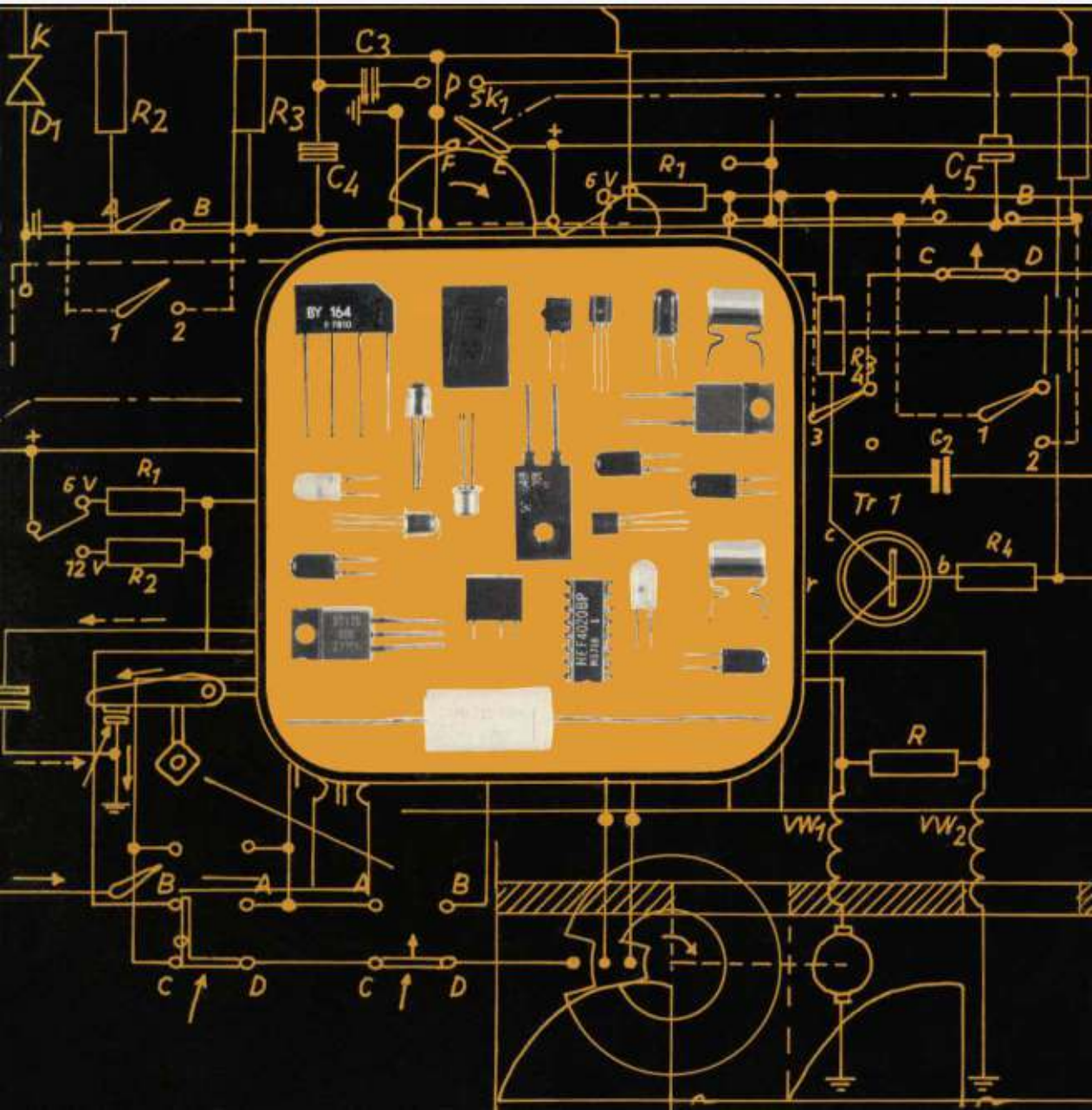
PHILIPS

Elektronica-theorie voor Hobbyisten



ELEKTRONICA-THEORIE VOOR HOBBYISTEN I

Theorie van elektriciteit en elektronica populair uitgelegd

Philips Nederland B.V. - Eindhoven

Alle in deze publicatie opgenomen gegevens zijn medegedeeld zonder octrooi-garantie van de N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken te Eindhoven.
Copyright: N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, 1979.
Nadruk, ook gedeeltelijk, is verboden.
Uitgave 1979.

INHOUD blz.

Inleiding 4
Spanning, stroom en weerstand 6
Condensatoren 11
Wisselspanning en wisselstroom 15
Spoelen en transformatoren 19
Gelijkrichters 30
Transistors en hun toepassing 39
Geïntegreerde schakelingen 69
Operationele versterkers 77

ELEKTRONICA-THEORIE VOOR HOBBYISTEN

THEORIE VAN ELEKTRICITEIT EN ELEKTRONICA POPULAIR UITGELEGD

Er zijn heel wat mensen, jongere zowel als oudere, die zich met de elektronica bezighouden. Voor sommigen betekent het een hobby waar heel wat tijd en vernuft aan gespendeerd wordt, voor anderen is het een middel om tot een bepaald doel te raken, bij voorbeeld om door zelfbouw een goed toestel voor een gunstige prijs te verkrijgen.

Nu kan men, zeker bij het gebruik van onderdelenpakketten, tot prima resultaten komen zonder iets van elektriciteit en elektronica af te weten. Veel aardiger is het natuurlijk als men niet zomaar de instructies van een bouwbeschrijving opvolgt, maar dat men ook wéét wat men aan het maken is, volgens welk principe een toestel werkt, welke theorie er aan de praktijk ten grondslag ligt.
Met dat doel is in de periodieke uitgave „Hobbyskoop" de serie Theorie voor Hobbyisten gepubliceerd. De belangstelling die deze reeks publicaties ondervond en de vele aanvragen voor overdrukken hebben ertoe geleid het eerste gedeelte van deze serie te bundelen. Zo kan ook buiten de lezerskring van Hobbyskoop van een interessante uiteenzetting worden kennisgenomen. Uiteraard wordt de stof behandeld zonder daarbij van wiskunde of van ingewikkelde formules gebruik te maken. Iedereen die zich een beetje wil inspannen om iets meer van zijn hobby te begrijpen zal deze theorie als een ruggesteun bij zijn zelfbouwwerkzaamheden ervaren.
In dit deeltje is de elektronicatheorie opgenomen tot de behandeling van draadloze communicatie. Dit gebied, radio, televisie e.d. zal in een volgend deeltje worden behandeld.

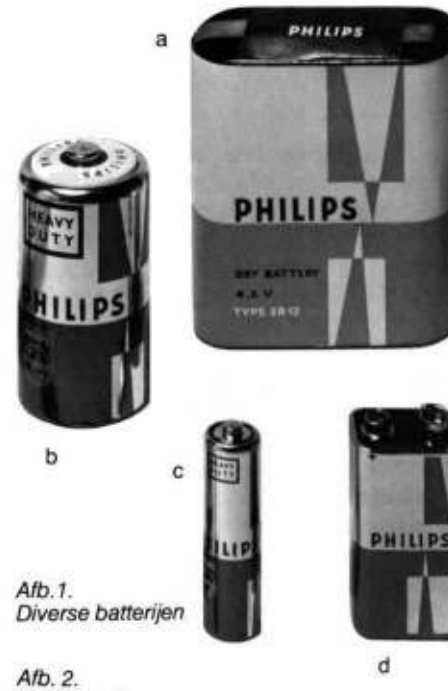
Wat is dat: elektronica?
Ofschoon tegenwoordig bijna iedereen over elektronica praat is het toch niet zo eenvoudig precies uit te leggen wat daar nu eigenlijk onder wordt verstaan. Natuurlijk weet haast iedereen wel het verschil tussen elektronische toestellen en elektrische apparatuur. Radio, televisie, versterkers, tuners en dergelijke, dat zijn elektronische apparaten. Over elektrische toestellen hebben we het als we bij voorbeeld spreken over stofzuigers, elektrische kachels, dynamo's, motoren, lichtinstallaties en dergelijke. Waarom noemen we het een elektrisch en het ander elektronisch? Om te beginnen moeten we vaststellen dat de elektronica eigenlijk een deel vormt van de elektrotechniek. De wetten en regels die voor de elektrotechniek gelden gaan ook op voor de elektronica. De elektronica is dus meer een specialisatie in de elektrotechniek dan een afzonderlijke techniek. Dat speciale heeft voornamelijk betrekking op twee zaken. De eerste is dat in de elektronica de elektrische stromen en spanningen worden beïnvloed door elektrische ladingen. We komen daar later op terug en zien dan dat dit gebeurt in elektronenbuizen en in halfgeleiders, zoals transistors, geïntegreer-

de schakelingen enz. In een elektronische schakeling komen dus vrijwel altijd elektronenbuizen en/of halfgeleiders voor. In die buizen of halfgeleiders worden stromen en spanningen ,,gestuurd'' door elektrische spanningen en we krijgen daardoor de gelegenheid allerlei bewerkingen met die elektrische spanningen uit te voeren, zoals het versterken van elektrische signalen, het uitzenden en ontvangen ervan, het omtoveren van licht- en geluidssignalen in elektrische trillingen en nog veel meer wonderlijke zaken.
Een tweede onderscheid tussen de elektronica en de ,,gewone'' elektrotechniek is gelegen in het feit dat daar gewoonlijk (naast het werken met gelijkstroom) meestal wordt gewerkt met wisselstromen van een lage frequentie (bij voorbeeld 50 perioden per seconde van het elektriciteitsnet), terwijl in de elektronica met veelal zeer hoge frequenties wordt gewerkt, variërend van enkele duizenden tot zelfs vele miljoenen trillingen per seconde. Er zijn verschillende gebieden waar elektrotechniek en elektronica nauwelijks van elkaar te scheiden zijn. We zullen daar geen probleem van maken. Het voornaamste is dat we leren begrijpen hoe elektrische en elektronische schakelingen werken.

Spanning, stroom en weerstand

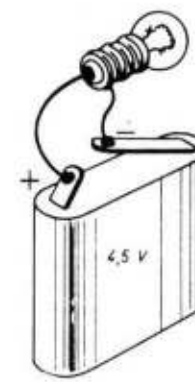
De elektronica is dus gebaseerd op elektrische verschijnselen, zoals stroom, spanning, weerstand, capaciteit enz. De „gewone" elektriciteitswetten zijn ook op elektronica van toepassing. Voor een beter begrip van elektronica dienen we ons dus eerst in het „wespennest" van de elektriciteitsleer te begeven. Nu is het zo, dat alles in principe eenvoudig is en dat de moeilijkheden pas ontstaan door de uitzonderingen en de complicaties.

Laten we daarom beginnen bij het eenvoudige principe en daarvoor enkele bekende „voorwerpen" bekijken. Iedereen kent een platte batterij (afb. 1a) die veel in zaklantaarns wordt gebruikt. Deze batterij heeft een spanning van 4,5 volt tussen de twee koperen strippen. Sluiten we nu een geschikt lampje (afb. 2 en 3) aan op deze twee strippen dan is bij een „volle" batterij (en een heel lampje) het meest opvallende dat het lampje licht gaat geven; iets minder valt op dat het lampje wat warm wordt; maar verborgen blijft dat door het draadje in het lampje (het gloeidraadje) een stroom gaat lopen. Toch is er zonder deze stroom geen licht en geen warmte. Deze stroom is het gevolg van de spanning van de batterij. De grootte van die stroom kan worden gemeten, maar die moeite behoeven we niet te doen, want op het lampje staat b.v. 4,5 V/0,3 A, wat wil zeggen 4,5 volt en 0,3 ampère.
Het eerste is de spanning waarop het lampje aangesloten mag worden en het tweede de stroom die dan gaat lopen. Waarom is die stroom niet groter of kleiner? Dat is te danken aan een derde gegeven, namelijk de weerstand van het lampje, dus de weerstand, die

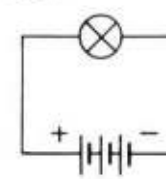


Afb. 1. Diverse batterijen

Afb. 2. Gloeilampje



Afb. 3. Platte batterij met gloeilampje



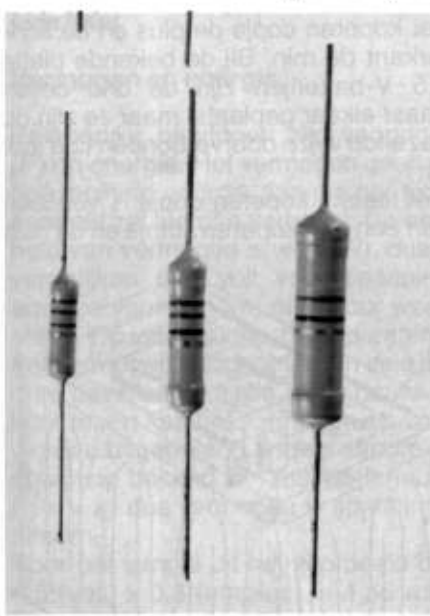
Afb. 4. Schematische voorstelling van afb. 3

het gloeidraadje biedt aan ,,de elektriciteit''. Deze weerstand is bij het lampje eenvoudig uit te rekenen volgens de ,,wet van Ohm'', de bekendste wet in de elektriciteitsleer. Het lampje van het voorbeeld heeft (als het brandt) een weerstand van 15 ohm, namelijk 4,5 (volt) gedeeld door 0,3 (ampère).
Teruggerekend 0,3 (ampère) x 15 (ohm) = 4,5 (volt), of wel stroom x weerstand = spanning en in symbolen I x R = V. Anders gerangschikt:

$V = I \times R$ of $I = \frac{V}{R}$ $(I = V : R)$ of

$R = \frac{V}{I}$ $(R = V : I)$

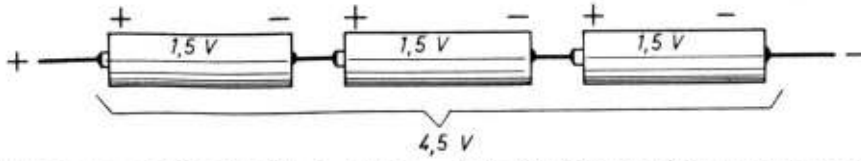
Het hoofddoel van het lampje is licht geven; dat het daarom weerstand moet hebben is eigenlijk bijzaak. Dat is anders bij weerstanden, die als onderdeel ,,op-zich-zelf'' bestaan en veel worden toegepast in de elektronica.
Zo'n weerstand ziet er gewoonlijk uit



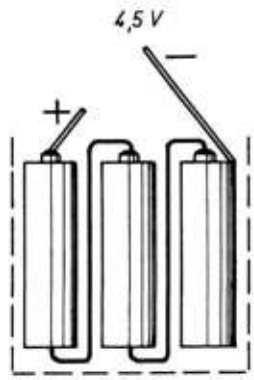
Afb. 5. Weerstanden met verschillende belastbaarheden.

als een staafje met twee draadjes en wordt in verschillende waarden gemaakt en gebruikt (afb. 5).
Nemen we zo'n weerstand van 15 ohm en sluiten we die op de 4,5 volts-batterij aan, dan is de situatie elektrisch hetzelfde als bij het lampje; weer loopt er een stroom van 4,5 : 15 = 0,3 A; de batterij merkt het verschil niet eens.
Wij wel, want de weerstand geeft geen licht, wordt een beetje warm, maar dat is bij een weerstand van flink formaat (en deze stroom) nauwelijks merkbaar.
Uit bovenstaande blijkt dat stroom het gevolg is van spanning en dat de grootte van de stroom wordt bepaald door weerstand (waardoor die weerstand wordt gevormd is minder belangrijk).
Bij een bepaalde vaste spanning geldt: hoe groter de weerstand hoe kleiner de stroom $I = \frac{V}{R}$
Bij een vaste weerstand is van toepassing: hoe hoger de spanning hoe groter de stroom.
Nu krijgen we een van die complicaties die het geheel onoverzichtelijker dreigen te maken: het ,,theoretische'' lampje 4,5 V/0,3 A zou op een 4,5 volt-batterij niet voldoen.
Dat komt door de weerstand, die de batterij zelf heeft (,,inwendige weerstand'') waardoor 4,5 V alleen aanwezig is indien niets wordt aangesloten, hoogstens een voltmeter.
Zodra noemenswaardige stroom wordt afgenomen, daalt de spanning aan de aansluitlippen. Die spanningsdaling is weer uit te rekenen met I x R = V waarin I de stroom is (in ons voorbeeld 0,3 A), R de inwendige weerstand (b.v. 3 ohm) en V de spanningsdaling aan de klemmen.
Deze kan dus gemakkelijk 0,3 x 3 = 0,9 volt zijn.
Voor het lampje (of iets anders) blijft dan over 4,5 — 0,9 = 3,6 volt.
In een zaklantaarn wordt op een 4,5 V-batterij inderdaad meestal een 3,6 V-lampje gebruikt, op een 1,5 V-batterij een 1,2 V-lampje en op een 3 V-batterij een 2,4 V-lampje. Kijk de zaklantaarn in huis er maar eens op na.
Bij een spanningsbron die van nature een lage inwendige weerstand heeft (b.v. een accu) gaat dit grapje niet meer op. Een autolampje voor een auto met 12 V-installatie moet wel degelijk geschikt zijn voor 12 V. (Dat een 12 V-auto-accu wel eens een hogere

Afb. 6. Drie cellen in serie.

