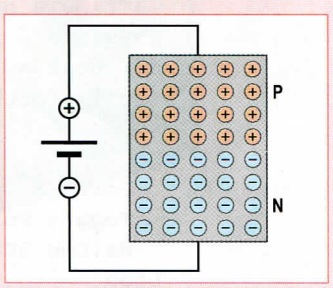
Wordt de spanning omgepoold, dan treedt het tegenovergestelde effect op: ladingsdragers worden naar de buitenste aansluitingen toe getrokken, zodat de sperlaag dikker wordt. De isolerende werking van de sperlaag neemt dus toe (**figuur 11**). Op een gangbare diode van het type 1N4148 kan een sperspanning tot 75 V worden aangesloten. De diode kan als een elektrisch ventiel worden beschouwd omdat deze de stroom maar in één richting doorlaat en kan hierdoor als gelijkrichter worden gebruikt.

De sperspanning mag niet groter worden dan wat door de fabrikant wordt opgegeven. Wordt er een te hoge spanning aangelegd, dan loopt er een sperstroom. Men spreekt dan van doorslag (van de isolatie). Bij speciale diodes, zoals de zenerdiode, is dit effect juist gewenst. De zenerdiode heeft een nauwkeurig bepaalde doorslagspanning en wordt gebruikt voor spanningsstabilisatie. Als we een te hoge sperspanning op een Si-diode zoals de 1N4148 zetten, dan ontstaat de zogenaamde tweede doorslag en die is definitief. De veel te hoge sperstroom verhit de sperlaag zodanig dat deze wordt vernield. Er ontstaat dan een permanente en niet meer te herstellen kortsluiting.

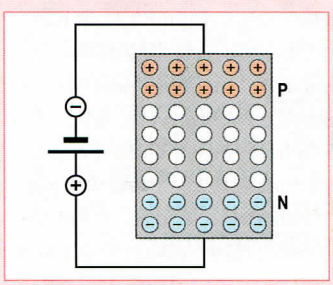
LED's zijn ook diodes, ze hebben ook een pn-overgang. Het halfgeleidermateriaal is bijvoorbeeld galliumarsenide. In de doorlaatrichting hebben ze een hogere spanning dan Si-diodes. En bij de recombinatie van elektronen en gaten ontstaat zichtbaar licht. Dit effect treedt weliswaar ook op bij siliciumdiodes, maar daar wordt slechts zeer weinig (infrarood) licht uitgestraald.



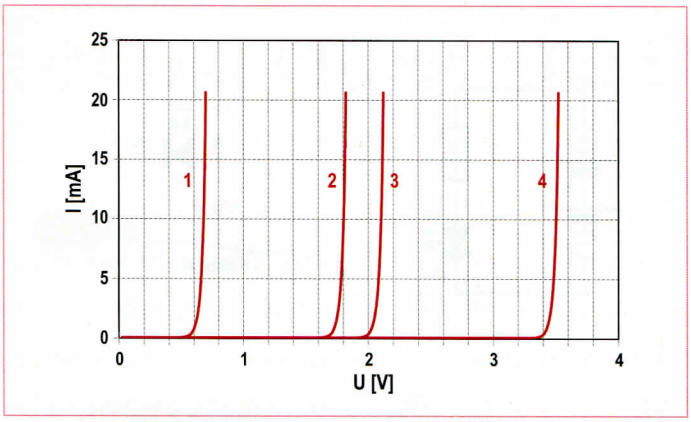
Figuur 9. Lagenstructuur van een diode.



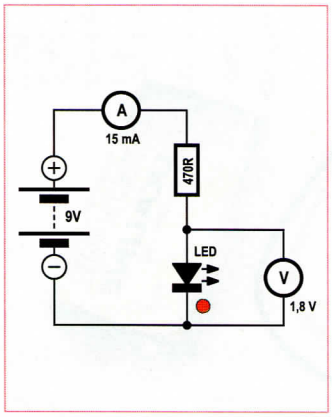
Figuur 10. Diode in doorlaatrichting.



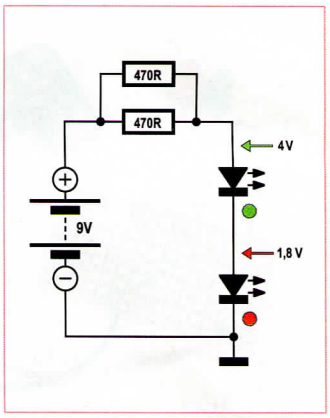
Figuur 11. Vergroting van de sperlaag in sperrichting.



Figuur 3. Karakteristieken van een Si-diode (1) en rode (2), groene (3) en witte (4) LED's.



Figuur 4. Metingen aan de schakeling.



Figuur 5. Serieschakeling van LED's.

wordt duidelijk waarom dat zo is. **Figuur 3** laat deze karakteristiek zien voor verschillende LED-typen. De overeenkomst tussen deze karakteristieken is de exponentieel stijgende stroom. Zolang de spanning onder de zogenaamde doorlaatspanning ligt, loopt er zo goed als geen stroom. Komt de spanning hier echter maar een klein beetje boven, dan wordt de stroom meteen veel te groot en kan de LED worden overbelast. Het is bijna onmogelijk om de spanning op de juiste waarde in te stellen. Ook al niet omdat de karakteristiek bij toenemende temperatuur met ongeveer 2 mV/K een stukje naar links verschuift. Maar het instellen van een bepaalde stroom gaat wel heel eenvoudig met een voorschakelweerstand. U hoeft alleen maar de waarde te bepalen en de juiste spanning wordt automatisch ingesteld.

Voor een stroom van 20 mA vinden we ongeveer de volgende doorlaatspanningen:

Si-diode (bijv. 1N4148)	0,7 V
Rode LED	1,8 V
Groene LED	2,1 V
Blauwe/witte LED	3,5 V

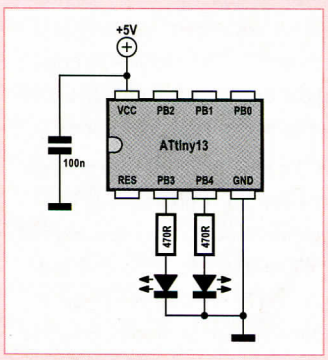
U kunt dit zelf nameten (zie **figuur 4**). De exacte spanningen kunnen iets afwijken. De nieuwe superheldere rode LED's hebben bijvoorbeeld een iets hogere doorlaatspanning dan oudere rode LED's.

Dimensioneren

Als u de diodespanning hebt gemeten en weet wat de batterijspanning is, hoeft u de stroom niet meer te meten, want die kunt u uitrekenen. Over de weerstand staat in dit geval namelijk een spanning van 9 V – 1,8 V = 7,2 V. Met de Wet van Ohm kan nu de stroom worden berekend.

I = U / R
I = 7,2 V / 470 Ω
I = 0,0153 A = 15,3 mA

Om in het omgekeerde geval een voorschakelweerstand te berekenen moet de gewenste stroom worden bepaald en moet u de voedingsspanning en de spanning over de LED weten.
We willen bijvoorbeeld een stroom van 20 mA door een groene LED laten lopen. Voor de spanning over de LED kan met voldoende



Figuur 12. Microcontroller met twee LED's.

LED-knipperlicht

LED's worden vaak door microcontrollers aangestuurd. Ook in dat geval moeten voorschakelweerstanden worden gebruikt. De schakeling in **figuur 12** laat twee LED's zien die via weerstanden van 470 Ω met twee poorten van een ATtiny13 zijn verbonden. Het bijbehorende BASCOM-miniprogramma zet PB3 permanent aan en PB4 afwisselend aan en uit, zodat een LED-knipperlicht ontstaat.
Als u de spanning op PB3 meet, zult u zien dat deze iets lager is dan 5 V (bijvoorbeeld 4,9 V) omdat de schakeltransistor in de controller ook nog een kleine weerstand heeft.

Uit de spanningsval kunt u de inwendige weerstand van de poort berekenen. Nu kunt u eenvoudig uitrekenen welke stroom er door de LED loopt. Kijk eens in de datasheet van de ATtiny13 (www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2535.pdf) welke stroom een poort mag leveren...

```
,ATtiny13 driving LEDs
$regfile = „attiny13.dat"
$crystal = 1200000
Config Portb = Output

Do
  Portb.3 = 1
  Toggle Portb.4
  Waitms 500
Loop

End
```

nauwkeurigheid 2,1 V worden aangenomen. Bij een batterijspanning van 9 V blijft er dan over de weerstand een spanning van 9 V – 2,1 V = 6,9 V over.
Uit de berekening volgt een weerstand van 345 Ω. Die is helaas niet te koop. Maar in uw onderdelenkist kunt u waarschijnlijk wel een weerstand van 330 Ω of eentje van 390 Ω vinden. U kunt het beste de grotere van de twee nemen, dan blijft u met de stroom aan de veilige kant.

R = U / I
R = 6,9 V / 0,02 A
R = 345 Ω

Probeer het ook eens met voorschakelweerstanden die veel groter zijn. Meet telkens de LED-spanning en bepaal vervolgens de stroom. In het algemeen geldt: of u nu 1 mA, 5 mA of 10 mA door de LED stuurt, de spanning zal weinig veranderen. Dat komt door het exponentiële verloop van de karakteristiek.

Serieschakeling

Vaak heeft het voordelen om twee of meer LED's met een gemeenschappelijke voorschakelweerstand in serie te schakelen (**figuur 5**). Omdat nu beide diodespanningen bij elkaar worden opgeteld, wordt de spanning over de weerstand lager. Om toch de gewenste stroom van 20 mA te laten lopen moet de voorschakelweerstand worden verkleind. Stel, u hebt een rode LED met 1,8 V en een groene LED met 2,2 V. Dan is er voor beide LED's samen precies 4 V nodig. Over de voorschakelweerstand blijft nog een spanning van 5 V over. Met een voorschakelweerstand van 470 Ω komt u dan uit op ongeveer 10 mA. Schakelt u twee van deze weerstanden parallel, dan verdubbelt de stroom. Als u het narekent, zult u zien dat er dan een stroom van 21 mA loopt.

(110202)

Advertentie

17" Fanless Panel PC

- Lexcom 17" panel PC met stevige behuizing
- Waterdichte voorzijde met afdichting
- Resolutie: 1280x1024
- Intel® Atom™ processor N270
- Touch screen (resistive)
- Schitterend beeld met hoog contrast

42" Panel PC

- Lexcom 42" panel PC met Intel® Core™2 Duo processor
- Geïntegreerde PC, uitneembaar als cassette
- Inclusief audio, 2x PCI slot voor uitbreiding
- 2x Gigabit LAN, 2x RS232, 4x USB 2.0
- Stevig ontwerp met metalen chassis, bedoeld voor wandmontage (VESA 600x200)

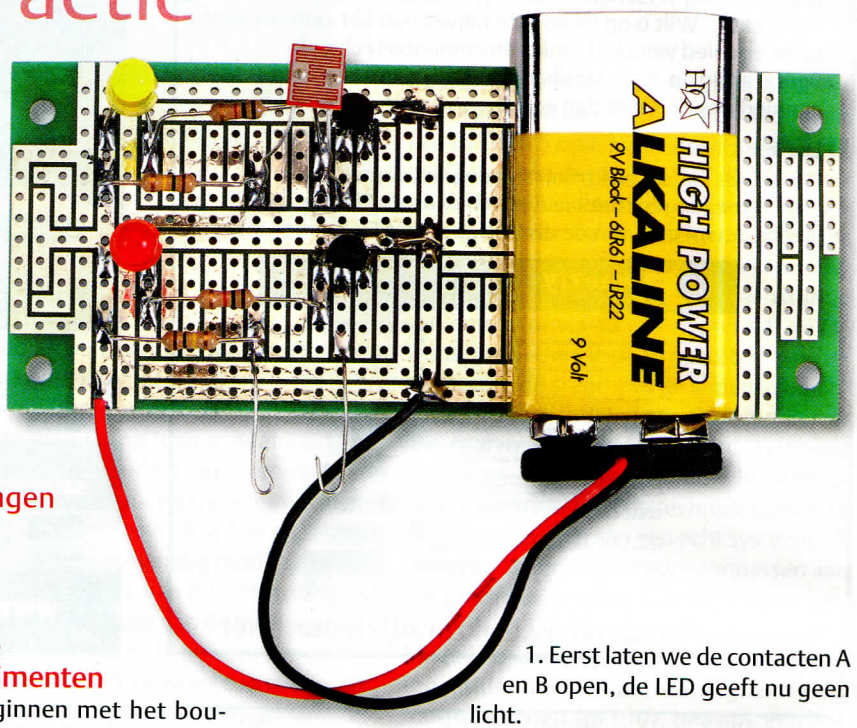
industrial computers

HPS Industrial bv / Computer Solutions
www.hpsindustrial.nl
Stationsweg 416 3925 CG Scherpenzeel (NL) T: 033-2774905 E: verkoop@hpsindustrial.nl

Terug naar de basis (2)

De transistor in actie

Burkhard Kainka (Duitsland)



Elektronica wordt steeds complexer en dit maakt het voor beginners steeds moeilijker om op gang te komen. Daarom gaan we met deze artikelenreeks terug naar de basisbegrippen. Deze keer doen we een paar interessante experimenten met transistoren. En er zijn testvragen waarmee u iets kunt winnen!

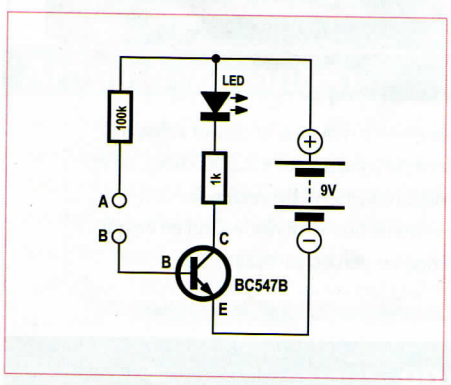
De transistor kan worden beschouwd als een van de belangrijkste technische uitvindingen ooit. Zonder transistoren zou ons dagelijkse leven – met computer, mobiele telefoon en internet – ondenkbaar zijn. Halverwege de vorige eeuw begonnen deze kleine onderdelen de overal gebruikte elektronenbuizen te verdringen. In het begin waren het voornamelijk germaniumtransistoren, later kwamen daar de bipolaire NPN- en PNP-siliciumtransistoren bij, en nog later de veldeffect-transistoren. De ontwikkelingen werden verder versneld door de introductie van geïntegreerde schakelingen die veel transistoren bevatten. Maar ook met één enkel exemplaar kunnen al veel verschillende functies worden gerealiseerd, zoals we in deze aflevering laten zien.

Eerste experimenten

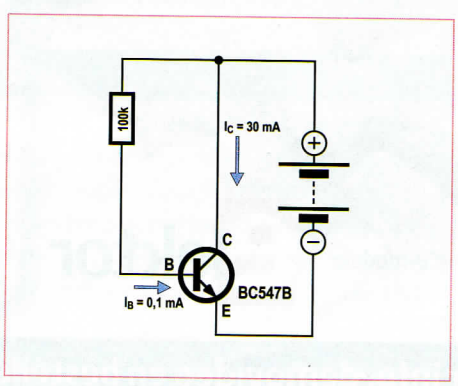
We beginnen met het bouwen van de schakeling uit **figuur 1**, bijvoorbeeld op een Elex-experimenteerprint van Elektor (www.elektor.nl/120002). Zo'n print kan voor verschillende experimenten tegelijk worden gebruikt, waarbij de lange sporen voor de stroomvoorziening zorgen. Gebruik hiervoor bij voorkeur een oude 9-V-batterij. Deze moet niet meer helemaal vol zijn, bijvoorbeeld een die bij vervanging uit een rookmelder afkomstig is. Zo'n 'zwakke' batterij heeft het voordeel dat deze in het geval van fouten te weinig stroom kan leveren om iets kapot te maken. We beginnen met een paar eenvoudige experimenten:

1. Eerst laten we de contacten A en B open, de LED geeft nu geen licht.
2. Verbind nu A met B. De LED licht fel op.
3. Raak A en B tegelijk aan met een natte vinger. De helderheid van de LED varieert.
4. Laat A en B open en verbind de emitter E van de transistor met de collector C. De LED licht fel op.
5. Verbind A en B weer met elkaar (LED is aan), sluit vervolgens de basis B kort met E. De LED gaat nu uit.