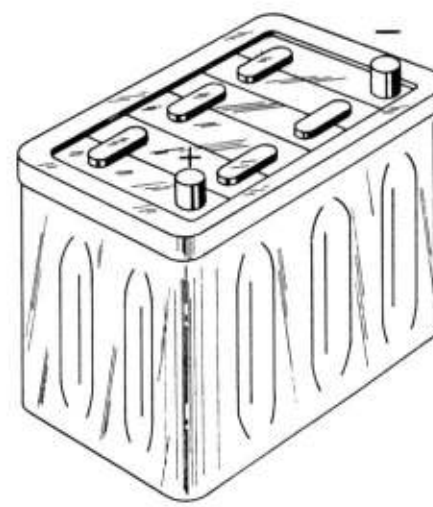


of lagere spanning heeft, is grotendeels aan iets anders te wijten).
De platte batterij van 4,5 V heeft twee verschillende aansluitlippen: een lange en een korte, maar dat is alleen het uiterlijk. De twee lippen zijn echter ook elektrisch verschillend, de korte lip is namelijk de plus (+) aansluiting en de lange de min (—) aansluiting. Dat is een indicatie voor de stroomrichting indien we b.v. een lampje erop aansluiten. In de elektriciteitsleer wordt aangehouden dat de stroom van plus naar min loopt. In de voorbeelden, lampje en weerstand, maakt het niets uit hoe de stroomrichting is, het effect is hetzelfde. Bij andere elektrische apparaten en zeker bij elektronische schakelingen is het wel degelijk van belang hoe plus en min worden aangesloten. Dat is ook het geval indien we uit elementen (cellen) batterijen samenstellen.



Afb. 7. Ook de platte 4½ volts-batterij bestaat uit drie cellen van 1½ volt in serie.

De algemeen bekende batterijen zijn alle samengesteld uit 1,5 volt-cellen. Deze spanning per cel hebben we niet in de hand; ze ontstaat namelijk door een chemisch proces waarin voornamelijk zink, kool en salmiak meespelen.
Een 4,5 V-batterij bestaat daarom uit drie 1,5 V-cellen in serie, dat wil zeggen achter elkaar (afb. 6); de plus van de tweede batterij aan de min van de eerste, de plus van de derde aan de min van de tweede. De spanningen per cel tellen dan bij elkaar op. Zouden we één cel omkeren dan werkt de 1,5 V van die cel de 2 x 1,5 V van de andere twee tegen en houden we maar 1,5 V over!
De z.g. „penlite" batterijen (eigenlijk elementen) bestaan uit één cel (afb. 1c) de dikke monocellen (afb. 1b) ook uit één cel, de 9 V-transistorbatterijen (afb. 1d) uit 6 cellen (6 x 1,5 = 9).
Van een „penlite" en een monocel is het koperen dopje de plus en de achterkant de min. Bij de bekende platte 4,5 V-batterijen zijn de drie cellen naast elkaar geplaatst maar ze zijn op dezelfde wijze doorverbonden (zie afb. 7).
Het laatste koperen dopje is voorzien van een kort koperen stripje en de huls



Afb. 8. Ook de bekende auto-accu is opgebouwd uit cellen; een 12 volts-accu uit zes stuks van elk 2 volt.

van de eerste cel van een lange koperen strip.
Bij de sloop van een oude batterij is e.e.a. gemakkelijk terug te vinden.
Een andere bekende spanningsbron is een accu; de meest bekende is het autotype, tegenwoordig meestal 12 V. Ook zo'n 12 V-accu is opgebouwd uit cellen, maar deze hebben (meestal) een spanning van ca 2 V. Een accu is dus opgebouwd uit 6 cellen (6 x 2 = 12, afb. 8). Een accu wekt overigens geen spanning op maar bewaart ,,elektriciteit'' ook via een chemisch procedé.
Een spanningsbron die veel algemener is laten we nog even onbesproken, namelijk: ,,het stopcontact'' ofwel het elektriciteitsnet dat we allemaal in huis hebben. Het verschil met de tot nu toe aangehaalde bronnen is groot.
Ten eerste is de spanning veel hoger: 220 volt (vergelijk met 12 V auto-accu) en ten tweede: deze spanning en dus ook de stroom zijn niet constant! Hierover later.

Vermogen en energie

Belangrijke begrippen zijn vermogen (P) en energie. Het vermogen geeft de hoeveelheid energie aan die per tijdseenheid zal worden verbruikt. De eenheid van vermogen is watt (W), dus te vergelijken met volt voor spanning, ampère voor stroom, ohm voor weerstand. Op vele elektrische apparaten is het vermogen aangegeven. In vele andere gevallen (niet alle, maar daarover later meer) kan het vermogen als volgt worden uitgerekend. Indien stroom en spanning bekend zijn met de formule: $P = V \times I$ dus vermogen = spanning x stroom.
Voor het lampje uit het voorbeeld dus 4,5 (volt) x 0,3 (ampère) = 1,35 watt.
Soms is óf de stroom óf de spanning niet bekend; dan kunnen we afgeleide formules gebruiken.
In de formule $P = V \times I$ kunnen we V ook vervangen door $I \times R$ ($V = I \times R$); we krijgen dan $P = I \times R \times I$ of $P = I^2 \times R$.
Op overeenkomstige wijze kunnen we I vervangen door V : R, dus $\frac{V}{R}$ met als uitkomst

$$P = \frac{V \times V}{R} \text{ of } P = \frac{V^2}{R}$$

Het vermogen (de behoefte aan energie) van een weerstand van 100 ohm aangesloten op een spanning van 4,5 V is dus

$$\frac{V^2}{R} = \frac{4{,}5 \times 4{,}5}{100} = \frac{20{,}25}{100}$$

= 0,2025 watt.
Een weerstand van 10 ohm waardoor een stroom van 0,5 ampère loopt, wordt belast met: $I^2 \times R = 0{,}5 \times 0{,}5 \times 10 = 0{,}25 \times 10 = 2{,}5$ watt.
Indien we ons bij een lampje aan de voorgeschreven spanning houden zal vanzelf een bepaalde stroom lopen en wordt het lampje niet overbelast.
Bij een weerstand wordt geen spanning of stroom voorgeschreven maar wordt wel de maximale belastbaarheid genoemd. We kennen ⅛ watt-weerstanden, ¼ watt-weerstanden enz. De weerstand van 100 ohm uit bovenstaand voorbeeld moet bestand zijn tegen 0,2025 watt; we kunnen hiervoor dus een ¼ watt (0,25 W)-weerstand gebruiken maar er is geen enkel bezwaar om daar een 1 W- of zelfs een 10 W-weerstand toe te passen.
De weerstand van 10 ohm uit het tweede voorbeeld moet een belastbaarheid van *minstens* 2,5 W hebben maar beter zal het zijn om een type van 3 of 5 W te gebruiken.
De energie die verbruikt wordt door een lampje, weerstand of apparaat is het vermogen vermenigvuldigd met de tijd waarin het is ingeschakeld. In formule $W = P \times t$.

Kilowatturen

De basiseenheid van energie is wattseconde maar bekender zijn wattuur (= 3600 wattseconde) en kilowattuur (= 1000 wattuur).
Het lampje uit het voorbeeld verbruikt in twee uur:
1,35 (watt) x 2 (uur) = 2,70 wattuur; in drie uur 1,35 x 3 = 4,05 wattuur (Wh) enz. De weerstand van 100 ohm verbruikt volgens voorbeeld in twee uur 0,2025 x 2 = 0,4050 wattuur.

De formule W = P x t kunnen we ook anders schrijven namelijk: W = V x I x t, want V x I = P. Indien deze V (de spanning) constant is hangt het energieverbruik alleen af van de stroom en de tijd, dus van I x t, in ampère (Ah). Bij de gelijkspanningselektriciteitsnetten die we in het begin van het elektrische tijdperk hebben gekend werd inderdaad de energie gemeten met een ampère-uur-meter.
Bij de moderne wisselspanningsnetten worden, zoals we allen weten, kilowattuur-meters gebruikt.
De uitdrukking ampère-uur treffen we nog wel aan bij auto-accu's. De spanning wordt daar constant verondersteld en de energie die de accu maximaal kan „bewaren" wordt dan uitgedrukt in ampère-uur (Ah).
Een 50 Ah/12 V-accu die vol is kan b.v. tien uur lang 5 ampère leveren (bij 12 V). Dat is in wattuur dus 5 (ampère) x 12 (volt) x 10 (uur) = 600 Wh.
Laten we groot licht branden zonder dat de accu wordt bijgeladen dan kunnen we als volgt nagaan wanneer de accu leeg is (mits aan het begin van dit drama de accu vol is). Twee koplampen van ieder 45 watt, twee stadslichten van 5 watt, twee achterlichten van 5 watt. Totaal 110 watt. Maximaal kan de accu, van het voorbeeld, 600 Wh „bevatten". Volle accu dus volkomen leeg in 600 : 110 = ongeveer 5,5 uur.
Een accu is maar zelden helemaal vol en bovendien is veel energie nodig om te starten zodat twee uur onachtzaamheid op deze wijze eigenlijk al te veel is.
Indien we ons bij een elektriciteitsnet bepalen tot gloeilampen en warmtebronnen gaan vele rekenvoorbeelden ook daar op. Bij „TL"-buizen, apparaten met motoren en transformatoren zijn er nog meer factoren in 't spel maar daarover een volgende keer. Een gloeilamp van 100 watt, een gloeilamp van 50 watt en een kacheltje (zonder ventilator) van 500 watt, totale vermogen 650 watt verbruiken in één uur samen 650 x 1 = 650 wattuur; in twee uur 650 x 2 = 1300 wattuur; in drie uur 650 x 3 = 1950 wattuur enz.
De eenheid wattuur is voor een energiemeter wat klein; de getallen zouden onpraktisch groot worden.
Daarom wordt de eenheid kilowattuur gebruikt, afgekort kWh (h van hour) en wordt de meter meestal kilowattuurmeter genoemd.
Een kWh is 1000 Wh; 1300 wattuur is dus 1,3 kWh; 1950 Wh is 1,95 kWh.

Overzicht van tot nu toe gebruikte eenheden:

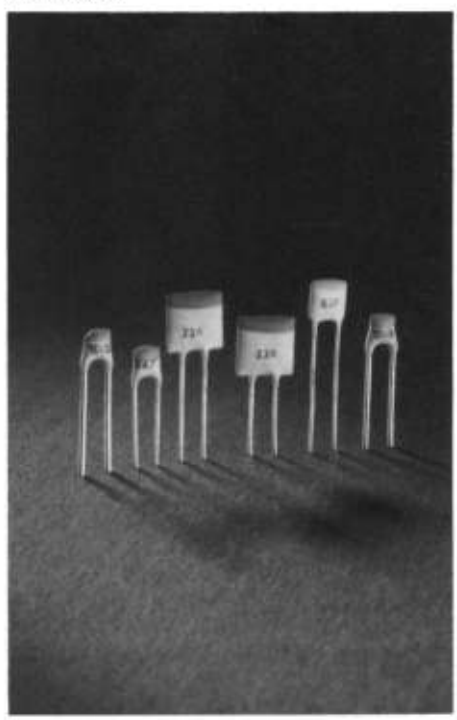
	Symbool	eenheid	Afkorting
stroom	I	ampère	A
spanning	V,	volt,	V
weerstand	R	ohm	Ω
vermogen	P	watt	W
energie	W	wattuur,	Wh[1])
	C	kilowattuur,	kWh
	Q	ampère-uur,	Ah[2])

[1]) basiseenheid wattseconde
[2]) wordt beperkt gebruikt, voornamelijk bij accu's; zie tekst.

Condensatoren

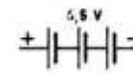
Een 4,5 volts-batterij bestaat uit drie elementen (cellen) van 1,5 V. In een schema (een overzicht van een schakeling) wordt één element getekend zoals in afbeelding 10 is aangegeven. Het is logisch dat een 4,5 V-batterij dan voorgesteld kan worden volgens afbeelding 11. Voor een lampje wordt meestal het teken volgens afbeelding 12 gebruikt. Een lampje aangesloten op een 4,5 V-batterij is al een echte schakeling en wordt getekend zoals afbeelding 13 aangeeft. Vergelijk dit nog even met afbeelding 14 waar lampje en batterij nog ,,gewoon'' getekend zijn.

Afb. 9.
Enkele moderne keramische miniatuur-condensatoren.

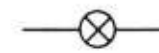


De lijnen tussen lampje en batterij in afbeelding 13 geven de leidingen (,,draden'') aan. Hiervoor moet materiaal worden genomen, dat de ,,elektriciteit'' gemakkelijk doorlaat, met andere woorden materiaal dat weinig weerstand (R) heeft. Heel geschikt is daarvoor koperdraad, eventueel in een

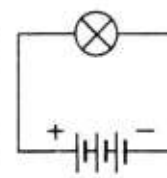
Afb. 10.
Element.



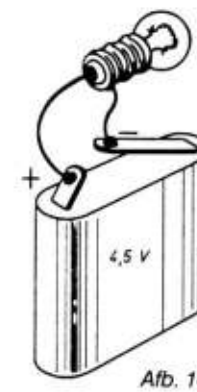
Afb. 11.
Batterij



Afb. 12.



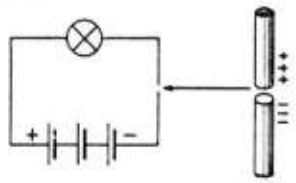
Afb. 13.
Stroomkring



Afb. 14.

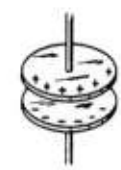
samenstelling van een aantal dunne koperdraadjes (zoals in netsnoer). Om te voorkomen dat, zonder dat het bedoeld wordt, een draad ,,onderweg'' contact maakt met een andere draad of met een onderdeel, wordt meestal geïsoleerd draad of geïsoleerd snoer toegepast. Geïsoleerd wil zeggen omgeven met ,,iets'' dat een zeer hoge weerstand heeft. Tegenwoordig gebruikt men daarvoor dikwijls soepel plastic; kijk de netsnoeren in huis daar maar op na. Voor een stroomloop dient het circuit altijd gesloten te zijn, dus zonder onderbreking van batterij naar lampje en van lampje weer naar batterij. Bij een onderbreking in zo'n draad

(afb. 15) stopt de stroomloop en brandt dus ook het lampje niet meer. Toch gebeurt er nog wel wat in die draad; de batterij zorgt ervoor dat één eind van de draad positief wordt en de andere negatief (afb. 16). De „elektriciteit" zit op de twee uiteinden als het ware klaar om de stroomloop te hervatten. We zeggen dat de draaduiteinden worden opgeladen.



Afb. 15. Afb. 16.

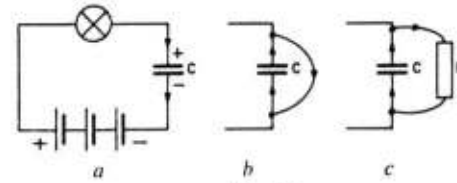
De grootte van die lading („hoeveelheid elektriciteit") wordt bepaald door de spanning tussen de einden en door de capaciteit. De capaciteit tussen de twee einden uit het voorbeeld is niet groot, want deze is evenredig met de tegenover elkaar liggende oppervlakken en omgekeerd evenredig met de afstand. Hoe groter de oppervlakken hoe groter de capaciteit en hoe kleiner de afstand hoe groter de capaciteit. Het is begrijpelijk dat we de capaciteit kunnen vergroten door b.v. twee flinke metalen schijven (afb. 17) aan de draadeinden te solderen. Deze kunnen veel meer lading bevatten dan de draadstompjes. We hebben zo bewust capaciteit veroorzaakt. Een onderdeel speciaal gemaakt ter wille van de capaciteit noemen we een condensator. In de praktijk komt een condensator, bestaande uit twee ronde schijven met lucht ertussen, niet veel voor. Bij de meeste condensatoren wordt in plaats van lucht een vast isolatiemateriaal gebruikt, waardoor de constructie eenvoudiger wordt en bovendien de capaciteit sterk wordt verhoogd. Indien in het voorbeeld van de twee schijven in plaats van lucht, b.v. mica wordt gebruikt is de capaciteit, bij gelijk blijvende afstand, ongeveer zesmaal zo hoog.
Bovendien kan een grote capaciteit niet gemakkelijk worden verkregen bij gebruik van vlakke platen. Meestal worden twee stroken metaalfolie (heel dun metaal), geïsoleerd met dun plastic, opgerold en in een kokertje gestoken (afb. 18). Elke strook folie heeft een aansluitdraad, die aan weerszijden naar buiten worden gevoerd. Op deze wijze kan tussen de twee aansluitdraden een grote capaciteit verkregen worden. Overigens komen allerlei vormen van condensatoren voor, meestal genoemd naar het soort isolatiemateriaal, zoals: lucht-, mica-, polystyreen-, polyester-, keramische condensatoren enz.
Een bijzonder soort condensatoren zijn de elektrolytische condensatoren, waar de isolatie tussen de platen in feite wordt gevormd door een oxidelaagje dat in stand wordt gehouden door de aangesloten gelijkspanning. Dit type condensatoren moet daarom steeds op één bepaalde wijze op plus en min aangesloten worden.
In een schema wordt een condensator voorgesteld door twee even grote streepjes (afb. 19a) die de twee platen symboliseren. Voor een elektrolytische condensator wordt een variant (afb. 19b) gebruikt. Het „open streepje" stelt de plaat voor die altijd positief



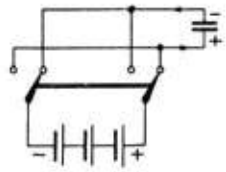
Afb. 17.

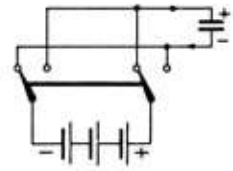
Afb. 18.

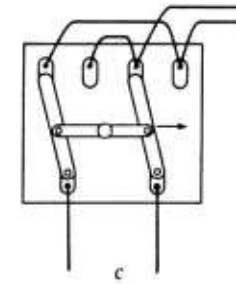
Afb. 19.



Afb. 20.



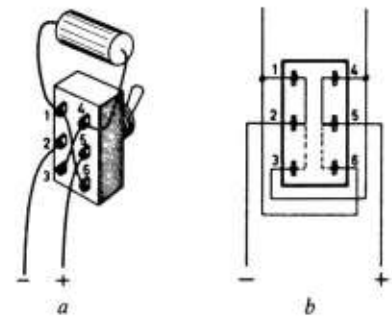




Afb. 21 a/b: Dubbelpolige omschakelaar tussen batterij en condensator; dubbele lijn geeft koppelstuk uit isolatiemateriaal aan.

Afb. 21 c: Vorm van omschakelaar die lijkt op schematekening (21 a en 21 b).

moet zijn ten opzichte van de andere, dicht getekende, plaat.
Vervangen we de draadbreuk van afbeelding 16 door een ,,echte'' condensator dan zal na het aansluiten van de batterij een stroom lopen van één plaat van de condensator via het lampje naar de batterij en van de batterij naar de andere plaat van de condensator, totdat de condensator zover mogelijk geladen is. Dan is de spanning tussen de twee platen van de condensator gelijk aan de batterijspanning. De condensator is ,,vol''. Gedurende korte tijd loopt dus een stroom (een laadstroom). Het lampje dat nog in de schakeling voorkomt, heeft maar een bescheiden functie in het geheel. De laadstroom zal te klein zijn om het lampje te laten branden, maar wel beperkt de weerstand van het lampje enigszins de grootte van de laadstroom. Zonder lampje is de condensator dus iets eerder ,,vol'', dan met het lampje. Nemen we de batterij nu weg dan blijft de condensator geladen; bij een ideale condensator zelfs voor onbeperkte tijd. De isolatie tussen de platen van een condensator is echter nooit ideaal zodat de lading langzamerhand binnendoor weglekt. Dat gaat veel sneller als we de condensator buitenom kortsluiten met een stukje koperdraad. De condensator is dan in zeer korte tijd ontladen. Langer duurt dit als we de condensator ontladen via een weerstand. Hoe groter de weerstand (de ,,waarde'' van de weerstand), des te langer het ontladen duurt.



Afb. 22. Gebruikelijk type dubbele omschakelaar. In één stand wordt 1 met 2 verbonden en 4 met 5; in de andere stand 2 met 3 en 5 met 6. Vergelijk de stroomloop met afbeelding 21.

De stroomrichting is bij het ontladen tegengesteld aan de stroomrichting bij het laden; vergelijk afbeelding 20a met afbeeldingen 20b en 20c.
We zouden de geladen condensator ook andersom op de batterij kunnen aansluiten. De condensator ontlaadt zich dan via de batterij en wordt meteen andersom opgeladen. Herhalen we dit snel achter elkaar dan loopt vrijwel steeds stroom door de draden, zonder dat stroom door de condensator gaat. Het zijn steeds laad- en ontlaadstromen. Dit verschijnsel is wat duidelijker aangegeven in afbeeldingen 21a en 21b. Daar is een ompoolschakelaar aangegeven, waarmede snel de plus en de min op de condensator verwisseld kunnen worden. In afbeelding 21a is de onderste plaat zojuist met de plus aan de batterij verbonden. Een korte tijd loopt een stroom in de aansluitdraden tot de condensator geladen is. Na snel overschakelen naar de situatie volgens afbeelding

21b wordt de condensator ontladen en andersom opgeladen. Let op plus en min bij de condensator en op de stroomrichtingen, die met pijltjes zijn aangegeven. Indien we een spanningsbron zouden hebben die „vanzelf" steeds ompoolt (zonder schakelaar dus) zal er door de aansluitdraden steeds stroom lopen, die regelmatig van richting wisselt. Het is dus een wisselende stroom (een wisselstroom) die door de condensator lijkt te lopen. Een vanzelf ompolende spanningsbron is het wisselspanningsnet dat we allemaal in huis hebben. Voor de zekerheid: wees altijd voorzichting met het stopcontact: *sluit beslist geen condensator bij wijze van proef op het stopcontact aan!*

De functies van condensatoren

In de praktijk zullen we nooit een condensator aantreffen die in z'n eentje op een batterij is aangesloten; ook een serieschakeling van een lampje met een condensator aangesloten op een batterij, is nogal zinloos. In de meeste elektronische apparaten komen echter voor allerlei doeleinden condensatoren voor.

Naar *functie* onderscheiden we o.m. afvlakcondensatoren, koppelcondensatoren, ontkoppelcondensatoren, afstemcondensatoren enz. Later, bij het beschrijven van schakelingen, komen we ze vanzelf weer tegen. In schema's worden condensatoren gewoonlijk aangegeven met de letter C, zoals weerstanden worden aangegeven met de letter R. Ga dit eens na in de schema's in dit boekje.

Het zal niemand verbazen dat er ook eenheden bestaan voor capaciteit en voor lading zoals er ook eenheden bestaan voor b.v. spanning (volt) en stroom (ampère). Voor lading is dat coulomb maar in de praktijk van de elektronica komen we die niet veel tegen, in tegenstelling met de eenheid voor capaciteit (farad) die bijna zo algemeen is als ohm.

De basiseenheid farad (F) is wat groot; in apparaten zal men een condensator met een capaciteit van 1 farad zelden of nooit tegenkomen. Zelfs een duizendste deel (0,001) van een farad komt nog weinig voor maar b.v. wel 0,000.000.001 F. Het gebruik van zoveel nullen is lastig en werkt vergissingen in de hand en daarom gebruiken we heel dikwijls microfarad (μF) = 0,000.001 F en nanofarad (nF) = 0,000.000.001 F en picofarad (pF) = 0,000.000.000.001 F.

Deze methode van verkleinen van een eenheid is, evenals het vergroten van een eenheid, algemeen gebruikelijk; denk maar aan millimeter = 0,001 meter en kilometer = 1000 meter. In onderdelenlijsten en lijsten met technische gegevens komen b.v. ook voor kilo-ohm (kΩ) = 1000 ohm, megohm (MΩ) = 1.000.000 ohm, millivolt (mV) = 0,001 volt enz. In de volgende tabel is weer een overzicht gegeven van de tot nu toe besproken eenheden, terwijl tevens voorbeelden van afgeleide eenheden zijn aangegeven.

Overzicht van tot nu toe gebruikte eenheden

	Symbool	Eenheid	Afkorting	Voorbeelden van afgeleide eenheden
stroom	I	ampère	A	mA, μA
spanning	V	volt	V	mV, μV
weerstand	R	ohm	Ω	kΩ, MΩ
vermogen	P	watt	W	mW
energie	W	wattseconde	Ws	Wh, kWh
capaciteit	C	farad	F	μF, nF, pF
lading	Q	coulomb	C	
tijd	t	seconde	s	μs, h

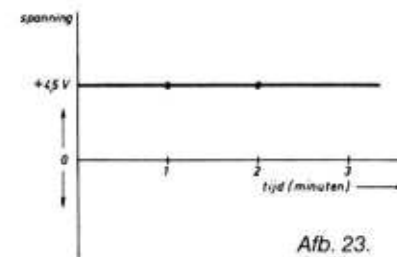
m = milli = 0,001 x
μ = micro = 0,000.001 x
n = nano = 0,000.000.001 x
p = pico = 0,000.000.000.001 x

k = kilo = 1000 x
M = mega = 1.000.000 x
h (hour) = uur = 3600 s

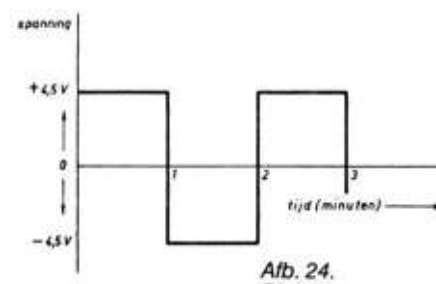
Wisselspanning en wisselstroom

Wat is een wisselspanning?
Tot nu toe hebben wij vrijwel steeds over gelijkspanning gesproken. Wij zullen nu enkele voorzichtige stapjes doen op het gladdere ijs van de wisselstroomtheorie.
De gelijkspanningen waarover wij tot dusver hebben gesproken bleven constant in grootte en ook in polariteit. Eén pool van de batterij was steeds plus en de andere steeds min. Indien we in een schakeling plus en min willen verwisselen, moeten we dat buiten de batterij doen, bij voorbeeld met een ompoolschakelaar. We beschikken echter over een heel bekende spanningsbron waarvan „de polen" in een bepaald ritme beurtelings plus en min zijn en die bovendien geen constante spanning levert. Vrijwel alle elektriciteitsnetten in Nederland voldoen aan deze beschrijving. Laten we ons eerst een duidelijk beeld vormen van het verschil tussen gelijkspanning en wisselspanning.
Indien we op een batterij een voltmeter aansluiten zal deze bij voorbeeld 4,5 V aanwijzen. Laten we de meter aangesloten, dan zal na 1 minuut, na 15 minuten, na een half uur, na uren en zelfs na dagen de meter nog steeds 4,5 V aanwijzen (bij een goede batterij en een dito meter tenminste). Dit kunnen we in een grafiek uitzetten (zie afbeelding 23). De verticale lijn is voorzien van een spanningsschaal in volt en de horizontale lijn is een tijdschaal in bij voorbeeld minuten. De eerste meting vindt plaats bij 0 minuten en bedraagt 4,5 V. We zetten dus boven de nul een stip bij 4,5 V. Na 2 minuten doen we nogmaals hetzelfde en zo voort, zolang we de proef laten duren. Verbinden we de gevonden punten door een lijn, dan zal blijken dat deze evenwijdig loopt aan de horizontale tijdverdeling.

Interessanter is de karakteristiek van het spanningsverloop aan de uitgang van een ompoolschakelaar die is aangesloten op dezelfde batterij. Als we precies om de minuut ompolen en een meter gebruiken die het nulpunt in het midden heeft, zullen we bij het uitzetten van de meetresultaten een karakteristiek (grafiek) volgens afbeelding 24 verkrijgen. Vanaf het punt 0 minuten gezien zal de spanning dan eerst gedurende 1 minuut +4,5 V zijn, een zeer kort moment nul, dan —4,5 V, na 2 minuten weer +4,5 V, na 3 minuten —4,5 V en zo voort.
Dit is een wisselspanning waarvan alleen de polariteit wisselt; de spanning blijft steeds even groot. Zulke wisselspanningen komen ook in de praktijk wel voor en worden dan meestal blokspanningen genoemd naar de vorm van de karakteristiek.



Afb. 23. Gelijkspanning



Afb. 24. Blok-wisselspanning

Sinusvormige wisselspanningen

Zouden we op dezelfde wijze het verloop van een ,,echte'' wisselspanning kunnen meten, die bij voorbeeld via een transformator afkomstig is van het elektriciteitsnet, dan krijgen we een grafiek volgens afbeelding 25. We zien daar dat niet alleen de polariteit regelmatig omkeert maar ook dat de spanning niet steeds gelijk is. Op de punten a en g is de spanning zelfs nul; bij b is de spanning 1 V, bij c weer wat meer, bij d maximaal, bij e weer lager, bij f nog lager en bij g weer nul. Bij i is de spanning even groot als bij f, maar nu negatief; bij j is de spanning maximaal negatief, bij a weer nul en zo voort. Grafisch (d.w.z. getekend) is het spanningsverloop dus een lijn die zich om de horizontale tijdlijn slingert.

Bij de netspanning is het verloop niet willekeurig; de lijn (de curve) is afgeleid van een cirkel. Deze cirkel (zie afbeelding 25 links) heeft rondom dezelfde tijdverdeling als die tussen de punten $a_1 \ldots g \ldots a_2$, rechts in afbeelding 25. Op elk tijdstip is de spanning gelijk aan de afstand tussen het desbetreffende punt op de cirkel en de horizontale lijn; voor punt c is dit aangegeven met een dikker lijntje. De lengte van deze lijn tussen c en de horizontale lijn is gelijk aan de straal r (afbeelding 25) vermenigvuldigd met de sinus van de hoek tussen r en de horizontale lijn (g-a).

We zouden zo kunnen uitrekenen hoe groot de spanning is op een groot aantal tijdstippen en deze waarden uitzetten in de grafiek. Het is echter ook mogelijk de grafiek te construeren; zie hiervoor de horizontale hulplijntjes in afbeelding 25.

We zijn wat dieper ingegaan op dit facet van de wisselspanningstheorie omdat het begrip sinuscurve nogal eens voorkomt, evenals de begrippen sinusspanning, sinusvormige spanning, sinusvermogen (bij luidsprekers) en dergelijke.

Het begrip frequentie

Het meten van een wisselspanning op de wijze die we voor de gelijkspanning (afbeelding 23) en de blokspanning (afbeelding 24) hebben aangegeven is voor ,,normale'' wisselspanningen niet mogelijk. De wisselingen volgen elkaar doorgaans zo snel op dat een gewone voltmeter ze niet kan volgen. Bij het elektriciteitsnet komt één periode (dat is de afstand $a_1 \ldots a_2$ in afbeelding 25) vijftigmaal per seconde voor. Men zegt dan dat de *frequentie,* dat is het aantal perioden per seconde, 50 hertz (Hz) bedraagt.

Het zal duidelijk zijn dat van een voltmeter niet mag worden verwacht dat hij dit tempo bijhoudt. Wel is het mogelijk een wisselspanning zichtbaar te maken op een oscilloscoop, een ver familielid van de televisie-ontvanger. Bij juiste aansluiting en instelling van dit instrument verschijnt op het scherm (dat kleiner is dan dat van een televisietoestel) een curve zoals in afbeelding 25 (rechts) is getekend.

De elektrische vorm van geluid is ook een wisselspanning. Daardoor is het in het algemeen mogelijk een wisselspanning om te zetten in geluid, bij voorbeeld met behulp van een luidspreker. Maakt men een wisselspanning met een frequentie van 50 Hz (hertz) hoorbaar, dan klinkt dat als een erg lage toon. Bij een hogere frequentie ontstaat een hogere toon. Wisselspanningen met lagere frequenties, maar vooral ook met hogere frequenties, komen in de elektronica veel voor, ook buiten het hoorbare gebied. Dat hoorbare gebied wordt royaal bestreken door een goede grammofoonversterker die de signalen met frequenties tussen bij voorbeeld 20 en 100.000 Hz kan verwerken.

Een middengolfzender heeft een draaggolf met een frequentie van bij voorbeeld 1.500.000 Hz (1500 kHz); onder meer bij televisie en radar komen nog veel hogere frequenties voor.

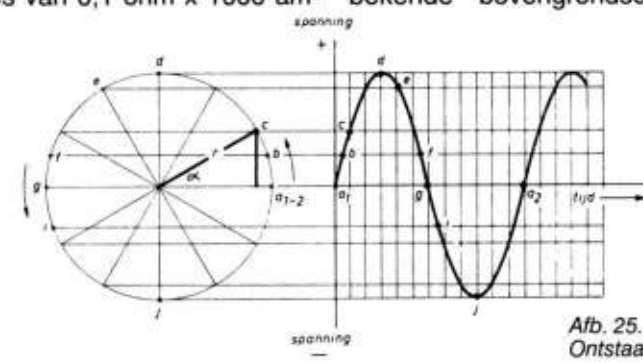
Waarom wisselspanningen?