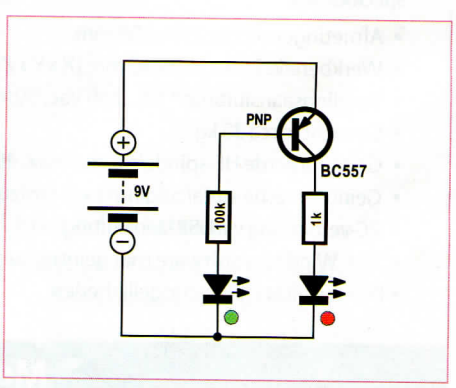
Met deze experimenten wordt de basisfunctie van een transistor zichtbaar gemaakt: een kleine basisstroom (van B naar E) veroorzaakt een grotere collectorstroom (van C naar E). De basisstroom wordt 'versterkt'



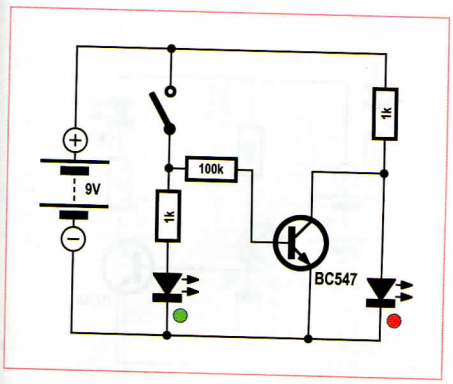
Figuur 1. Schakeling voor het eerste experiment.



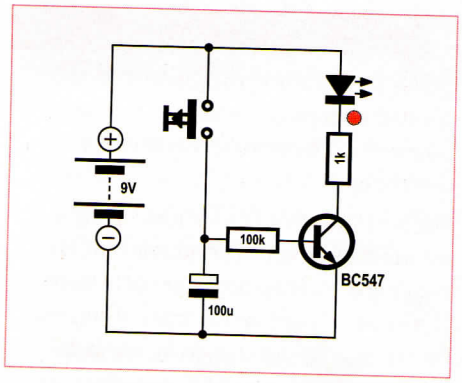
Figuur 2. Stroomversterkingsprincipe.



Figuur 3. Een PNP-transistor in gemeenschappelijke-emitterschakeling.



Figuur 4. De transistor als inverter.



Figuur 5. Uitschakelvertraging.

en bij benadering kun je zeggen dat de versterkingsfactor constant is. Bij de veelgebruikte BC547B is deze factor ongeveer 300. De collectorstroom is dus 300 keer groter dan de basisstroom (**figuur 2**), maar dat geldt alleen als deze niet zoals in figuur 1 door een collectorweerstand op een kleinere waarde wordt begrensd.

Schakeling ontwerpen

Bij het ontwerpen van een transistorschakeling moeten we eerst bedenken wat de transistor moet gaan doen.

a) Moet de transistor als schakelaar werken en helemaal 'uit' (gesperd) of helemaal 'aan' (geleidend) zijn?
b) Moet de transistor als analoge versterker werken en een grotere of kleinere hoeveelheid stroom laten lopen?

In onze eerste experimenten hebben we beide functies al gebruikt. Bij het verbinden van A met B werd de transistor volledig ingeschakeld (waarbij 'volledig' niet echt zo volledig is als bij een schakelaar met twee metalen contacten, omdat er tussen C en E altijd een kleine spanning over blijft). Bij het natte-vinger-experiment kwamen we in het analoge gebied omdat u door een meer of minder stevige aanraking de LED meer of minder kon laten oplichten. Daarnaast speelt hier de soort vloeistof een rol. Cola veroorzaakt een grotere stroom dan thee en dat komt door het zuurgehalte.

Een klein probleempje bij het ontwerpen van transistorschakelingen is dat de stroomversterkingsfactor niet precies bekend is. Bij weerstanden is een tolerantie van bijv. 5% gebruikelijk, maar bij de fabricage van transistoren is het erg moeilijk om de eigenschappen exact te bepalen. Met name de stroomversterkingsfactor vertoont een flinke spreiding. Bij een net geproduceerde BC547 kan deze tussen 110 en 800 liggen. Die transistor wordt dan eerst automatisch doorgemeten, en vervolgens in een van de groepen A, B of C ingedeeld (zie ook het kader TUP/TUN). De spreiding binnen zo'n groep is nog steeds erg groot, maar daar zal een elektronicus mee moeten leren leven en de schakeling zo ontwerpen dat deze met iedere transistor uit de groep goed werkt. Dat kost wat rekenwerk, want eenvoudig uitproberen werkt meestal niet.

Laten we nu eens kijken naar de schakeling in **figuur 3**. Een PNP-transistor heeft precies dezelfde functie als een NPN-transistor, maar dan met omgekeerde polariteit. De emitter wordt dus met de pluspool van de batterij verbonden. In de schakeling wordt een extra LED in de basisstroomkring opgenomen. Hiermee wordt aangetoond dat de basisstroom veel kleiner is dan de collectorstroom, want de groene LED licht maar heel zwak op.

Inverter

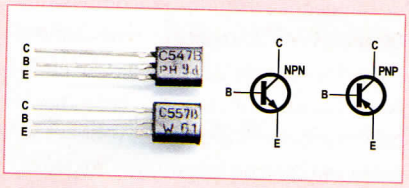
Aan wordt uit, en uit wordt aan. Dit wordt inverteren genoemd en is voor computers en microcontrollers niet moeilijk. Maar een transistor kan het ook. Tot nu toe gebruikten we de transistor als een bestuurbare schakelaar. Inschakelen van de basisstroom zorgt er voor dat de belastingsstroom wordt ingeschakeld. Bij een transistor kan deze schakelfunctie echter ook worden omgedraaid (geïnverteerd). In **figuur 4** zien we een simpele elektronische schakelaar. Als de schakelaar gesloten is, licht de groene LED op, bij geopende schakelaar de rode. Verklaring: Bij het sluiten van de schakelaar wordt de stroomkring door de groene LED gesloten en wordt de basisstroom ingeschakeld. Daardoor gaat de transistor geleiden en staat er geen spanning meer over de rode LED. In werkelijkheid staat er nog een restspanning van ongeveer 100 mV tussen emitter en collector, maar bij zo'n lage spanning loopt er vrijwel geen stroom door de LED en geeft deze geen licht.

Uitschakelvertraging

De stroomversterking van een transistor kan worden gebruikt om de ontlaadtijd van een condensator te verlengen. In de schakeling van **figuur 5** wordt een elco van 100 µF als laadcondensator gebruikt. Na een korte druk op de druktoets is deze geladen en levert nu voor langere tijd de basisstroom voor deze gemeenschappelijke-emitterschakeling. Door de hoge basisweerstand

TUP/TUN

Er bestaan zoveel verschillende transistoren dat het moeilijk is om een keuze te maken. Vroeger hanteerden we bij Elektor de aanduiding TUP (Transistor Universal PNP) en TUN (Transistor Universal NPN). Maar toen waren er ook naamloze transistoren te koop die veel goedkoper waren dan de bekende merken. TUN betekende: gewoon een willekeurige NPN-transistor. Tegenwoordig kunt u hiervoor het beste een BC547B nemen. Deze is bijna overal voor geschikt en is als het ware een moderne TUN (eigenlijk zou u daar altijd een aantal van in voorraad moeten hebben, wat niet zo veel kost). Als TUP kan de PNP-transistor BC557B worden gebruikt.