We blijven nog even bij de spanning van het elektriciteitsnet, die een frequentie van 50 Hz heeft. Waarom wordt voor de energievoorziening vrijwel altijd wisselspanning gebruikt hoewel gelijkspanning, zeker grafisch ge-

zien, zoveel mooier, gelijkmatiger en logischer is?
Voor veel elektrische apparaten maakt het niets uit of de ,,mooie'' gelijkspanning of de ,,lelijke'' wisselspanning gebruikt wordt. Een gloeilamp brandt op wisselspanning even goed als op gelijkspanning en een elektrisch kacheltje wordt even warm. Voor deze apparaten maakt het dus helemaal niets uit. Andere apparaten, zoals elektromotoren, kunnen even goed voor wisselspanning als voor gelijkspanning worden geconstrueerd (wat niet wil zeggen dat elke gelijkspanningsmotor op wisselspanning loopt en omgekeerd); ook hier heeft wisselspanning dus geen bezwaar. Apparaten die beslist op gelijkspanning moeten werken, zoals radio- en televisie-ontvangers, vormen ook geen probleem omdat het eenvoudig is om een wisselspanning om te zetten in een gelijkspanning (andersom is veel moeilijker). Deze apparaten hebben dan ook altijd een zogenaamd voedingsgedeelte, waarin deze omzetting plaats vindt.
Het belangrijkste voordeel van wisselspanning boven gelijkspanning is dat de ,,grootte'' zo gemakkelijk is te veranderen. Een hoge wisselspanning kan op eenvoudige wijze worden omgezet in een lage (of andersom) en dat is onder meer van groot belang voor een doelmatige energiedistributie. Een stadswijk gebruikt in totaal een stroom van duizenden ampère bij een spanning van 220 volt; deze stroom zou geweldig dikke kabels vergen. Een dikke kabel met een (zeer lage) weerstand van 0,1 ohm veroorzaakt bij een stroom van 1000 ampère al een spanningsverlies van 0,1 ohm x 1000 ampère = 100 volt. Hetzelfde vermogen kan echter ook worden overgebracht bij een veel hogere spanning, waardoor de stroomsterkte veel lager kan zijn. Voorbeeld: 220 (V) x 1000 (A) = 220.000 (W), maar 10.000 (V) x 22 (A) is ook 220.000 (W) (volgens de formule uit hoofdstuk 1 : $V \times I = P$).
Voor een stroom van 22 ampère kunnen veel dunnere kabels worden gebruikt, en toch zal er weinig spanningsverlies optreden. Is de weerstand van de kabel bij voorbeel 1ohm, dan is het spanningsverlies bij een stroom van 22 ampère gelijk aan 1 ohm x 22 ampère = 22 volt, wat in verhouding tot de spanning van 10.000 volt erg weinig is (circa ¼ %). De algemeen gebruikelijke methode is dan ook om de ,,elektriciteitshuisjes'' die op vele plaatsen staan opgesteld, te voeden met bij voorbeeld 10.000 volt en deze spanning daar over te zetten, te ,,transformeren'' in 220 volt. Uit dat elektriciteitshuisje (transformatorhuisje) komen dan betrekkelijk korte kabels waarvan de huisaansluitingen zijn afgetakt.

Hoogspanning

Door het gemak waarmee de wisselspanning omhoog en omlaag kan worden getransformeerd kan men volstaan met betrekkelijk weinig elektriciteitscentrales (,,elektriciteitsfabrieken'') die op de meest geschikte plaatsen zijn gebouwd, bij voorbeeld aan een rivier in verband met de aanvoer van brandstof of, in het buitenland, in de bergen waar waterkrachtcentrales mogelijk zijn.
Het transport vindt dan plaats via de bekende bovengrondse hoogspan-



Afb. 25.
Ontstaan van sinusvorm

ningsleidingen, soms met een spanning van wel 380.000 volt, naar knooppunten bij de grote steden. Daar wordt de wisselspanning getransformeerd naar bij voorbeeld 10.000 volt die met ondergrondse kabels kan worden toegevoerd aan de eerder genoemde transformatorhuisjes in de verschillende stadswijken. In huis wordt het transformatieproces soms nog voortgezet omdat voor verschillende doeleinden 220 volt nog te hoog of te gevaarlijk is. Denk aan de bekende beltransformator die van 220 volt 8 volt maakt, en een modelspoortransformator die 220 volt omzet in bij voorbeeld 16 volt.
Het apparaat waarmee omhoog of omlaag wordt getransformeerd heet transformator. In principe zijn alle transformatoren aan elkaar gelijk, maar de constructie en de afmetingen kunnen sterk verschillen. Uitersten zijn wel de kleine en eenvoudige beltransformator en de zeer grote transformatoren die in de transformatorhuisjes en bij de hoogspanningsstations van de elektriciteitsbedrijven voorkomen.
In een volgend hoofdstuk zal de transformator nog ter sprake komen.

Hoe groot is een wisselspanning?
Als we de grafiek van afbeelding 25 nog eens bezien, lijkt het moeilijk om aan te geven hoe groot een wisselspanning is; de grootte is immers niet constant. Denkbaar zou zijn om daarvoor de maximale spanning of de gemiddelde spanning te gebruiken, maar het is beter om de effectieve spanning te nemen. Een wisselspanning heeft een effectieve waarde van bij voorbeeld 220 V als die spanning evenveel effect heeft als een gelijkspanning van 220 V. Onder ,,hetzelfde effect'' verstaan we bij voorbeeld dat een gloeilamp evenveel licht geeft of dat een verwarmingselement evenveel warmte afgeeft. Een wisselspanning die hieraan voldoet heeft uiteraard wel een grotere maximale spanning; de toppen van de curve van afbeelding 25 liggen op 1,41 maal de effectieve waarde.
Wanneer zonder nadere aanduiding over een wisselspanning van 220 V wordt gesproken, is altijd de effectieve waarde bedoeld. De maximale waarde (vaak de ,,amplitude'' genoemd) is in dat geval dus 1,41 x 220 V = 310,2 V.
De meeste elektrische apparaten zijn óf voor wisselspanning óf voor gelijkspanning geconstrueerd. Ook vele ,,losse onderdelen'' reageren verschillend op deze twee spanningssoorten. We hebben dit al gezien bij de condensatoren en later zullen we dit nog zien bij onder meer de spoelen en de transformatoren.
We moeten overigens wel beseffen dat we in vele gevallen helemaal geen keuze hebben. Enerzijds kunnen bij voorbeeld transistors niet op wisselspanning werken en anderzijds kunnen we onder andere niet buiten wisselspanningen als we geluid omzetten in een elektrisch signaal, bij voorbeeld met een microfoon of een toonopnemer. Weliswaar zijn dat niet van die mooie, regelmatige wisselspanningen zoals in afbeelding 25 getekend is, maar ze hebben wel de hoofdeigenschappen van een wisselspanning: het wisselen van polariteit en grootte.

Het meten van wisselspanningen
We hebben gezien dat een ,,gewone'' voltmeter, zoals we gebruiken voor gelijkspanning, geen kans ziet de snelle wisselingen van de wisselspanning te volgen; bovendien zouden we dan toch geen duidelijke indicatie van de grootte van de spanning krijgen. Het is echter mogelijk wisselspanningen te meten met een meter die op ,,het effect werkt''; deze kan dus zowel voor gelijkspanning als voor de effectieve waarde van de wisselspanning gebruikt worden. Het bezwaar van zo'n meter (weekijzermeter) is echter dat het stroomverbruik hoog is en dat de schaal niet lineair is. De meer gebruikelijke draaispoelmeter heeft deze nadelen niet en kan met een eenvoudige extra voorziening toch geschikt worden gemaakt voor het meten van wisselspanning. Dit verklaart waarom een universele meter altijd verschillende instellingen heeft voor wissel- en gelijkspanning (en voor wissel- en gelijkstroom).

Spoelen en transformatoren

De spoel

Wisselspanningen en wisselstromen spelen een belangrijke rol in de elektrotechniek en vooral ook in de elektronica. We hebben gezien dat een gloeilamp, een verwarmingselement en dergelijke even goed werken op wisselspanning als op gelijkspanning. Bij condensatoren is er echter een duidelijk verschil: bij aansluiting van een condensator op een gelijkspanning vloeit er alleen maar even een laadstroom, maar bij wisselspanning loopt er voortdurend stroom (in feite steeds laad- en ontlaadstromen).

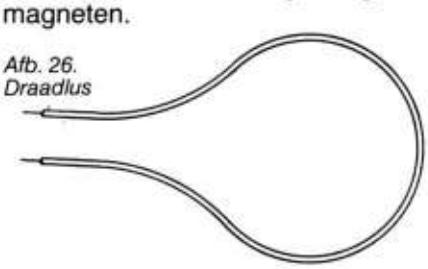
In de elektronica wordt veel gebruik gemaakt van een ander onderdeel dat verschillend reageert op de twee spanningssoorten. Dat is de spoel, die we in vele vormen tegenkomen: als afstemspoel, smoorspoel, spreekspoel (in luidsprekers), relaisspoel of transformatorspoel, om maar enkele voorbeelden te noemen.

De eenvoudigste vorm van de spoel is een draadlus (zie afbeelding 26), die overigens niet zo'n mooie cirkelvorm hoeft te hebben. In slordige vorm komt zo'n spoel voor in alle apparaten, al is dat meestal onbedoeld. Een stuk montagedraad of een koperspoor van een montageplaatje met gedrukte bedrading benadert al gauw de vorm van een lus en dat kan wel eens problemen geven.

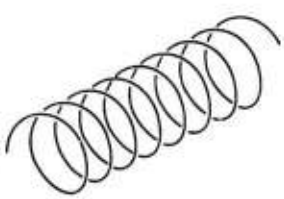
Een echte spoel, die dus bewust gemaakt is als spoel, heeft de basisvorm die in afbeelding 27 is weergegeven. Dat is dus een spiraalvormig gewikkelde draad, meestal koperdraad. Soms wordt de spoel gewikkeld op een „spoelvorm", die tegenwoordig meestal van kunststof is vervaardigd. In andere gevallen gebruikt men geen spoelvorm en is de spoel vrijdragend.

Het zal duidelijk zijn dat de draad geisoleerd moet zijn als de windingen van de spoel tegen of over elkaar liggen.

Voor gelijkspanning is een spoel eigenlijk alleen een stuk draad met precies evenveel weerstand als wanneer de draad gestrekt zou zijn. Alleen bij het in- of uitschakelen van de spanning is dit even anders. Dit „afwijkende gedrag" is bij wisselspanning veel sterker doordat daarbij de spanning elke halve periode als het ware wordt in- en uitgeschakeld. Een en ander wordt veroorzaakt door de magnetische eigenschappen die een spoel heeft. Deze komen in sommige opzichten overeen met de eigenschappen van gewone, zogenaamde permanente magneten. Daarom zullen we nu eerst even stilstaan bij die gewone magneten.



Afb. 26. Draadlus



Afb. 27. Spoel

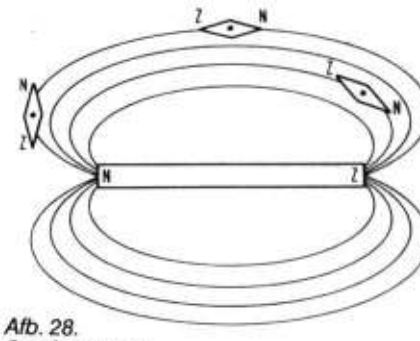
Permanente magneten

Een permanente magneet is een stuk staal of een ander materiaal dat magnetische eigenschappen heeft. Dat wil zeggen dat hij de eigenschap heeft andere magneten aan te trekken of af te stoten en „gewoon", niet magnetisch

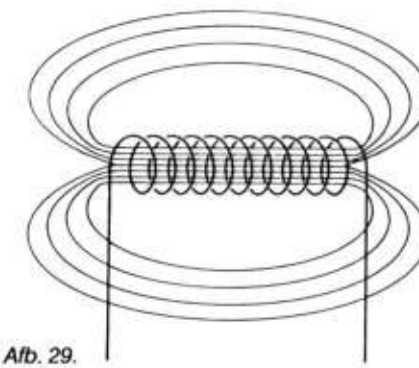
gemaakt staal of ijzer aan te trekken.
Elke magneet heeft de neiging een bepaalde stand ten opzichte van de aardas in te nemen. Dat is duidelijk waar te nemen bij de naald van een kompas, maar elke magneet heeft diezelfde neiging. Het einde van de magneet dat naar de noordpool van de aarde wil wijzen noemt men de magnetische noordpool; het andere einde is de magnetische zuidpool. De aantrekkingskracht voor ijzer en andere magnetische materialen verloopt volgens krachtlijnen, die te zamen een magnetisch krachtveld vormen. In afbeelding 28 zijn enkele krachtlijnen van een staafmagneet getekend. Elke krachtlijn begint bij de ene pool en eindigt bij de andere pool. In werkelijkheid zijn er oneindig veel krachtlijnen, maar voor de duidelijkheid hebben wij er maar een paar getekend.
Een kompasnaald, in feite een klein magneetje dat gemakkelijk draaibaar is opgesteld, zal ten opzichte van de grote magneet telkens een andere stand innemen en wel zo dat zij steeds evenwijdig staat aan de krachtlijnen ter plaatse; dit is in afbeelding 28 geschetst.
Als we twee magneten nemen, dan zal de noordpool van de ene magneet de zuidpool van de andere magneet aantrekken en de noordpool van die andere magneet afstoten („ongelijke polen trekken elkaar aan"). Uit wat wij over de kompasnaald schreven blijkt dus dat, elektrotechnisch gezien, de magnetische noordpool van de aarde bij de geografische zuidpool ligt.

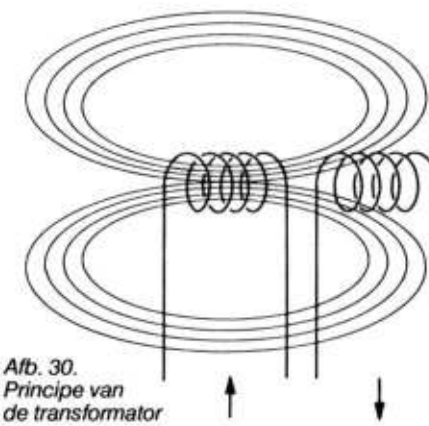
Magnetisme en elektriciteit hangen nauw samen

Laten we door een spoel een gelijkstroom lopen dan zal er eveneens een magnetisch krachtveld ontstaan, zoals in afbeelding 29 is getekend. Maar dit veld verdwijnt weer zodra de stroom wordt onderbroken. Bovendien is de polarisatie, de kant waar noord- en zuidpool verschijnen, afhankelijk van de stroomrichting. Met andere woorden: als we plus en min van de spoel verwisselen, zullen ook noord- en zuidpool van plaats verwisselen. Sluiten we de spoel aan op een wisselspanning, dan zullen noord- en zuidpool voortdurend van plaats verwisselen, met een tempo dat afhankelijk is van de frequentie van de wisselspanning.
Uit het voorgaande blijkt dus dat een elektrische stroom door een spoel een magnetisch veld veroorzaakt. Ander-



Afb. 28.
Staafmagneet


Afb. 29.
Elektromagneet


Afb. 30.
Principe van de transformator

zijds zal in een spoel een spanning worden opgewekt wanneer we in de buurt van die spoel een magneet bewegen. Schuiven we de magneet in de spoel, dan zal één draadeinde positief worden en het andere negatief. Trekken we vervolgens de magneet *uit* de spoel, dan zijn plus en min juist andersom. Bewegen we de magneet heen en weer, dan zal tussen de uiteinden van de spoel een wisselspanning ontstaan. Het zal begrijpelijk zijn dat we hetzelfde effect krijgen als we de magneet stilhouden en de spoel bewegen. Voorwaarde is alleen dat de krachtlijnen de spoelwindingen blijven snijden. Zodra dit niet meer het geval is en spoel en magneet niet meer ten opzichte van elkaar bewegen, zal er geen spanning meer worden opgewekt.

Een eenvoudige transformator

De magneet uit de vorige paragraaf kunnen we vervangen door een elektromagneet; dat is een spoel waardoor gelijkstroom loopt. Het blijft dan nog steeds nodig de elektromagneet of de spoel te bewegen, zodat de windingen van de spoel door de krachtlijnen van de (elektro)magneet worden gesneden. Anders gezegd: voor het opwekken van een spanning in de spoel is het nodig dat de sterkte van het magnetisch veld (het aantal krachtlijnen) *verandert*.

Het aantal krachtlijnen kunnen we ook voortdurend laten ,,veranderen'' door de elektromagneet op een wisselspanning aan te sluiten. De stroom door de spoel, en daarmee het magnetisch veld, zal dan voortdurend van grootte (en van richting) veranderen. Het magnetisch veld zal dan als het ware in beweging zijn.

Als we dus één spoel aansluiten op een wisselspanning en de andere spoel zo plaatsen dat deze ook doorlopen wordt door de krachtlijnen, zal in deze tweede spoel een wisselspanning worden opgewekt (zie afbeelding 30). We zeggen nu dat de spoelen *inductief gekoppeld* zijn en dat de ene spoel in de andere een spanning *induceert*. Dit is het principe waarop transformatoren berusten. Later zullen we de transformator nog tegenkomen.

Wat is zelfinductie?

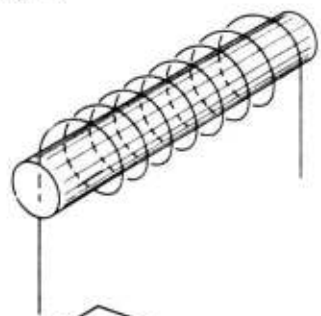
Voordat we het zijstapje naar de magneten maakten hebben we gezien dat een spoel voor gelijkspanning eigenlijk alleen ,,gewone'' weerstand heeft, behalve bij het in- en uitschakelen. Dat laatste komt doordat direct na het inschakelen een magnetisch krachtveld ontstaat, dat er eerst niet was. Deze verandering in de bestaande situatie is in feite een krachtveldbeweging. De veldwijziging heeft ook invloed op de spoelwindingen zelf waardoor, zoals we bij de twee spoelen hebben gezien, in de eigen spoel een spanning wordt opgewekt. De spoel induceert dus spanning in zichzelf; we noemen dit verschijnsel *zelfinductie*. Deze spanning is echter juist tegengesteld aan de spanning die we op de spoel hebben aangesloten, zodat deze twee spanningen elkaar tegenwerken. Door die tegenwerking zal de stroom door de spoel aanvankelijk niet zo groot zijn als we uit de wet van Ohm $I = \frac{V}{R}$ zouden kunnen afleiden. Op den duur wordt echter een evenwicht bereikt waarbij de stroom niet meer toeneemt, het veld niet meer ,,beweegt'' en er dus ook geen tegenspanning wordt opgewekt. Nu geldt weer gewoon de wet van Ohm wanneer we voor *R* de weerstand van de spoel invullen.

Bij het uitschakelen van de spanning treedt door het afnemen van de stroom een verzwakking van het magnetisch veld op. Daardoor wordt een spanning opgewekt die nu echter dezelfde richting heeft als de uitgeschakelde spanning. Deze ,,geïnduceerde'' spanning onderhoudt de stroom nog enige tijd. Het feit dat de stroom nog even blijft nalopen noemt men dikwijls ,,naijlen''.

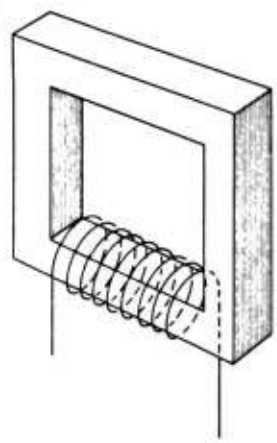
Een spoel, aangesloten op wisselspanning

Bij wisselspanning verandert de stroom door de spoel steeds en wordt bovendien regelmatig omgepoold (verwisseling van plus en min). Het magnetisch veld van de spoel wisselt

dan steeds in sterkte („beweegt"): eerst wordt het veld groter, dan kleiner, keert van richting om, wordt weer groter, dan weer kleiner en zo voort. Hierdoor worden altijd spanningen in de spoel opgewekt die steeds de aangesloten wisselspanning tegenwerken.
Het zal duidelijk zijn dat een spoel voor wisselspanning een grotere hindernis vormt dan voor gelijkspanning.
De eigenschappen van een spoel kunnen we uitdrukken in een „waarde" die de zelfinductie aangeeft, dus het vermogen in-zich-zelf te induceren. De eenheid daarvoor is de *henry* met het symbool H. Omdat een spoel met een zelfinductie van 1 henry erg „groot" is, gebruikt men ook vaak de kleinere eenheden millihenry (mH) en microhenry (μH), zoals we dat bij de eenheid „farad" voor capaciteit hebben gezien. Het spreekt vanzelf dat 1 H = 1000 mH = 1 000 000μH.



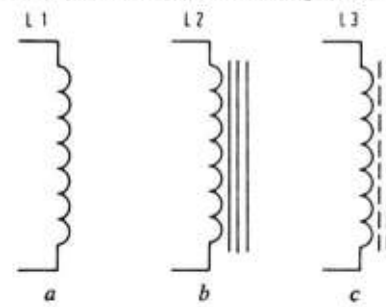
Afb. 31. Spoel met ijzerklem



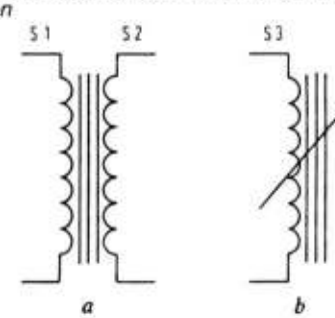
Afb. 32. Spoel met vierkante ijzerkern

Vergroting van de zelfinductie
De zelfinductie van een spoel is afhankelijk van het aantal windingen, de spoeldiameter, de spoelbreedte en het materiaal dat zich eventueel in en om de spoel bevindt. Is dat materiaal lucht („luchtspoel"), dan ondervinden de krachtlijnen een grote weerstand en zal het magnetisch veld zwak zijn. Die weerstand kan worden verminderd door ijzer in de spoel aan te brengen, dat gunstige magnetische eigenschappen heeft. Anders gezegd: de magnetische krachtlijnen ondervinden in ijzer veel minder weerstand dan in lucht, zodat het magnetisch veld krachtiger zal zijn (zie afbeelding 31). Daardoor neemt het vermogen van de spoel om in zichzelf te induceren toe. We kunnen dus een grotere zelfinductie bereiken door de lucht in de spoel te vervangen door ijzer. We kunnen ook de weg „buitenom" voor de krachtlijnen gemakkelijker maken door ook daar ijzer te gebruiken. De zelfinductie wordt dan nog groter (afbeelding 32).
Dit is te vergelijken met het effect dat wordt verkregen als we de lucht tussen de platen van een condensator door bepaalde isolatiematerialen vervangen. Hierdoor wordt de capaciteit (in farad) vergroot.
In schema's wordt een spoel meestal voorgesteld door een gestyleerde

Afb. 33. Schematische voorstelling spoelen



Afb. 34. Schematische voorstelling transformatoren



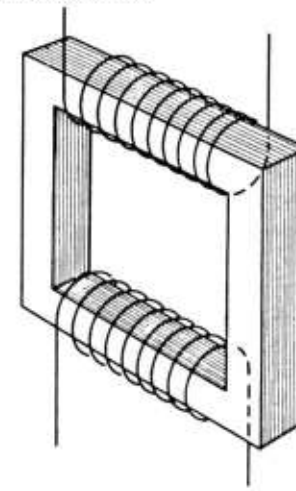
spoel zoals in afbeelding 33 is getekend. Afbeelding 33a toont het schemasymbool voor een luchtspoel, 33b voor een spoel met een gewone ijzerkern en 33c voor een spoel met een speciale kern, bij voorbeeld poederijzer.
Twee inductief gekoppelde spoelen op één ijzerkern (een transformator) worden aangegeven zoals in afbeelding 34a. Als de zelfinductie instelbaar is wordt een schuin lijntje met een klein dwarsstreepje toegevoegd, zoals is getekend in afbeelding 34b. Als symbool voor de zelfinductie wordt meestal de letter *L* gebruikt; soms de letter *S* van spoel. Als er meer spoelen in een schema voorkomen krijgt het symbool een volgnummer (L_1 enz.), zoals dat ook gebruikelijk is bij weerstanden (*R*) en condensatoren (*C*).

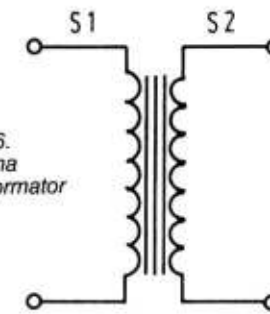
De transformator

Primaire en secundaire wikkelingen

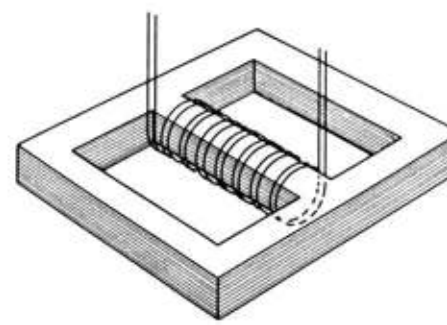
Een transformator bestaat in zijn eenvoudigste vorm uit twee spoelen die *inductief gekoppeld* zijn. De koppeling tussen de twee spoelen kan worden verbeterd door ze beide op dezelfde ijzerkern te wikkelen. Voor het transformeren van spanningen met zeer hoge frequenties gebruikt men wel transformatortjes zonder ijzerkern, maar verreweg de meeste transformatoren hebben een ijzeren kern. In principe ziet een normale transformator er dan ook uit zoals in afbeelding 35 is getekend: een ijzerkern waarom twee wikkelingen gelegd zijn. In afbeelding 36 is het schemasymbool van een transformator getekend.
Als op één van de spoelen een wisselspanning wordt aangesloten, ontstaat tussen de aansluitingen van de andere spoel ook een wisselspanning. De verhouding tussen de aangesloten spanning en de spanning op de tweede spoel is evenredig met de wikkelverhouding van de spoelen. Hebben de beide spoelen evenveel windingen (wikkelverhouding 1 : 1), dan zal de spanning op de tweede spoel (de secundaire wikkeling) even groot zijn als de spanning die op de eerste spoel (de primaire wikkeling) is aangesloten. Heeft de secundaire spoel half zoveel windingen als de primaire spoel, dan zal de secundaire spanning ook half zo groot zijn als de primaire spanning, dat wil zeggen de spanning die op de primaire spoel is aangesloten.
Eigenlijk heeft een transformator aanvankelijk geen primaire en secundaire

Afb. 35. Transformator





Afb. 36. Schema transformator



Afb. 37. Transformator met middenkern

wikkelingen. Pas als we op één van de wikkelingen een spanning aansluiten is dat de primaire wikkeling geworden. De andere wikkeling, waarvan we de getransformeerde spanning afnemen, is dan automatisch de secundaire wikkeling geworden.
Een transformator kan dus ook worden „omgekeerd"; hij is bij voorbeeld ontworpen om een primaire spanning van 220 V om te zetten in een secundaire spanning van 6 V, dan kunnen we op de 6 V-wikkeling ook een primaire wisselspanning van 6 V aansluiten en van de 220 V-wikkeling (die veel meer windingen heeft) de „secundaire" spanning van 220 V afnemen.
Het is ook mogelijk meer dan twee spoelen op een ijzerkern te wikkelen.
Met zo'n transformator kunnen we een bepaalde primaire spanning omzetten in een aantal, meestal verschillende, secundaire spanningen.

Rendement

Bij een ideale transformator is aan de primaire en aan de secundaire kant het produkt van stroom en spanning hetzelfde. In werkelijkheid treden in een transformator echter verliezen op. Het *rendement* van een gemiddelde transformator ligt in de buurt van 85%. Nemen we aan de secundaire wikkeling bij voorbeeld 85 watt af, dan zal de primaire wikkeling 100 watt opnemen (bij voorbeeld uit het net).
Waar blijft het verschil van 15 watt? Een deel daarvan wordt omgezet in warmte in de wikkelingen; het koperdraad heeft nu eenmaal enige weerstand en in die weerstand wordt een hoeveelheid warmte ontwikkeld die gelijk is aan de stroom in het kwadraat maal de weerstand ($I^2 \times R$); dit zijn de zogenaamde *koperverliezen*.
Ook in de ijzerkern treden echter verliezen op, de zogenaamde *ijzerverliezen*. Niet alleen in de secundaire wikkeling, maar ook in de kern worden stroompjes opgewekt die rondlopen in de kern en worden omgezet in warmte. Bovendien moeten de magnetische krachtlijnen in de kern elke halve periode van de wisselstroom (een transformator werkt immers alleen op wisselstroom) van richting omkeren, en ook dat gaat gepaard met het ontwikkelen van warmte.
Een zeer klein gedeelte van de verliezen is het gevolg van het feit dat ook stroompjes worden opgewekt in alles wat zich in de nabijheid van de transformator bevindt en geleiden wil.
Hoe de verliezen ook ontstaan, uiteindelijk worden ze allemaal in warmte omgezet. Energie kan nu eenmaal niet verloren gaan en keert altijd in één of andere vorm terug, doorgaans in de vorm van warmte. Bij een transformator die een niet te klein vermogen transformeert is dat goed te merken: hij wordt enigszins warm.
Natuurlijk neemt men allerhande maatregelen om de verliezen van een transformator tot een minimum te beperken.

Een transformator ontwerpen is geen kinderspel

Bij de constructie van een transformator komt meer kijken dan de hoofd- en bijzaken die wij in het voorgaande beschreven. Het is op klompen aan te voelen dat een transformator die 220 V moet omzetten in 110 V niet kan bestaan uit één primaire winding voor 220 V en één secundaire winding voor 110 V. De primaire wikkeling moet zoveel *zelfinductie*, dat wil zeggen zoveel windingen hebben dat er slechts een zeer kleine primaire stroom loopt als de secundaire wikkeling niet aangesloten is. Ook aan de ijzerkern worden eisen gesteld. Deze moet de magnetische krachtlijnen voldoende kunnen geleiden, dat wil zeggen voldoende doorsnede hebben en geheel gesloten zijn. Een flinke spijker is beslist niet genoeg. Verder moet het koperdraad van de wikkelingen dik genoeg zijn om de optredende stromen te kunnen geleiden. Het berekenen van kerndoorsnede, koperdraaddikte en aantallen wikkelingen van een goede transformator is beslist geen kinderspel.
Om de verliezen in de kern (de ijzerverliezen) zo klein mogelijk te houden wordt vrijwel nooit een massieve kern

gebruikt, maar bijna altijd een kern die is opgebouwd uit vele dunne plaatjes *(lamellen)* die van elkaar geïsoleerd zijn, bij voorbeeld door dun papier. Daardoor worden de rondgaande inductiestroompjes in de kern, die de isolatielaagjes niet kunnen passeren, sterk beperkt. De doorsnede van de kern wordt bepaald door het over te brengen vermogen. Elke kern heeft namelijk een zekere ,,capaciteit'' voor krachtlijnen. Als het over te brengen vermogen toeneemt moet de kern een grotere doorsnede hebben.

Zelf een transformator maken?

In afbeelding 35 zijn de twee spoelen op verschillende ,,benen'' van de kern gewikkeld. Meestal zijn de spoelen echter over elkaar gewikkeld op het ,,middenbeen'' van de ijzerkern, zoals in afbeelding 37 is getekend.

Het loont meestal niet de moeite zelf een transformator te maken omdat voor het berekenen van de kerndoorsnede, het aantal windingen, de draaddiameter en dergelijke eerst op dit punt gespecialiseerde literatuur moet worden doorgeworsteld. Het is vaak gemakkelijker een bestaande transformator te wijzigen. Het voordeel daarvan is dat de bestaande primaire wikkeling dikwijls opnieuw kan worden gebruikt. Bij nettransformatoren bevindt de primaire wikkeling zich vrijwel altijd binnenin, zodat de bestaande secundaire wikkelingen afgewikkeld kunnen worden. Bij het afwikkelen moet u het aantal windingen tellen omdat u hieruit de spanning per winding kunt berekenen. Heeft een bestaande wikkeling bij voorbeeld 24 windingen en was de oorspronkelijke spanning 6 volt, dan is de spanning per winding gelijk aan 6 : 24 wdg = 0,25 V/wdg. Wilt u nu een nieuwe secundaire wikkeling leggen die 20 V moet afgeven, dan zijn daarvoor 20 V : 0,25 V/wdg = 80 windingen nodig. Er zijn ook transformatorpakketten in de handel waarvan de spoelkoker al is voorzien van een primaire wikkeling voor 220 V. In de bijgevoegde handleiding staan aanwijzingen voor het wikkelen van de secundaire spoelen.

Transformatoren in velerlei uitvoering

Behalve transformatoren die de netspanning omlaag (en soms omhoog) transformeren, bij voorbeeld in het voedingsgedeelte van een versterker, komen in de elektronica ook nog andere typen transformatoren voor. Nog niet zo lang geleden werden transformatoren gebruikt tussen de eindbuizen of de eindtransistors en de luidspreker. Hoewel ook hier spanningen omlaag getransformeerd werden, was het belangrijkste doel van deze transformatoren ,,aanpassing'' van de laagohmige luidspreker aan de hoogohmige eindtrap.