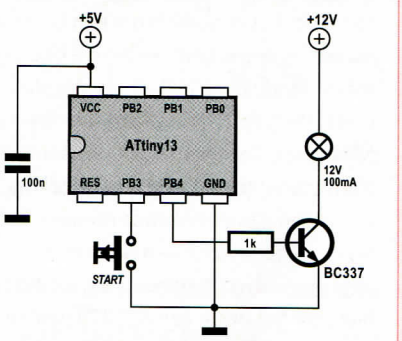


Belangrijkste kenmerken van de BC547B:

- Maximale collectorspanning: 45 V
- Maximale collectorstroom: 100 mA
- Stroomversterkingsfactor: 200 tot 450 (meestal rond 290)

Bij de BC547A ligt de stroomversterking tussen 110 en 220 (meestal rond 180) en bij de BC547C tussen 420 en 800 (meestal rond 520). Als men er nauwkeuriger naar kijkt, blijkt de stroomversterking van een transistor alleen bij gemiddelde collectorstromen echt constant te zijn. Bij zeer kleine en zeer grote stroomsterkten neemt deze flink af.

Timer met microcontroller



In een moderne timer wordt een microcontroller gebruikt waarmee zonder speciale afregeling een grote nauwkeurigheid wordt bereikt; dat betekent het einde voor de minder nauwkeurige RC-combinatie. Maar er is één ding dat een microcontroller niet kan: grote stromen schakelen! Daar is een transistor voor nodig. Een simpele NPN-transistor is al geschikt voor het schakelen van externe belastingen en geeft de 'zwakke' poort van de microcontroller spierballen. Voor dit doel wordt vaak een BC337 gebruikt die tot 800 mA kan schakelen. In de figuur is een timer te zien waarbij de microcontroller minder dan 5 mA hoeft te leveren. De poortstroom wordt door de transistor zover versterkt dat hiermee een gloeilamp kan worden geschakeld. Tegelijkertijd vindt ook nog niveau-aanpassing plaats: de microcontroller werkt op 5 V en de lamp op 12 V.

Met het kleine BASCOM-voorbeeldprogramma wordt de timerfunctie gerealiseerd. Na een druk op de knop begint de tijd te lopen (1 minuut). Als gedurende deze tijd nog een keer op de knop wordt gedrukt, wordt de tijd niet verlengd, zoals bij de analoge schakeling uit figuur 5 wel gebeurt. Denk eens na over hoe het programma er uit zou moeten zien om dit met de microcontroller ook mogelijk te maken...

```
,Timer 60 s
$regfile = „attiny13.dat"
$crystal = 1200000
Config Portb.4 = Output
Portb.3 = 1
,Pullup

Do
  Do
  Loop Until Pinb.3 = 0
  Portb.4 = 1
  Waitms 60000
  Portb.4 = 0
Loop

End
```

is de zogenaamde tijdconstante ongeveer gelijk aan 10 seconden. Na deze tijd is de basisstroom nog steeds groot genoeg voor een gedeeltelijke uitsturing van de transistor.
De tijdconstante van een RC-combinatie is de tijd waarin de condensator zich tot 1/e = 1/2,718... = 36,8 % van de beginspanning heeft ontladen.

Voor de berekening wordt de volgende eenvoudige formule gebruikt:

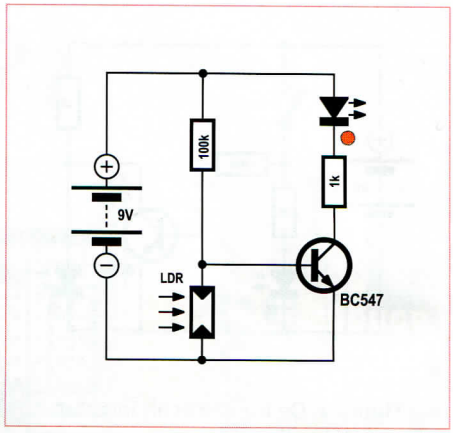
Tijdconstante = weerstand * capaciteit
T = R * C
T = 100 kΩ * 100 µF
T = 10 s

In de praktijk is er na 1 minuut nog steeds een zwak oplichten waar te nemen. De LED gaat ook na langere tijd niet helemaal uit, maar de stroom daalt dan naar een zo kleine waarde dat dit geen zichtbaar effect meer heeft.

Hoe zo'n timer met een microcontroller kan worden gerealiseerd, leest u in het kader.

Schemerschakelaar

In **figuur 6** wordt een lichtgevoelige weerstand (Light Dependent Resistor, LDR) als lichtsensor gebruikt. Dit onderdeel heeft een lichtgevoelige weerstandslaag van cadmiumsulfide (CdS). De weerstand varieert afhankelijk van de hoeveelheid licht tussen ca. 100 Ω in vol zonlicht tot meer dan 1 MΩ in het donker. Een verlichtingssterkte van ongeveer 1000 lux (goed verlichte werkplek) geeft bijvoorbeeld een weerstand van ongeveer 1 kΩ.
De variabele weerstand van de LDR en de vaste weerstand van 100 kΩ vormen samen een spanningsdeler. Als de spanning tussen basis en emitter (U_{BE}) te laag wordt, spert de transistor. In het algemeen geldt dat deze 'schakeldrempel' zich bij ongeveer 0,6 V bevindt. Deze waarde geldt voor alle siliciumtransistoren; hier geldt weer de bekende diodekarakteristiek.

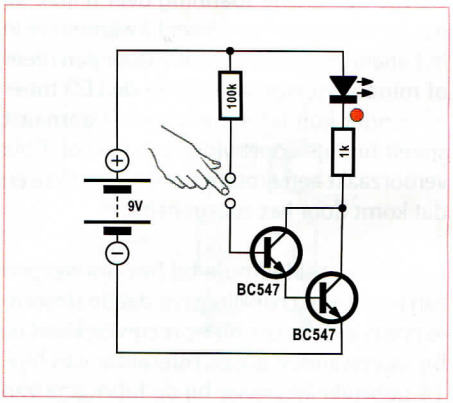


Figuur 6. Schemerschakelaar.

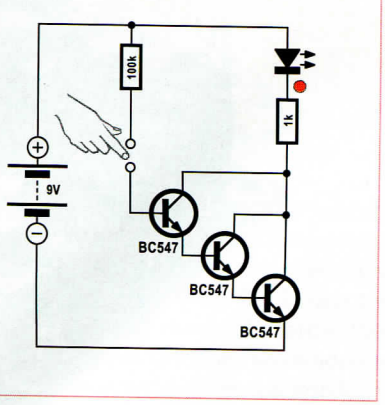
Probeer eens hoe deze schakeling zich onder verschillende verlichtingsomstandigheden gedraagt. Bij een bepaalde lichtsterkte vindt de omschakeling (nogal abrupt) plaats. Er is maar een klein lichtsterktegebied waarin de transistor gedeeltelijk wordt uitgestuurd.

Darlington-schakeling

De stroomversterkingsfactoren van twee transistoren kunnen met elkaar worden vermenigvuldigd door de versterkte stroom van de eerste transistor als basisstroom voor de tweede transistor te gebruiken, en daar nog een keer te laten versterken (zie **figuur 7**). Als we voor elke transistor uitgaan van een versterkingsfactor van 300, dan heeft de Darlington-schakeling een versterking van 90.000. Voor volledige uitsturing is een basisweerstand van 10 MΩ voldoende. Hiermee hebt u een goed werkende aanraakschakelaar: twee blanke draden worden daarbij met twee vingers aangeraakt. Natmaken van de vingers is niet meer nodig omdat zelfs de



Figuur 7. De Darlington-schakeling.

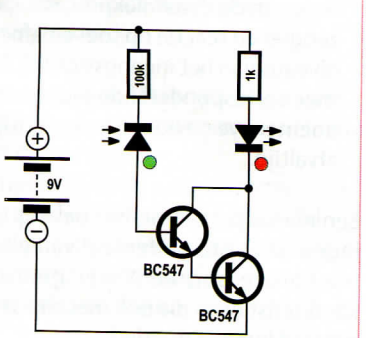


Figuur 8. Drievoudige Darlington-schakeling.

droge huid nog genoeg stroom geleidt om de schakeling helemaal open te sturen. Met een extra weerstand van 100 kΩ worden de transistoren beschermd tegen te veel basisstroom als de draden direct met elkaar worden verbonden.
Een Darlington-schakeling met drie transistoren (**figuur 8**) maakt een interessant experiment mogelijk om statische ladingen te detecteren. Hiervoor raakt u met een vinger de basis van de Darlington-schakeling aan en schuift u met uw voeten over de vloer. Afhankelijk van de vloerbedekking en het materiaal van uw schoenzolen ontstaan er meer of minder sterke ladingsverschuivingen die door knipperen van de LED zichtbaar worden. Vaak is dichtbij de ingang komen zonder deze aan te raken al voldoende om de LED te laten oplichten.

LED als fotodiode

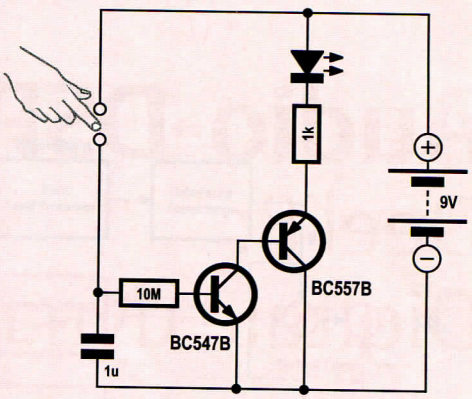
Een LED kan niet alleen licht geven, maar ook als lichtsensor dienst doen. Vaak lijkt het of er geen stroom loopt als een diode in sperrichting wordt aangesloten. In werkelijkheid loopt er wel degelijk een zeer kleine sperstroom van een paar nanoampère, die echter in het algemeen te verwaarlozen is. De grote versterking van de Darlington-schakeling maakt experimenten met zulke extreem kleine stromen mogelijk. Zo is de sperstroom van een LED afhankelijk van de omgevingsverlichting en kan een LED dus als fotodiode dienen De uiterst kleine fotostroom wordt met de twee transistoren zoveel versterkt dat de tweede LED oplicht. Bij dit soort experimenten moet u in de gaten houden dat de sperspanning van een LED veel lager is dan bij een gewone diode. Voor de maximale sperspanning van LED's wordt in de datasheets meestal 5 V genoemd. In ons geval staat er ongeveer 8 V op de LED en in werkelijkheid komen de meeste rode, gele en groene LED's pas bij een veel hogere spanning in de buurt van de eerste doorslag. Dit in tegenstelling tot witte en blauwe LED's waarvan de toelaatbare sperspanning veel lager ligt. De LED wordt hier in ieder geval door de 100-kΩ-weerstand tegen beschadiging beschermd.



Figuur 9. Versterking van de LED-sperstroom.

Testvragen

In de volgende schakeling worden twee transistoren met verschillende polariteit (NPN en PNP) gebruikt. Het betreft hier een complementaire Darlington-schakeling.



1) Wat is de functie van deze schakeling?

A) Nutteloze schakeling, de LED zal nooit oplichten.
B) Aanraken schakelt de LED uit.
C) Aanraakschakelaar met timerfunctie.

2) Welke stroomversterking kunt u verwachten?

D) Ca. 100.000.
E) Ca. 5.000.
F) Ca. 900.

3) Welk voordeel heeft de complementaire Darlington-schakeling ten opzichte van de normale Darlington met twee NPN-transistoren?

G) Grotere stroomversterking.
H) Lagere ingangsspanning.
I) Lagere collector-emitter-restspanning bij volledige uitsturing.

Als u ons de juiste oplossing stuurt, kunt u een **Minty Geek Electronic 101 Kit** winnen!

Stuur de oplossingscode (de letters van de drie juiste antwoorden aan elkaar geschreven) per e-mail **vóór 28 februari 2012** naar: **basics@elektor.com**.

Als onderwerp van de mail alleen de oplossingscode vermelden.

Medewerkers van Elektor International Media en hun familieleden zijn van deelname uitgesloten.

Of u nu beginner of gevorderde bent: nu is het tijd om eens naar het kader met onze testvragen te kijken. Wie ons de goede oplossing mailt maakt kans op een leuke prijs!

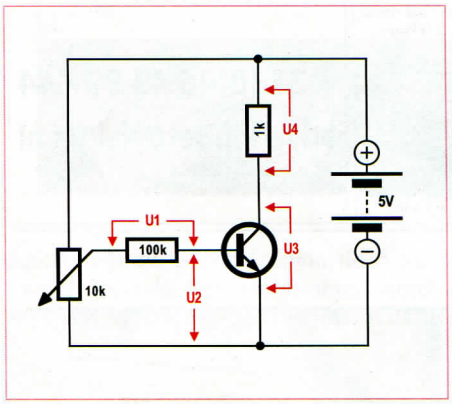
(120002)

Terug naar de basis (3)

Metingen aan transistoren

Burkhard Kainka (Duitsland)

Elektronica wordt steeds complexer en dit maakt het voor beginners steeds moeilijker om op gang te komen. Daarom gaan we met deze artikelenreeks terug naar de basisbegrippen. In dit derde deel voeren we verschillende metingen aan een transistor uit. Zelfs met een eenvoudige analoge multimeter kunnen we al veel over zo'n onderdeel te weten komen!



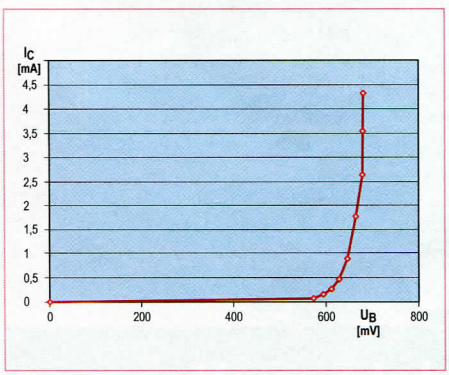
Figuur 1. De meetopstelling.

Tabel: Meetwaarden voor een transistor BC547B

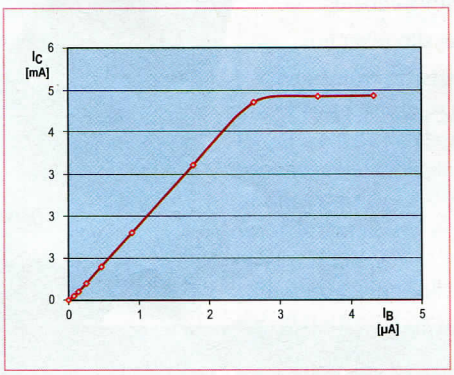
	U_1	I_B	$U_2=U_{BE}$	$U_3=U_{CE}$	U_4	I_C	$V=I_C/I_B$
1	0 V	0 µA	0 mV	5 V	0 V	0 mA	0
2	0 V	0 µA	400 mV	5 V	0 V	0 mA	0
3	0,07 V	0,7 µA	573 mV	4,9 V	0,1 V	0,1 mA	143
4	0,15 V	1,5 µA	595 mV	4,8 V	0,2 V	0,2 mA	133
5	0,26 V	2,6 µA	612 mV	4,6 V	0,4 V	0,4 mA	153
6	0,47 V	4,7 µA	629 mV	4,2 V	0,8 V	0,8 mA	170
7	0,90 V	9,0 µA	646 mV	3,4 V	1,6 V	1,6 mA	177
8	1,77 V	17,7 µA	665 mV	1,8 V	3,2 V	3,2 mA	181
9	2,63 V	26,3 µA	679 mV	0,3 V	4,7 V	4,7 mA	179
10	3,54 V	35,4 µA	681 mV	0,15 V	4,85 V	4,85 mA	137
11	4,32 V	43,2 µA	683 mV	0,13 V	4,87 V	4,87 mA	113

In de datasheets van fabrikanten staan allerlei karakteristieken waarin wordt weergegeven hoe een transistor zich in verschillende situaties gedraagt. Maar u leert het meeste door zelf een meter te pakken en zoveel mogelijk zelf te meten. Daardoor krijgt u `gevoel´ voor de transistor en begrijpt u beter hoe deze zich in de praktijk gedraagt. We gaan de basisstroom I_B, de collectorstroom I_C, de basis-emitterspanning U_B en de collector-emitterspanning U_{CE} meten. Als u alle metingen met dezelfde multimeter wilt uitvoeren, kunt u het beste alleen spanningen meten en zo min mogelijk van meetbereik veranderen. De stromen kunnen vervolgens eenvoudig uit de spanningen en de weerstanden in de schakeling worden berekend.