Ook in het hoogfrequente gedeelte van televisie- en radiotoestellen komen onderdelen voor die transformeren, bij voorbeeld middenfrequenttransformatoren. Dergelijke transformatoren berusten weliswaar op dezelfde principes, maar ze werken bij veel hogere frequenties en lagere vermogens dan nettransformatoren en er worden ook in andere opzichten heel andere eisen aan gesteld. Daarom hebben ze een totaal andere constructie. Dikwijls noemt men ze zelfs geen transformatoren, maar spoelen of ,,spoelen met koppelwikkeling''. Soms hebben ze geen kern en als ze die wel hebben is die niet opgebouwd uit lamellen, zoals bij de nettransformatoren en andere laagfrequenttransformatoren, maar uit poederijzer dat met een bindmiddel tot een kern is geperst. Tegenwoordig gebruikt men ook vaak ,,ferroxcube'', een keramisch, dat wil zeggen gebakken materiaal dat voornamelijk bestaat uit ijzeroxide.

Uit het voorgaande blijkt wel dat er zeer uiteenlopende soorten transformatoren zijn. Voor de overzichtelijkheid zetten we ze allemaal, ook de niet behandelde, op een rijtje:

Nettransformatoren, voedingstransformatoren

Hierbij gaat het om het veranderen van *spanningen.*

Aanpassingstransformatoren
Deze werden vroeger veel gebruikt om *„impedanties"* op elkaar aan te passen, bij voorbeeld een laagohmige luidspreker op een hoogohmige eindtrap van een versterker.

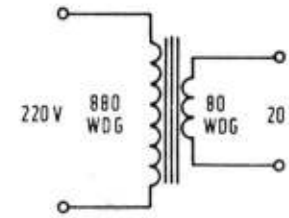
Hoogfrequent- en middenfrequent-transformatoren
Dit zijn in feite *spoelen* die tot taak hebben een bepaalde smalle frequentieband door te laten of juist tegen te houden.

Scheidingstransformatoren
Deze dienen om twee stroomkringen „galvanisch" te scheiden. De wikkelingen zijn immers van elkaar geïsoleerd en kunnen alleen wisselspanningen overdragen door inducties.
Scheidingstransformatoren worden bij voorbeeld gebruikt in servicewerkplaatsen om de te onderzoeken apparaten te isoleren van het net, waardoor veel veiliger gewerkt kan worden. Dikwijls is de secundaire spanning gelijk aan de primaire (bij voorbeeld 220 V).

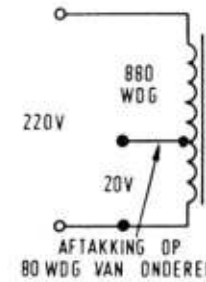
Regeltransformatoren
Deze zijn zo uitgevoerd dat door het verdraaien van een „loper" meer of minder secundaire windingen worden ingeschakeld, zodat de secundaire spanning regelbaar is tussen nul en maximum. Sommige typen kunnen tevens worden gebruikt als scheidingstransformator. Ze hebben de prettige eigenschap dat de secundaire spanning iets hoger kan zijn dan de primaire spanning, zodat bij een te lage netspanning toch een secundaire spanning van 220 V kan worden afgenomen.

Autotransformatoren
Dit zijn geen apparaten die een 2CV transformeren tot een Jaguar, maar transformatoren waarvan de primaire wikkeling tevens de secundaire is. In elektrisch opzicht is er geen verschil tussen de „gewone" transformator van afbeelding 38a en de autotransformator van afbeelding 38b, maar bij de laatste zijn de wikkelingen niet galvanisch gescheiden. De meeste regeltransformatoren zijn uitgevoerd als autotransformator (afbeelding 39).

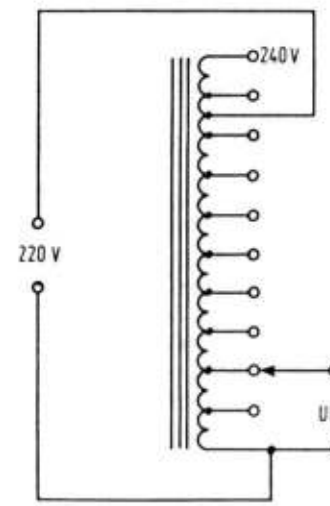
Afb. 38a. Transformator 220:20 V



Afb. 38b. Transformator 220-20 V

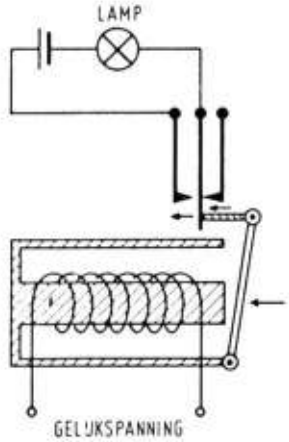


Afb. 39. Regeltransformator

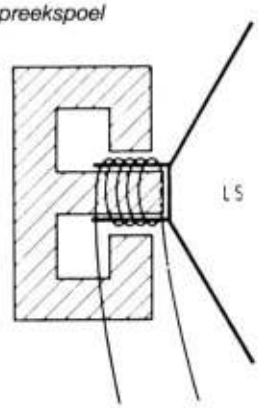


Andere toepassingen van spoelen
Van de spoelen zijn we op de transformatoren terecht gekomen, die immers ook uit twee of meer spoelen zijn samengesteld. Er zijn echter nog verschillende andere soorten spoelen en het heeft dus zin nog even terug te keren tot die spoelen. Behalve in transformatoren komen spoelen ook voor in onder meer relais, luidsprekers, toon-

Afb. 40.
Relais



Afb. 41. Spreekspoel



opnemers en microfoons en ze leiden een eigen leven als smoorspoel of afstemspoel.
In een relais wordt een spoel gebruikt om een ijzeren kern te magnetiseren. Deze kern trekt dan een stukje ijzer aan dat op zijn beurt mechanisch één of meer schakelaars bedient. Er zijn enkele speciale uitvoeringen van relais die op wisselspanning werken, maar de meeste moeten met gelijkspanning gevoed worden. In afbeelding 40 is het principe van een dergelijk relais geschetst.

Spreekspoelen
In een luidspreker bevindt zich een spoel, de ,,spreekspoel'', in een nauwe spleet waarin een zeer krachtig magnetisch veld heerst (zie afbeelding 41). Dat veld is afkomstig van een krachtige permanente magneet.
Zolang de spoel stroomloos is oefenen spoel en magnetisch veld geen invloed op elkaar uit. Zodra er echter een gelijkstroom door de spreekspoel loopt zal de spoel naar binnen worden getrokken of juist naar buiten worden gedrukt, afhankelijk van de stroomrichting en de richting van het magnetische veld in de spleet. Voeren we een wisselstroom toe aan de spreekspoel, dan zal deze afwisselend naar binnen en naar buiten bewegen en dus in trilling geraken. De frequentie van die trilling hangt af van de frequentie van de toegevoerde wisselstroom en de ,,uitslag'' van de amplitude van die wisselstroom. De spreekspoel is gewikkeld op een kokertje dat vast verbonden is met de ,,conus'' van de luidspreker, een meestal van papier vervaardigde kegelvormige constructie. De conus zal dus de bewegingen van de spreekspoel volgen en deze omzetten in luchttrillingen, die wij als geluid waarnemen.

Elektrodynamische toonopnemers
Bij het relais en de luidspreker werd een elektrisch verschijnsel omgezet in een mechanisch verschijnsel, maar ook het omgekeerde is mogelijk met een spoel. Een goed voorbeeld daarvan treffen we aan in een toonopnemer (,,pick-up-element'' of opneemelement). Voor de duidelijkheid beperken we ons even tot een toonopnemer voor monoweergave.
Het spoeltje in een toonopnemer is verbonden met de naald die mechanisch in beweging wordt gebracht door de groef van de grammofoonplaat. Het spoeltje bevindt zich in een sterk magnetisch veld, zodat in het spoeltje spanninkjes worden opgewekt die een getrouwe elektrische afspiegeling zijn van de ,,trillingen'' die in de groef van de plaat zijn vastgelegd.
Deze spanninkjes zijn zeer klein, in de orde van 2,5 millivolt (= 0,0025 V), maar het is mogelijk (en dat wordt dagelijks miljoenenvoudig bewezen) ze zo te versterken dat ze kunnen worden toegevoerd aan een luidspreker, die er weer echt geluid van maakt.

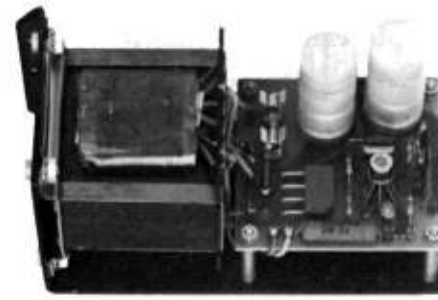
Magnetodynamische toonopnemers

Bij een magnetodynamische toonopnemer is de naald mechanisch verbonden met een klein magneetje dat zich in een spoeltje bevindt. Het magneetje beweegt dus in het stilstaande spoeltje en wekt daarin spanninkjes op, zodat het uiteindelijke resultaat hetzelfde is als bij de elektrodynamische toonopnemer. Het maakt geen verschil of het spoeltje beweegt ten opzichte van de magneet of het magneetje ten opzichte van de spoel.
De magnetodynamische toonopnemer is mogelijk geworden door het beschikbaar komen van zeer goed magnetisch materiaal (,,ferroxdure''), zodat met een zeer klein magneetje toch een voldoende sterk magnetisch veld in de opneemspoel kan worden opgewekt. Hoe kleiner de massa is die door de naald in beweging wordt gebracht, des te beter volgt de naald de groeven van de grammofoonplaat en des te beter is de weergavekwaliteit. Een voordeel van een modern magnetodynamisch opneemelement is dan ook dat de bewegende massa klein kan worden gehouden. Bovendien is het bij een stilstaand spoeltje gemakkelijker betrouwbare elektrische aansluitingen te maken. Desondanks zijn de elektrodynamische systemen niet uitgestorven. Er bestaan uitstekende toonopnemers die op dit principe berusten.
Voor de volledigheid vermelden we dat er ook toonopnemers zijn die geen spoeltjes en magneetjes bevatten, namelijk de keramische en de kristaltoonopnemers, die goedkoper zijn. Hierbij vindt de omzetting van mechanische trillingen in elektrische op andere wijze plaats.

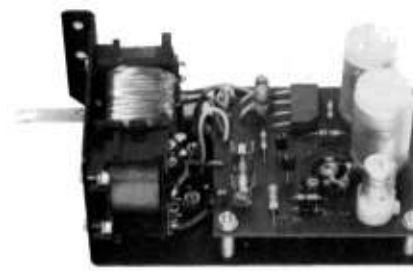
Microfoons

De constructie van een elektrodynamische microfoon lijkt sterk op die van een elektrodynamische toonopnemer, alleen is in de plaats van de naald een trilplaatje of ,,membraan'' gemonteerd dat het geluid opvangt en omzet in een mechanische trilling. Het membraan is verbonden met een spoeltje dat zich in een magnetisch veld bevindt. In het spoeltje worden weer spanninkjes opgewekt die versterkt kunnen worden.
De constructie die we hier zojuist beschreven lijkt opmerkelijk veel op die van een luidspreker en dat verklaart waarom men in sommige gevallen luidsprekers als microfoon gebruikt. Dat is bij voorbeeld het geval bij intercoms, waarbij één en dezelfde luidspreker beurtelings als luidspreker en als microfoon fungeert.

In dit scheidingsfilter zijn ,,luchtspoelen'' gebruikt, die geen ijzeren kern hebben.



Een voedingstransformator waarbij alle spoelen om het ,,middenbeen'' van de ijzerkern zijn gewikkeld.

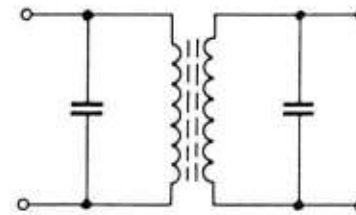


Een voedingstransformator waarbij de spoelen op verschillende plaatsen op de elliptische kern zijn gewikkeld.

Als we echter hoge eisen stellen aan de weergavekwaliteit moet de constructie van de elektrodynamische microfoon toch wel anders zijn dan die van de bekende (elektrodynamische) luidspreker, hoewel het principe gelijk blijft. Ook het omgekeerde is waar en u kunt een kostbare elektrodynamische microfoon beter niet als luidspreker gebruiken.
Ook bij de microfoons komen typen voor waarvan de werking niets te maken heeft met spoeltjes en magneten, bij voorbeeld kristal-, condensator- en koolmicrofoons. Het laatstgenoemde type wordt alleen nog gebruikt voor het opnemen van spraak; hij zit bij voorbeeld in de ,,hoorn'' van uw telefoontoestel.

Smoorspoelen
Vroeger bevatte elk voedingsgedeelte van een radiotoestel of een versterker een smoorspoel (de Engelsen zeggen er ,,choke'' tegen, net als tegen de smoor*klep* van een autocarburateur). Na het gelijkrichten van de wisselspanning, die via de transformator afkomstig was uit het net, was weliswaar een gelijkspanning verkregen, maar daarop zaten nog wisselspanningsresten (,,rimpel'') die zonder maatregelen als storing en brom uit de luidspreker zouden komen. De smoorspoel ,,smoorde'' deze rimpel, in samenwerking met twee flinke condensatoren.
In laagspanningsvoedingen voor moderne transistorapparatuur komt de smoorspoel om verschillende redenen niet meer voor. Wel worden vaak zeer kleine smoorspoeltjes gebruikt in het hoogfrequentgedeelte van bij voorbeeld radio-ontvangers, maar deze noemt men meestal ontkoppelspoeltjes.

Afstemspoelen en filters
Een belangrijke functie heeft de spoel als afstemspoel. Een spoel en een condensator vormen samen een zogenaamde afstemkring, waarmee bij voorbeeld uit de veelheid van signalen die op een antenne arriveren het signaal kan worden geselecteerd van de zender die we willen beluisteren. Meestal is de condensator regelbaar, zodat we door verdraaiing daarvan kunnen ,,afstemmen'' op verschillende zenders. Dergelijke afstemkringen spelen in de elektronica een belangrijke rol en we zullen er in deze serie later nog uitvoeriger op terugkomen.



Afb. 42. Filter

Als spoel en condensator beide een vaste waarde hebben, spreekt men van filter. Eigenlijk is een middenfrequenttransformator, die wij in dit hoofdstuk al eerder tegenkwamen, een combinatie van twee spoelen en twee condensatoren (zie afbeelding 42) en wordt daarom ook dikwijls middenfrequentfilter genoemd.
Filters worden beslist niet alleen gebruikt voor het filteren van signalen met een hoge frequentie. Ook bij lage frequenties vinden ze toepassing, bij voorbeeld als scheidingsfilter in luidsprekerkasten met twee of meer luidsprekers. Ook dergelijke scheidingsfilters zijn samengesteld uit spoelen en condensatoren.

Diverse andere spoelen
Het verschijnsel dat spoelen een magnetisch veld opwekken als ze stroom voeren heeft ertoe geleid dat spoelen in vele elektrische toestellen worden gebruikt. We noemden al het relais, maar er zijn veel meer toepassingen. Ze allemaal noemen zou te ver voeren en we volstaan dan ook met de belangrijkste voorbeelden: elektromotoren, dynamo's, draaispoelmeters, elektrische bellen en de afbuigspoelen in televisietoestellen.

Gelijkrichters

Wisselspanning en gelijkspanning

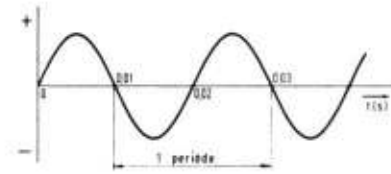
Zoals bekend is, levert het energiebedrijf ons wisselspanning omdat die veel makkelijker en met aanzienlijk kleinere verliezen kan worden getransporteerd en omdat die met transformatoren op eenvoudige wijze kan worden omgezet in een hogere of lagere wisselspanning, net wat we nodig hebben. In afbeelding 43a hebben we de wisselspanning van het lichtnet nog eens grafisch weergegeven. In afbeelding 43b is de gelijkspanning grafisch weergegeven, die wij nodig hebben voor het voeden van elektronische apparaten zoals versterkers, afstemeenheden, televisietoestellen, elektronische meetinstrumenten en zelfs computers. Voordat we gaan proberen van de spanningsvorm van afbeelding 43a de gelijkspanning van afbeelding 43b te maken, heeft het zin de twee soorten spanning met elkaar te vergelijken. Van de gelijkspanning uit afbeelding 43b is weinig te vertellen. Deze spanning is op ieder moment even groot en ook de „richting" is steeds dezelfde, in dit geval positief (+).

De wisselspanning uit afbeelding 43a daarentegen wisselt voortdurend van grootte. Aan het begin, aan het eind en halverwege elke periode is de wisselspanning zelfs nul. Bovendien verandert zij voortdurend van „richting"; de ene halve periode is zij positief, de volgende halve periode negatief.

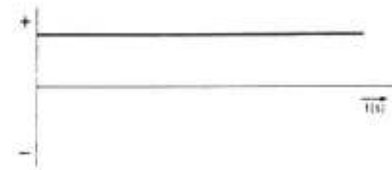
We zullen nu in stapjes gaan kijken hoe we van een wisselspanning een fraaie gelijkspanning kunnen brouwen.

De eerste stap

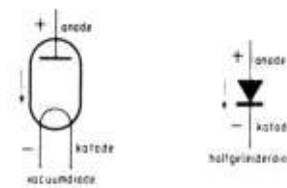
Eén verschil tussen de twee spanningsvormen zouden we kwijt zijn als we van elke periode van de wisselspanning één helft zouden kunnen la-



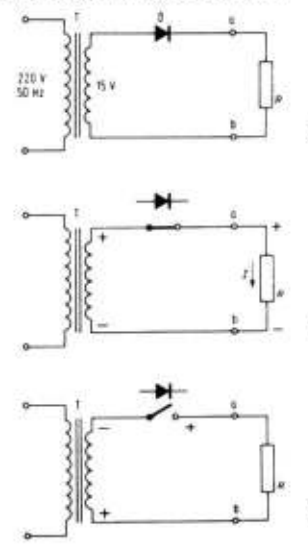
Afb. 43a. Wisselspanning



Afb. 43b. Gelijkspanning

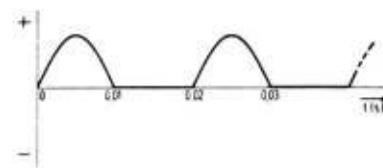


Afb. 44. Schematische voorstelling van vacuümdiode en halfgeleiderdiode



Afb. 45. Diode in wisselstroomkring

ten „verdwijnen", bij voorbeeld de „onderste" helft. Dat kan omdat we de beschikking hebben over een element dat *diode* genoemd wordt. De belangrijkste eigenschap van een diode is dat zij de stroom in de ene richting ongehinderd laat passeren en de stroom in de andere richting volledig blokkeert. Een diode is eigenlijk een soort automatische schakelaar. Er zijn twee soorten dioden, namelijk vacuümdioden en halfgeleiderdioden. De vacuümdioden zijn elektronenbuizen, die vroeger veel werden gebruikt in elektronische schakelingen. Maar tegenwoordig worden bijna uitsluitend halfgeleiderdioden toegepast, die worden gemaakt van germanium of silicium.
In afbeelding 44 hebben we de schemasymbolen van de vacuümdiode (links) en de halfgeleiderdiode weergegeven. Beide bezitten een anode en een katode en beide hebben ze de eigenschap dat de stroom alleen van anode naar katode kan lopen. Er loopt dus stroom door een diode als de anode positief is ten opzichte van de katode. Dit is aangegeven met een pijl. Waarom dat is en hoe dat in zijn werk gaat hoeven we in dit verhaal nog niet te weten.
In afbeelding 44 kunnen we ook zien waarom de halfgeleiderdiode de vacuümdiode heeft verdrongen. De laatste werkt namelijk alleen als de katode warm is; daarom is die katode uitgevoerd als gloeidraad. De halfgeleiderdiode heeft geen gloeidraad en is dus veel makkelijker toe te passen. Bovendien is zij kleiner en onbreekbaar.
We laten de vacuümdiode dus maar voor wat zij is en gaan kijken wat er gebeurt als we een (halfgeleider)diode opnemen in een wisselstroomkring. Dit hebben we geschetst in afbeelding 45a. De transformator T brengt de netspanning van 220 V 50 Hz terug tot 15 V. Deze wisselspanning heeft natuurlijk dezelfde vorm als de primaire netspanning, dat wil zeggen de sinusvorm uit afbeelding 43a. Laten we aannemen dat de secundaire wikkeling van de transformator eerst een positieve halve periode levert (we beginnen dus in het punt 0 seconden in afbeelding 43a). De bovenste aansluiting wordt dus positief ten opzichte van de onderste en er wil een stroom gaan lopen van plus, via de diode en de weerstand *R* naar de min. Deze situatie is weergegeven in afbeelding 45b. De diode legt deze stroom niets in de weg en zij gedraagt zich dus als een gesloten schakelaar.
Het zal duidelijk zijn dat in afbeelding 45b over de weerstand een halve periode met dezelfde spanningsvorm komt te staan als over de secundaire wikkeling van de transformator, want de twee zijn via de gesloten schakelaar gewoon doorverbonden.
De volgende halve periode is negatief, dus de bovenste transformatoraansluiting is negatief ten opzichte van de onderste. De stroom in de kring wil weer van plus naar min gaan lopen, maar de diode verzet zich hiertegen; zij gedraagt zich als een geopende schakelaar, zoals in afbeelding 45c is getekend. De kring is nu als het ware verbroken en er staat geen spanning over de weerstand.



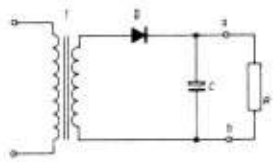
Afb. 46. Gelijkrichten van wisselstroom

We zien dus dat er tijdens de positieve halve perioden spanning over de weerstand staat en tijdens de negatieve halve perioden niet. Hieruit volgt dat de spanning over de weerstand de vorm heeft die in afbeelding 46 is getekend. Het zijn gelijk gerichte spannings-„impulsen" die de vorm hebben van halve sinussen. Gelijkrichten is dus gelijk richten.
Waar zouden de negatieve halve perioden gebleven zijn? Het antwoord daarop is niet moeilijk. Ze staan niet over de weerstand, dus moeten ze over de diode staan. Dat blijkt ook bij bestudering van afbeelding 45c.
De spanning over de weerstand lijkt al meer op de gewenste gelijkspanning

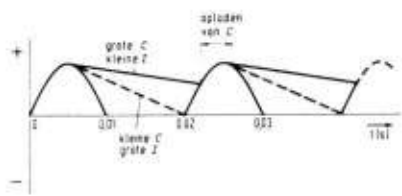
van afbeelding 43b dan de wisselspanning die in afbeelding 43a is getekend, maar we zijn nog niet tevreden. We zouden de toppen en de dalen willen ,,afvlakken'', zodat de spanning een meer gelijkmatige vorm krijgt.

De tweede stap

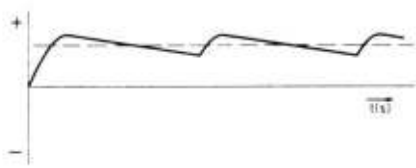
Hoewel de gelijkspanning van afbeelding 46 voor sommige doeleinden al aardig bruikbaar is, bij voorbeeld om een accu te laden, verlangen elektronische apparaten een voedingsspanning die een zuivere gelijkspanning veel beter benadert. Zo'n betere benadering krijgen we als we over de weerstand een condensator aanbrengen, zoals in afbeelding 47 is aangegeven. In werkelijkheid is de weerstand *R* meestal geen echte weerstand, maar



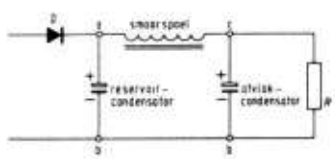
Afb. 47. Gelijkrichtschakeling



Afb. 48. Afvlakking



Afb. 49. Gelijkgerichte, afgevlakte spanning



Afb. 50. Gelijkrichtschakeling met smoorspoel

een elektronische schakeling die gevoed moet worden. De condensator wordt gedurende de opgaande lijn van elke positieve halve periode geladen door de stroom die de diode dan doorlaat. Zodra de spanning weer gaat afnemen blokkeert de diode, maar de condensator is dan volgeladen en blijft nog een tijdje stroom leveren aan de weerstand. Natuurlijk neemt de spanning van de condensator af doordat hij stroom levert. Dat gaat zo door totdat bij de volgende positieve halve periode de spanning van de transformator weer hoger wordt dan de spanning van de condensator. De diode gaat dan weer even geleiden zodat de condensator opnieuw geladen wordt tot de topwaarde van de halve sinus. Eén en ander is getekend in afbeelding 48. Het spreekt vanzelf dat een grote condensator langer stroom kan leveren dan een kleine. Hoe groter de condensator is, des te vlakker zal de ontlaadkromme lopen en des te beter zal de spanning over de belastingsweerstand een zuivere gelijkspanning benaderen. In afbeelding 49 hebben we alle franje uit afbeelding 48 weggelaten, zodat duidelijk te zien is welke vorm de spanning over de belastingsweerstand heeft.

Hieruit blijkt dat we al weer beter in de buurt van een zuivere gelijkspanning komen, want de spanningsvorm van afbeelding 49 is in feite opgebouwd uit een zuivere gelijkspanning (aangegeven met de streeplijn) en een nogal grillig gevormde wisselspanning die zich om de gelijkspanning heenslingert. De wisselspanning noemt men meestal de *rimpel*.

We kunnen dus zeggen dat de rimpel kleiner is naarmate de condensator, de zogenaamde *reservoircondensator*, een grotere capaciteit heeft.

Het is echter niet moeilijk in te zien dat ook de stroom door de belastingsweerstand van invloed is op de rimpel. Naarmate die stroom groter is, dus de ,,belasting'' zwaarder is, zal de condensator sneller zijn lading verliezen en zal de condensatorspanning sneller dalen. Hieruit volgt dat de reservoir-

condensator een grotere capaciteit moet hebben als we minder rimpel wensen én als de belasting een grotere stroom vraagt. Onbeperkt vergroten van de reservoircondensator heeft echter weinig zin en kan zelfs bezwaren hebben omdat er dan bij het inschakelen, als de condensator nog niet geladen is, te grote stromen optreden.
Er zijn verschillende mogelijkheden om de rimpel verder te verkleinen. Eén van die mogelijkheden is het tijdverloop tussen de momenten waarop de condensator geladen wordt te verkleinen. In de volgende paragraaf zullen we zien hoe dat gaat.

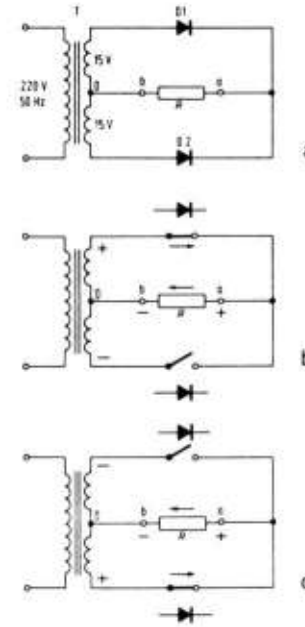
Condensator plus smoorspoel

Een tweede mogelijkheid is het toepassen van een *smoorspoel* en een *afvlakcondensator*, zoals in afbeelding 50 is geschetst. We hebben vroeger al eens gezien dat spoelen en condensatoren op gelijkspanning anders reageren dan op wisselspanning. De rimpel op de reservoircondensator is in feite een wisselspanning, ook al is hij niet sinusvormig. Die wisselspanning staat tussen de punten a en b in afbeelding 50. De smoorspoel vormt voor de wisselspanning een hoge weerstand en de afvlakcondensator juist een zeer lage weerstand. Dit wil zeggen dat het grootste deel van de rimpelspanning over de smoorspoel, dus tussen de punten a en c komt te staan en een zeer klein gedeelte over de afvlakcondensator, dus tussen c en b. Ook over de belastingsweerstand, die is aangesloten tussen de punten c en b, blijft dus maar een kleine rest van de oorspronkelijke rimpel staan.
Voor de gelijkspanning vormt de smoorspoel echter een zeer kleine weerstand en de afvlakcondensator juist een zeer grote weerstand. Daardoor zal het grootste deel van de gelijkspanningscomponent van de reservoircondensator over de afvlakcondensator komen te staan. Het resultaat van dit alles is dat de spanning over de afvlakcondensator nog weer beter de ideale gelijkspanning van afbeelding 43b benadert.
Zowel over de reservoircondensator als over de afvlakcondensator staat een gelijkspanning. Deze heeft weliswaar een grotere of kleinere wisselspanningscomponent, maar de spanning op de bovenzijde van de condensator zal altijd positief zijn. Dat is een prettige omstandigheid, want nu kunnen we voor beide een elektrolytische condensator gebruiken die bij een beperkt volume een zeer grote capaciteit heeft. En dat is juist wat we nodig hebben om de rimpel zo klein mogelijk te krijgen.
De smoorspoel werd vroeger veel gebruikt in voedingsapparaten voor toestellen met elektronenbuizen. Om ruimte en kosten te sparen werd de smoorspoel ook wel vervangen door een kleinere en goedkopere weerstand, die ongeveer hetzelfde effect geeft. In voedingsapparaten voor transistorschakelingen komt de smoorspoel niet meer voor omdat er thans andere en betere mogelijkheden zijn om de rimpel weg te werken. Soms gebruikt men nog wel een weerstand en een afvlakcondensator, maar in de meeste voedingseenheden voor transistorapparatuur komen zelfs die niet meer voor. Hoe komen we dan van die rimpel af?

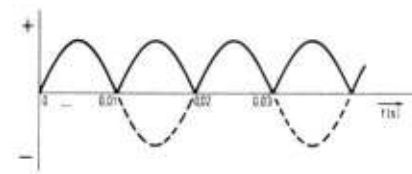
Dubbelzijdige gelijkrichting

In het voorgaande hebben we opgemerkt dat de rimpel kleiner zou zijn als de reservoircondensator met kortere tussenpozen zou worden bijgeladen. Dat kan met enkele handigheidjes. In de schakeling van afbeelding 47 wordt de condensator vijftig keer per seconde bijgeladen doordat er bij een frequentie van 50 Hz (het net) vijftig positieve halve perioden per seconde passeren. Als we er echter in zouden slagen de verloren gegane negatieve halve perioden ,,om te klappen'', dus positief te maken, dan zou de condensator honderdmaal per seconde worden bijgeladen doordat er bij een frequentie van 50 Hz honderd halve perioden per seconde zijn. Hoe we dat doen is getekend in afbeelding 51. We

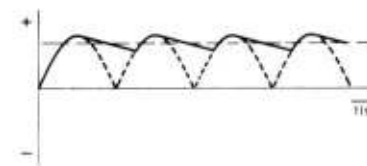
gebruiken een transformator met twee identieke secundaire wikkelingen die elk 15 V afgeven. In het midden zijn de wikkelingen doorverbonden. We kunnen dus ook een transformator nemen die secundair 30 V levert en een middenaftakking heeft. Bij elke positieve halve periode is de bovenste aansluiting van de transformatorwikkeling positief ten opzichte van de middenaftakking en is de onderste aansluiting negatief. Daardoor zal diode D_1 in afbeelding 51a geleiden en diode D_2 blokkeren. In afbeelding 51b hebben we deze dioden vervangen door respectievelijk een gesloten en een geopende schakelaar en met pijltjes is aangegeven hoe de stroom loopt.
Bij de negatieve halve perioden is de situatie net andersom en geleidt D_2, terwijl D_1 blokkeert (zie afbeelding 51c).
Als we in afbeelding 51c kijken hoe de stroom loopt (aangegeven met pijltjes), zie we dat de stroom door de belastingsweerstand dezelfde richting heeft als in afbeelding 51b. De stroom door de weerstand heeft dus altijd dezelfde ,,richting'' en ook de spanning over de weerstand is dus altijd positief. Met andere woorden: we zijn erin geslaagd de negatieve halve perioden zo te ,,richten'' dat ze hetzelfde effect hebben als de positieve halve perioden. We hebben alle halve perioden ,,gelijkgericht'' en de spanning over de weerstand heeft dus de vorm die in afbeelding 52 getekend is. Als we deze spanningsvorm vergelijken met die uit afbeelding 46 dan zal het duidelijk zijn dat we hiervan met behulp van een reservoircondensator een veel betere gelijkspanning kunnen maken dan met de schakeling van afbeelding 45. Met een reservoircondensator van dezelfde capaciteit als in afbeelding 47 ziet de uitgangsspanning eruit zoals in afbeelding 53 is geschetst. We spreken hier van *dubbelzijdige* of *dubbelfazige* gelijkrichting.



Afb. 51. Dubbelfazige gelijkrichter.