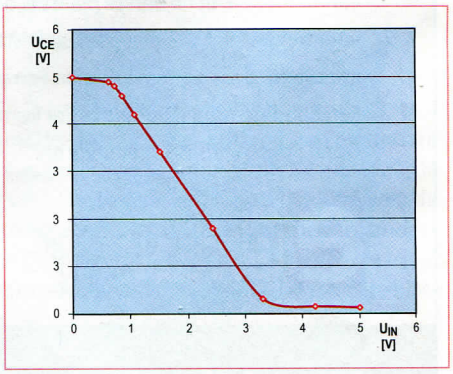
In **figuur 1** is de meetopstelling te zien. Met de potentiometer aan de ingang van de schakeling wordt de ingangsspanning in kleine stapjes van nul tot 5 V verhoogd. Bij iedere stap worden de vier spanningen U1 t/m U4 gemeten en genoteerd. Hieruit kunnen dan de stromen en de versterkingsfactor V worden afgeleid. In de **tabel** is een voorbeeld te zien van metingen die we aan



Figuur 2. Basisstroom als functie van de basis-emitterspanning.



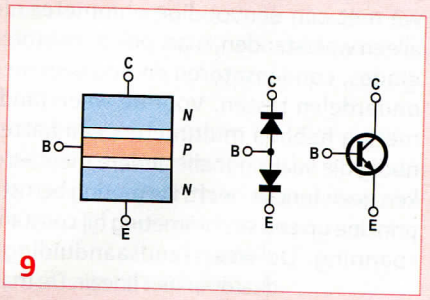
Figuur 3. Collectorstroom als functie van de basisstroom.

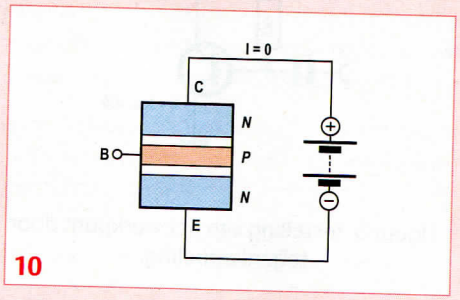


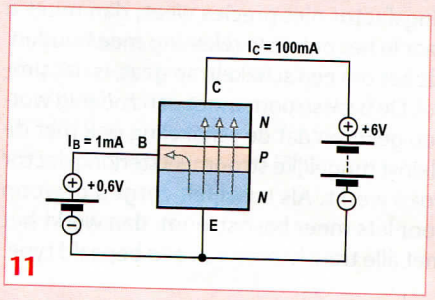
Figuur 4. Uitgangsspanning als functie van de ingangsspanning.

Basisprincipe van de transistor

Een transistor is een halfgeleiderbouwsteen met drie aansluitingen, die voornamelijk als stroomversterker wordt gebruikt. Net als een diode bestaat een transistor uit n- en p-gedoteerd halfgeleidermateriaal, maar is opgebouwd uit drie lagen met daartussen twee sperlagen. De volgorde van de lagen kan N-P-N of P-N-P zijn. In **figuur 9** zien we de opbouw en het vervangingsschema van een NPN-transistor. De drie lagen van de transistor worden aangeduid met emitter (E), basis (B) en collector (C). Voor een goede werking is het van belang dat de basislaag zeer dun is. De transistor wordt eerst met losse basisaansluiting op een stroombron aangesloten, waarbij de emitter met de minpool wordt verbonden (**figuur 10**). Er loopt geen stroom omdat de basis-collector-sperlaag in de sperrichting ligt.







Nu wordt een tweede stroombron tussen basis en emitter aangesloten, waarbij de basis aan de pluspool ligt en de spanning met ongeveer 0,6 V zo laag is dat er maar een kleine stroom door de basis-emitterdiode loopt. Nu gaat er tussen emitter en collector een stroom lopen die beduidend groter is. De verklaring hiervoor is de zeer dunne basislaag. Als namelijk n-ladingsdragers de basis binnenkomen, dan komen ze direct in het zeer sterke elektrische veld van de basis-collector-sperlaag terecht. Het merendeel van de ladingsdragers wordt dan naar de collector toe gezogen. Ongeveer één procent van de ladingsdragers die van de emitter afkomstig zijn, komt op de basisaansluiting terecht (**figuur 11**). Omgekeerd is dus de collectorstroom ongeveer 100 keer groter dan de basisstroom. De collectorstroom wordt door de basis-emitterspanning respectievelijk de basisstroom bestuurd. Hoewel de elektronen zich van de emitter naar de collector bewegen, zeggen we uit traditionele overwegingen (stroom loopt van plus naar min) dat de stroom `van de collector naar de emitter´ loopt.

een BC547B uitvoerden. Voor het meten van U1, U2 en U3 werden aparte, vast aangesloten digitale multimeters gebruikt. U4 werd uit U3 berekend. Daarna werden de stromen en de versterkingsfactor uit de gemeten spanningen afgeleid.

Praktijktips

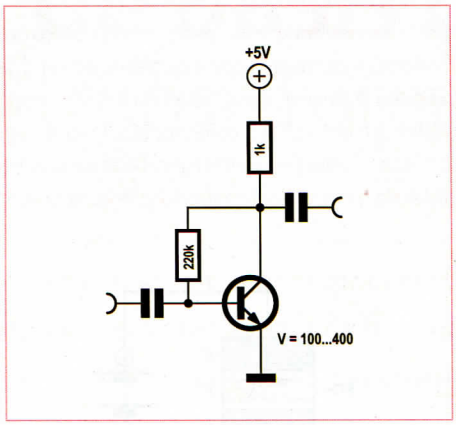
Voor een goed meetresultaat kunt u het beste beginnen met de collectorstroom op 0,1 mA in te stellen (U4 = 0,1 V) en vervolgens de stroom voor elke nieuwe meting te verdubbelen tot deze niet meer toeneemt (U4 wordt dus ingesteld op 0,1 V, 0,2 V, 0,4 V, 0,8 V, enzovoorts). Hierbij zal het u opvallen dat iedere verdubbeling van de collectorstroom het gevolg is van (ongeveer) een verdubbeling van de basisstroom, maar dat de basis-emitterspanning steeds toeneemt met een constante waarde van ongeveer 20 mV.

De stroomversterkingsfactor vinden we door I_C te delen door I_B. Zoals uit de tabel blijkt, is de maximale versterkingsfactor bij ons experiment ongeveer 180. Dat is te laag, want minimaal zou een 200-voudige versterking mogelijk moeten zijn. Het verschil wordt onder andere veroorzaakt door de eindige inwendige weerstand van de meter (10 MΩ). Deze heeft tot gevolg dat bij het meten van U2 een klein gedeelte van de basisstroom naar de meter gaat. Het is normaal dat dit soort meetfouten optreden. Als we alle mogelijke meetfouten en toleranties (ook die van de weerstanden) in beschouwing nemen, zou deze transistor net aan de onderste versterkingsgrens van 200 zitten. Probeert u het zelf ook eens, misschien doet uw transistor het beter.

Met zoveel meetgegevens is het handig om ook meteen een grafische voorstelling te maken. Dat kan bijvoorbeeld met potlood en papier, maar ook met een spreadsheet op de pc. Daarbij blijkt dan het volgende:
Figuur 2 (I_C als functie van U_B) laat de typische exponentiële karakteristiek van een silicium diode zien. De grafiek begint lineair, maar vertoont bij ca. 0,6 V een knik, waarna de stroom steeds sneller (exponentieel) toeneemt. Uit de meetwaarden blijkt dat er bij een basisspanning van bijvoorbeeld 400 mV nog geen meetbare basisstroom loopt – en daardoor ook geen collectorstroom. We kunnen dus concluderen dat de basisspanning meestal ergens tussen 0,6 V en 0,7 V ligt.
In **figuur 3** (I_C als functie van I_B) is te zien dat de collectorstroom eerst bij benadering lineair toeneemt met de basisstroom en vervolgens vlak onder de 5 mA niet verder meer toeneemt, dat wil zeggen `in verzadiging´ komt. Meer dan 5 mA kan ook niet worden gemeten omdat de collectorweerstand de stroom op 5 mA begrenst (5 V / 1 kΩ = 5 mA). Duidelijk is te zien dat ook 5 mA niet helemaal wordt gehaald. De transistor is vrijwel volledig ingeschakeld en er blijft een collector-emitter-restspanning over van iets boven 0,1 V.
De grafiek laat bij zeer kleine stromen ook een geringere steilheid (dus een kleinere stroomversterking) zien. Dat klopt wel, want bij erg kleine en erg grote collectorstromen neemt de versterking iets af. Maar dit effect wordt ook nog versterkt door een meetfout, omdat er bij het meten van U2 een kleine meetstroom loopt die de basisstroom juist in het laagste gebied groter laat lijken dan deze in werkelijkheid is.
In **figuur 4** is tenslotte de uitgangsspanning (U_{CE}) te zien als functie van de ingangsspanning (U1 + U2) op de loper van de potmeter. Hier wordt met één blik al duidelijk dat een hogere ingangsspanning een lagere uitgangsspanning tot gevolg heeft. De reden hiervoor is duidelijk. Als de collectorstroom toeneemt neemt ook de spanningsval over de collectorweerstand toe.

Tegenkoppeling

Als u een schakeling ontwerpt en de versterkingsfactor niet precies weet, dan moet u daar in het ontwerp rekening mee houden. Als het om een schakeltrap gaat, is dat simpel. De basisstroom moet dan zodanig worden gekozen dat de schakeling ook met de kleinst mogelijke stroomversterkingsfactor goed werkt. Als u twijfelt zorgt u gewoon voor iets meer basisstroom, dan werkt het met alle transistoren van een bepaald type.

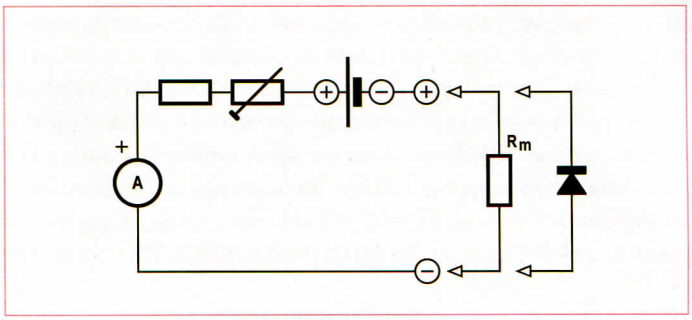


Figuur 5. Instelling van het werkpunt door tegenkoppeling.

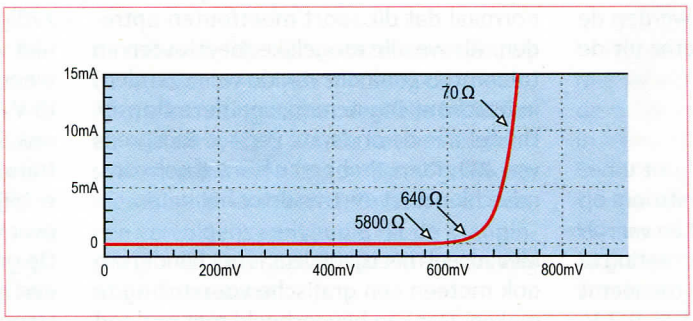
Het ziet er anders uit als een analoge waarde moet worden versterkt. Een te grote basisstroom kan hierbij juist verkeerd uitpakken, omdat de transistor dan gemakkelijk in verzadiging komt. We willen zo mogelijk voor de collectorstroom een waarde in het midden hebben, die naar boven en naar beneden kan worden gevarieerd. Om dit ook mogelijk te maken voor transistoren die onderling verschillen kunnen we gebruik maken van tegenkoppeling. Hierbij wordt de basisweerstand niet met de voedingsspanning maar met de collector verbonden (zie **figuur 5**). Een transistor met een grotere versterking zal een grotere spanningsval over de collectorweerstand veroorzaken. Daardoor daalt de collectorspanning en tegelijkertijd ook de basisstroom. Omgekeerd krijgen transistoren met een kleinere stroomversterking automatisch wat meer basisstroom. Uiteindelijk werkt dit dus voor alle transistoren.

Metingen met de ohmmeter

Bij het testen van onderdelen, en voor foutzoeken, zijn analoge wijzerinstrumenten nog steeds in het voordeel. Meetresultaten kunnen er namelijk veel sneller mee worden afgelezen dan met een digitale multimeter, zeker als het om een ruwe benadering gaat. Voor zeer nauwkeurige metingen hebben we daarentegen beslist een digitale multimeter nodig. Simpele analoge multimeters beschikken vaak ook over een of meer weerstandsmeetbereiken en met een beetje oefening kunnen we met een eenvoudige ohmmeter niet alleen weerstanden, maar ook transistoren, diodes, condensatoren en nog veel meer onderdelen testen. Voor de weerstandsmeting hebben multimeters een batterij nodig die vaak voor alle andere meetbereiken geen functie heeft. De meting berust in principe op een stroommeting bij constante spanning. De weerstandsaanduiding is daardoor niet lineair. De maximale schaaluitslag bij nul ohm moet met een potentiometer worden afgeregeld om afwijkingen in de batterijspanning te compenseren (zie **figuur 6**). Aan het andere einde van de schaal gaat de meetwaarde in ieder bereik naar oneindig.



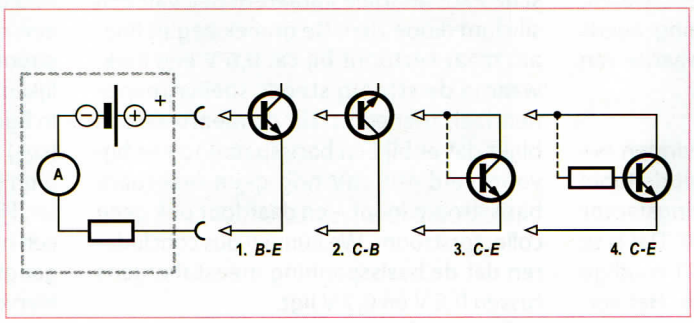
Figuur 6. Principeschakeling van een analoge ohmmeter.



Figuur 7. Gelijkstroomweerstand van een Si-diode bij verschillende meetstromen.

Bij de gebruikelijke interne schakeling van eenvoudige analoge multimeters is de spanning op de aansluitklemmen in de ohmmeetbereiken anders gepoold dan wat met de symbolen voor stroom- en spanningsmetingen bij deze aansluitingen wordt aangegeven. Aan de min-aansluiting van de multimeter vinden we dan ook de pluspool van de ohmmeter. Hier moet u rekening mee houden als u een ohmmeter gebruikt voor het testen van diodes en transistoren.

Bij metingen aan diode-overgangen moet u zich realiseren dat een sperlaag geen constante weerstand heeft. De aangegeven waarde hangt sterk af van de meetstroom en dus van het gekozen meetbereik. Ondanks dat kunnen we toch conclusies trekken. Zien we bij een ohmmeter met een interne spanning van 1,5 V een wijzeruitslag van ongeveer de halve schaal, dan moet de spanningsval over het meetobject ongeveer 0,75 V



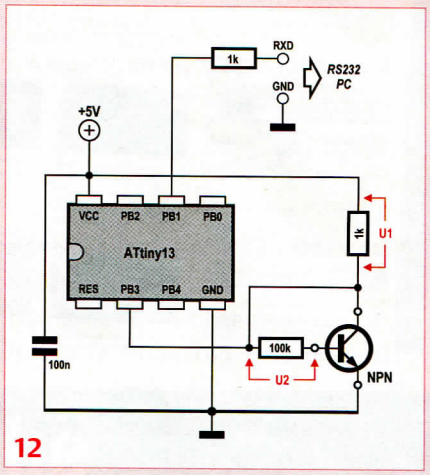
Figuur 8. Metingen aan een transistor.

Transistortester

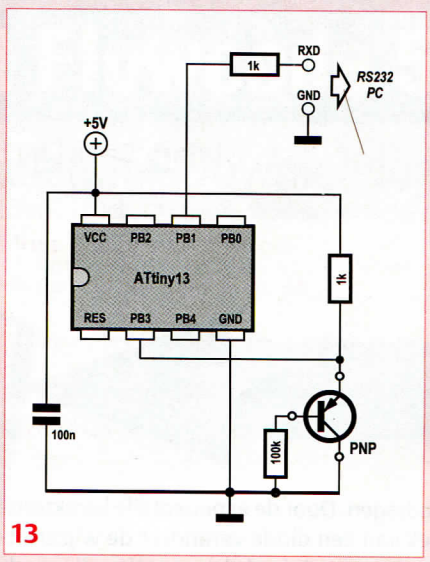
Een microcontroller met ingebouwde A/D-converter is uitstekend geschikt als meetapparaat. We kunnen er bijvoorbeeld een transistortester mee maken. Daarbij moet op een eenvoudige manier de stroomversterking worden bepaald. Dit kan al worden gerealiseerd met een ATtiny13 die het eindresultaat serieel naar een pc stuurt, waar het in een terminalprogramma wordt weergegeven.

De schakeling van **figuur 12** is heel simpel. Alleen de collectorspanning wordt gemeten. De transistor wordt met tegenkoppeling gebruikt, waardoor zeer uiteenlopende versterkingsfactoren kunnen worden gemeten. Het programma moet dan wel een beetje meer rekenwerk verrichten, maar daar hebben we tenslotte een microcontroller voor.

```
,Transistor tester
$regfile = „attiny13.dat"
$crystal = 1200000
$hwstack = 8
$swstack = 4                    ' 16
$framesize = 4


Dim UC As Word
Dim U1 As Word
Dim U2 As Word
Dim I1 As Word
Dim I2 As Word
Dim V As Word

Config Adc = Single , Prescaler = Auto
Start Adc

Open „comb.1:9600,8,n,1,INVERTED" For Output As #1

Do
  UC = Getadc(3)                ' PB3=ADC3 -> UC = 0..1023

  UC = UC * 50                  ' max 51150 -> 5115 mV
  U2 = UC - 6000                ' 6000 <- U_BE = 600 mV
  U1 = 51150 - UC
  I1 = U1                       ' 1 k
  I2 = U2 / 100                 ' 100 k
  V = I1 / I2
  Print #1 , V                  ' --> RXD
  Waitms 1000
Loop

End
```



12

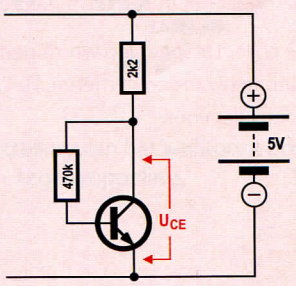


13

Het programma berekent de spanningsval U1 over de collectorweerstand en de spanningsval U2 over de basisweerstand. Daaruit volgen de collectorstroom I1 en de basisstroom I2. De versterking V is dan I1 / I2. Om alles in de kleine microcontroller te laten passen gebruiken we uitsluitend gehele getallen van het type Word. Daarbij is er voor gezorgd dat overflow niet kan plaatsvinden en dat de nauwkeurigheid niet vermindert door het gebruik van te kleine tussenresultaten. Met dit programma kan de microcontroller ook metingen aan een PNP-transistor uitvoeren. Deze moet alleen anders worden aangesloten (zie **figuur 13**).

Testvragen

Kunt u ook zonder microcontroller met één enkele meting de stroomversterking van een transistor bepalen? De schakeling met een collectorweerstand van 2,2 kΩ en een basisweerstand van 470 kΩ naar de collector heeft een uitgangsspanning U_{CE}.



1 U meet U_{CE} = 2,8 V. De stroomversterking is:

A ongeveer 152 maal
B ongeveer 214 maal
C ongeveer 472 maal

2 U meet U_{CE} = 0 V. Wat is er aan de hand?

D De transistor is doorgebrand (tweede doorslag).
E De basisweerstand maakt geen contact.
F De basisweerstand is slechts 470 Ω in plaats van 470 kΩ.

3 U meet U_{CE} = 4,9 V. Wat kan de fout zijn?

G Onderbreking in de collectoraansluiting.
H Onderbreking in de basisaansluiting.
I Emitter en collector zijn verwisseld.

Als u ons de juiste oplossing stuurt, kunt u een **Minty Geek Electronic 101 Kit** winnen!

Stuur de oplossingscode (de letters van de drie juiste antwoorden aan elkaar geschreven) per e-mail **vóór 1 april 2012** naar: **basics@elektor.com**.

Als onderwerp van de mail alleen de oplossingscode vermelden.

In het volgende nummer van Elektor vindt u de juiste antwoorden op de testvragen uit deel 2.

Medewerkers van Elektor International Media en hun familieleden zijn van deelname uitgesloten.

bedragen. Door de exponentiële karakteristiek van een diode verandert de wijzeruitslag maar weinig als het meetbereik wordt omgeschakeld.
Er wordt dus in ieder meetbereik een andere weerstandswaarde aangegeven, maar de wijzeruitslag blijft vrijwel hetzelfde omdat de spanningsval steeds ongeveer 0,6 V bedraagt. Uit de diodespanning kunnen we afleiden wat voor type diode het is. In **figuur 7** gaat het dus waarschijnlijk om een Si-diode.

Transistoren testen

Bij het testen van een transistor met alleen een ohmmeter kunnen al verschillende conclusies worden getrokken over het type en de staat waarin het meetobject verkeert. Ook van een volledig onbekende transistor kunnen zo op zijn minst de aansluitingen worden bepaald. Met drie standaardmetingen kan een transistor volledig worden getest. We beginnen met het doormeten van de basis-emitterdiode en de basis-collectordiode (zie het kader: Basisprincipe van de transistor) waarmee al onderscheid kan worden gemaakt tussen Si- en Ge-transistoren, en waarmee we eventuele kortsluitingen kunnen detecteren (**figuur 8**, deel 1 en 2). Vervolgens meten we de weerstand tussen emitter en collector, zonder en met basisstroom (3). Bij open basis loopt er door een goede transistor geen stroom, en meten we dus een oneindige weerstand. Als we de basis met de collector verbinden moet er een iets grotere stroom lopen dan alleen door de basis-emitterdiode.

De laatste test (4) moet worden uitgevoerd met een kleine basisstroom die via een basis-collectorweerstand wordt verkregen. De basisstroom kan ook worden opgewekt door de basis en de collector met een natte vinger aan te raken. De uitslag van de ohmmeter geeft nu een ruwe indruk van de stroomversterking van de transistor. Ook als de emitter en de collector zijn omgewisseld is er nog steeds een kleine stroomversterking zichtbaar. Als u twijfelt omdat de aansluitingen niet volledig bekend zijn, kunt u proberen emitter en collector om te wisselen.

Bij digitale multimeters wordt voor het ohmmeetbereik meestal een compleet andere inwendige schakeling toegepast. De weerstandsmeting is hier gebaseerd op het meten van de spanningsval bij constante stroom. Dit resulteert in een lineaire aanwijzing en een duidelijke grens van het meetbereik. Afregeling van het nulpunt is niet nodig. Een ander verschil met wijzerinstrumenten is dat de polariteit bij spannings-/stroommeting dezelfde is als bij weerstandsmeting.

Met een digitale multimeter kunnen in het ohmbereik in principe dezelfde tests van onderdelen worden uitgevoerd als met een analoog apparaat. Vaak is er ook een apart meetbereik voor metingen aan diode-overgangen. Dit werkt hetzelfde als het weerstandsmeetbereik, maar nu wordt de spanningsval in millivolt aangegeven, of een meetwaarde die evenredig is met de diodespanning.

(120003)