Afb. 52. Dubbelfazig gelijkgerichte wisselstroom



Afb. 53. Afgevlakte dubbelfazig gelijkgerichte wisselstroom

Bruggelijkrichters

De dubbelzijdige gelijkrichter die wij zojuist hebben beschreven werd veel toegepast in het buizentijdperk. In plaats van twee afzonderlijke gelijkrichtdioden gebruikte men dan een dubbele vacuümdiode, bestaande uit twee anoden en één katode in een glazen ballon (de katoden zijn immers toch doorverbonden). Maar in het transistortijdperk waarin wij nu leven wordt deze schakeling toch niet veel meer toegepast omdat we hetzelfde effect op een eenvoudiger en goedkoper manier kunnen bereiken, zonder dat de transformator twee secundaire wikkelingen of een ,,dubbele'' secundaire

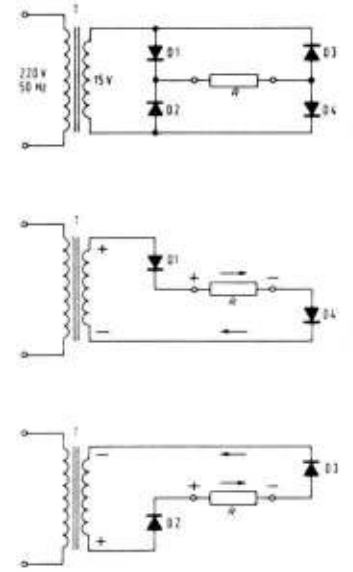
wikkeling met middenaftakking hoeft te hebben. Die betere methode hebben we geschetst in afbeelding 54. In deze schakeling gebruiken we een „normale" transformator, zonder dubbele secundaire wikkeling of middenaftakking, maar wel vier dioden die een „brug van Graetz" ofwel een brugschakeling vormen. We hebben dus twee extra dioden nodig, maar dat is eenvoudiger en goedkoper dan de speciale transformator die we in de schakeling van afbeelding 51 nodig hadden.

In afbeelding 54b hebben we geschetst wat er tijdens de positieve halve perioden gebeurt. De dioden D_1 en D_4 geleiden dan (vormen dus gesloten schakelaars) en de dioden D_3 en D_2 blokkeren; de laatste twee voeren dus geen stroom; ze doen niet mee en dus hebben we ze voor de overzichtelijkheid ook niet getekend. Het blijkt dat de stroom van links naar rechts door de belastingsweerstand loopt.

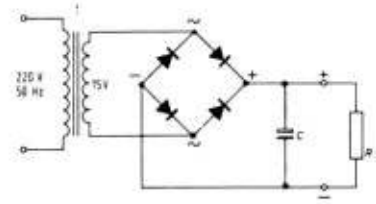
Tijdens de negatieve halve perioden zijn de rollen verwisseld; D_2 en D_3 geleiden en D_1 en D_4 blokkeren. Deze toestand is geschetst in afbeelding 54c. We zien dat ook nu de stroom van links naar rechts door de belastingsweerstand vloeit. De spanning over de weerstand heeft dus de vorm die we in afbeelding 52 schetsten.

Omdat *R* in werkelijkheid meestal een meer of minder complexe elektronische schakeling is die gevoed moet worden, tekent men een gelijkrichter met een brugschakeling meestal niet zoals wij in afbeelding 54 hebben gedaan; in de plaats van *R* zou dan immers de complete schakeling getekend moeten worden. Daarom treft men meestal de tekenwijze aan die in afbeelding 55 is aangegeven.

De brugschakeling kan worden opgebouwd uit vier afzonderlijke dioden, maar er zijn ook complete brugschakelingen in de handel, waarbij de vier dioden in één omhulling zijn ondergebracht. Zo'n complete brug is getekend in afbeelding 56. De aanduidingen corresponderen met die in afbeelding 55. De twee aansluitpennen in het midden



Afb. 54. Bruggelijkrichter

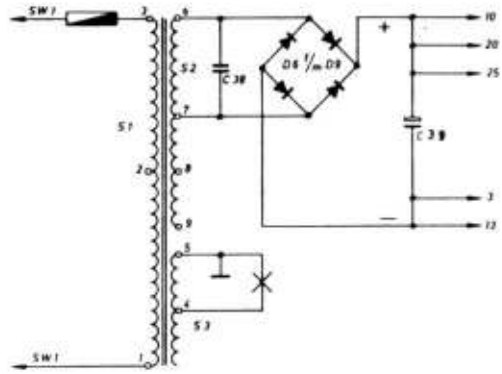


Afb. 55. Bruggelijkrichter

Afb. 56. Brugschakeling in behuizing

worden dus verbonden met de secundaire wikkeling van de transformator. Op de linkerpen verschijnt dan de positieve gelijkgerichte spanning en op de rechterpen de negatieve.

Natuurlijk moet de rimpel nog zo goed mogelijk worden weggewerkt met een reservoircondensator, die we in afbeelding 55 maar vast getekend hebben. Daarvoor nemen we weer een elektrolytische condensator met een grote capaciteit (bij voorbeeld 1000 μF). Een smoorspoel of weerstand met



Afb. 57. Voedingseenheid

een afvlakcondensator wordt meestal niet meer gebruikt.

Hoe groot is de gelijkgerichte spanning?

In dit hoofdstuk zijn we er steeds van uitgegaan dat de transformator een secundaire spanning van 15 V levert. Hoe groot is dan de gelijkgerichte spanning?

Om het antwoord op die vraag te kunnen geven moeten we eerst in de herinnering roepen dat we met een wisselspanning van 15 V een wisselspanning bedoelen die in een „ohmse" belasting, zoals een gloeilamp, een straalkacheltje of een weerstand, hetzelfde effect te weeg brengt als een gelijkspanning van 15 V, zodat dus evenveel licht of warmte geproduceerd wordt. Die 15 V is dus de *effectieve waarde*. We hebben echter gezien dat de topwaarde of amplitude van de wisselspanning dan 1,4 x zo groot is. Met andere woorden: de reservoircondensator (zie bij voorbeeld afbeeldingen 46 en 48) wordt telkens opgeladen tot een spanning van 1,4 x 15 V = 21 V. Als de reservoircondensator niet belast wordt, dus als we *R* wegnemen, wordt hij tussen twee opladingen niet ontladen en komt over *C* dus een zuivere gelijkspanning van 21 V te staan. Maar in de praktijk zal er wél een belasting zijn en zal dus de spanning *gemiddeld* lager zijn dan 21 V. Hoe groter de belasting is, des te lager zal dus de gelijkgerichte spanning zijn. Het is vrij lastig om precies de werkelijke spanning te berekenen omdat die van vele factoren afhankelijk is, maar we mogen veilig aannemen dat deze spanning in het algemeen tussen 1,2 en 1,4 maal de effectieve waarde van de transformatorspanning ligt. In ons voorbeeld dus tussen 18 en 21 V.

In afbeelding 57 hebben we een praktijkvoorbeeld van een gelijkrichtschakeling gegeven, namelijk de voeding van de versterker NL 312H. Hierin zijn duidelijk de transformator, de diodebrug en de reservoircondensator te zien. Tussen de punten 6 en 7 levert de transformator een wisselspanning met een effectieve waarde van 38,5 V, maar de gelijkgerichte spanning bedraagt ongeveer 50 V en is dus 1,3 x zo hoog.

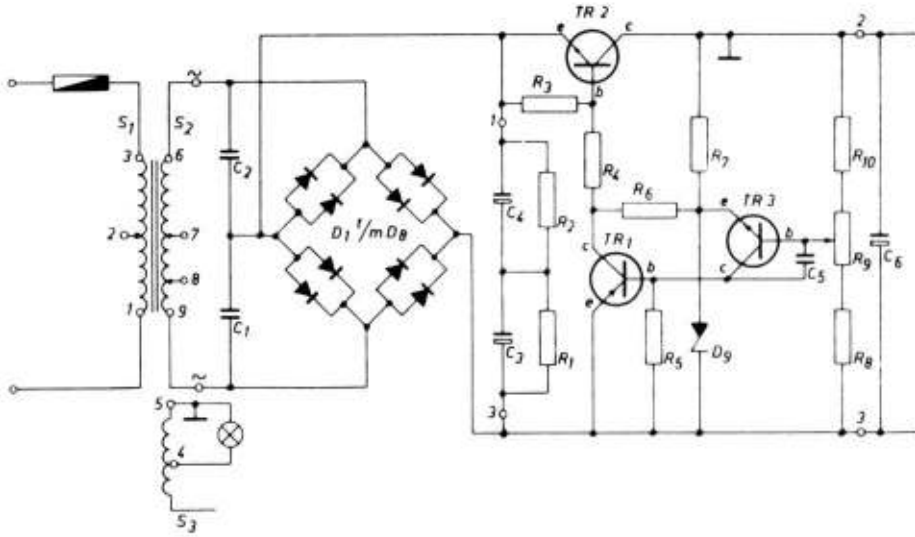
De kleine condensator C_{38} is een zogenaamde *ratelcondensator* die, zoals de naam al zegt, moet voorkomen dat de versterker een ratelend geluid voortbrengt. Het zou ons te ver voeren om dit verschijnsel hier te verklaren, maar neemt u maar van ons aan dat zo'n ratelcondensator in geen enkel voedingsapparaat mag ontbreken.

Gestabiliseerde voedingseenheden

Zo zijn we ongemerkt aangeland bij de voedingen. Weliswaar is een voeding ook een gelijkrichter, maar in het spraakgebruik maakt men toch onderscheid. De schakeling van afbeelding 45 is een gelijkrichter die een niet-afgevlakte gelijkspanning levert waarmee we weinig anders kunnen doen dan een accu laden of een mo-

deltrein laten rijden. De schakeling van afbeelding 57 daarentegen noemen we een voeding omdat deze een bijna zuivere gelijkspanning levert met weinig rimpel. Hiermee kunnen we een versterker of een ander elektronisch apparaat voeden.
Toch is de gelijkspanning die de voeding van afbeelding 57 levert nog niet helemaal ideaal. Zij bevat nog een kleine rimpelspanning, maar die levert nauwelijks problemen op. Erger is dat de spanning niet onder alle omstandigheden even hoog is. In de vorige paragraaf hebben we gezien dat de gelijkgerichte spanning 1,4 x de transformatorspanning is als we de belastingsweerstand wegnemen. Naarmate de belasting groter is, wordt de gemiddelde spanning over de reservoircondensator lager.
Nu hebben versterkers met transistors en geïntegreerde schakelingen de hebbelijkheid dat ze meer stroom vragen als ze meer energie aan de luidsprekers moeten leveren. Dit wil zeggen dat de ,,belasting'' van de voeding voortdurend verandert. Bij luide muziekpassages zal de versterker veel stroom vragen.
De ,,belasting'' van de voeding zal dus zwaarder worden en daardoor zal de spanning over de reservoircondensator dalen. Bij luide passages zal de versterker dus een lagere voedingsspanning krijgen, en daardoor minder geluid produceren dan eigenlijk de bedoeling was. Nu is dat niet dramatisch, want het betekent alleen maar dat de dynamiek van de muziek wat kleiner wordt. Als we echter willen voorkomen dat de voedingsspanning daalt bij luide passages, dan moeten we een *gestabiliseerde voeding* gebruiken. Afbeelding 58 geeft hiervan een voorbeeld: de gestabiliseerde voedingseenheid NL 6924.
In het schema van afbeelding 58 zijn gemakkelijk de transformator en de diodebrug te herkennen. Omdat de gebruikte dioden niet ieder voor zich de grote stroom kunnen verwerken die de voeding moet kunnen leveren, zijn ze twee aan twee parallel geschakeld. C_1 en C_2 vormen samen de ratelcondensator.
De reservoircondensator is wat moeilijker te vinden, want deze is samengesteld uit twee condensatoren, namelijk C_3 en C_4. Omdat de spanning over de reservoircondensator tamelijk hoog is, zijn twee elektrolytische condensatoren met een lagere werkspanning in serie geschakeld, zodat ze allebei maar de helft van de totale spanning te verwerken krijgen. De weerstanden R_1 en R_2 zorgen ervoor dat beide condensatoren inderdaad precies de helft van de totale spanning krijgen te verwerken.
De rest van de schakeling is de eigenlijke stabilisator. We zullen deze niet in detail beschrijven, maar alleen de belangrijkste functies noemen. Transistor TR_3 controleert of de uitgangsspanning (tussen de punten + en −) inderdaad de waarde heeft die we met R_9 hebben ingesteld. Elke afwijking geeft deze transistor via TR_1 door aan transistor TR_2, die in serie met de negatieve voedingslijn is geschakeld. Om te kunnen zien hoe deze transistor de uitgangsspanning constant houdt moeten we eerst even wat getallen geven. De transformator levert tussen de punten 6 en 9 een wisselspanning met een effectieve waarde van 58,5 V. De gelijkgerichte spanning over de reservoircondensatoren C_3 en C_4 is, zonder belasting, bijna 1,4 x zo hoog, dus circa 80 V. Voor het voeden van de versterker hebben we een spanning van 60 V nodig; dit is de spanning over condensator C_6. De spanning over de reservoircondensatoren is dus 20 V hoger dan de uitgangsspanning die we wensen. Die spanning van 20 V staat over de serietransistor TR_2.

Wat gebeurt er in de stabilisator?
Wat gebeurt er nu bij een luide muziekpassage? De versterker vraagt dan ineens veel meer stroom, waardoor de spanning van 60 V wil dalen. TR_3 seint deze neiging onmiddellijk via TR_1 door naar TR_2. Ook de spanning over de reservoircondensatoren zal door de grotere stroomafname dalen.



Afb. 58. Gestabiliseerde voedingseenheid NL 6924

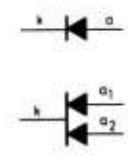
Laten we aannemen dat de spanning als gevolg van deze en andere oorzaken (de inwendige weerstand van de transformator en de diode) daalt tot 70 V. TR_2 wordt dan zo ingesteld dat hij nog maar 10 V spanningsverlies geeft, zodat op de uitgang van de voeding een spanning overblijft van 70 V − 10 V = 60 V, precies wat we nodig hebben.
Een gestabiliseerde voeding werkt dus eigenlijk met een te hoge spanning. Het verschil tussen die spanning en de gewenste uitgangsspanning wordt gebruikt om alle dreigende spanningsveranderingen op te vangen, zodat we onder alle omstandigheden de juiste uitgangsspanning overhouden. De stabilisatieschakeling vangt niet alleen alle dreigende spanningsveranderingen op die het gevolg zijn van de steeds wisselende „belasting", maar ook netspanningsvariaties worden effectief weggezuiverd. Zelfs het restantje rimpel dat op de reservoircondensatoren aanwezig is wordt nog verder verminderd. Om deze redenen zouden alle HiFi-versterkers in het algemeen uitgerust moeten zijn met een gestabiliseerde voeding. Bij een goede dimensionering van het voedingsgedeelte is het echter wel mogelijk HiFi te bereiken met een ongestabiliseerde voeding, wat uiteraard goedkoper is. Er moet dan een royaal bemeten transformator worden gebruikt, met weinig inwendige weerstand. Ook de dioden en de afvlakcondensatoren moeten niet te krap bemeten zijn. Het neusje van de HiFi-zalm is echter een versterker met een gestabiliseerde voeding, zoals de 2 x 40 W-versterker NL 6920.

Transistors en hun toepassing

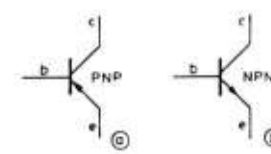
De ontdekking van de transistor
Aan het einde van de veertiger jaren werden halfgeleiderdioden vrijwel niet meer gebruikt. Weliswaar werd deze diode door amateurs veel gebruikt om eenvoudige ontvangertjes in elkaar te knutselen, die zij kristalontvangers noemden (de halfgeleiderdiode heette toen „kristaldetector"), maar verder kwamen ze alleen voor in radartoestellen en enkele andere microgolfapparaten. In alle andere gevallen gebruikte men elektronenbuisdioden.

In 1948 waren Bardeen en Brattain in Amerika bezig met het ontwikkelen van een dubbele halfgeleiderdiode, die voor een bepaald doel nodig was. In afbeelding 59 hebben we het schemasymbool van een enkelvoudige halfgeleiderdiode getekend, dat we ook in het vorige hoofdstuk al tegenkwamen. Eronder staat een schematisch weergegeven dubbele diode. De twee dioden hebben een gemeenschappelijke katode. De enkelvoudige diode kan alleen maar gelijkrichten, dus de stroom in één richting doorlaten en in de andere richting blokkeren. Maar de dubbele diode kan meer. Dat ontdekten Bardeen en Brattain toen ze hun dubbele diode in een schakeling hadden opgenomen. Ze bemerkten dat als ze de stroomsterkte in één van de dioden varieerden, de stroomsterkte in de andere diode nog meer varieerde, zonder dat ze iets aan de spanning over die tweede diode veranderden. Ze konden dus een kleine stroomverandering omzetten in een grote en dat is *versterken.* De beide geleerden hebben dus min of meer bij toeval ontdekt dat je met een dubbele halfgeleiderdiode signalen kon versterken en ze noemden het nieuwe element *transistor*.

PNP en NPN
In de praktijk wordt een transistor niet getekend als een dubbele diode maar zoals in afbeelding 60 is gedaan. Met een beetje goede wil is in het schemasymbool van de PNP-transistor (afbeelding 60a de dubbele diode van afbeelding 59 te herkennen. De gemeenschappelijke katode noemen we de *basis* van de transistor, de bovenste anode de *collector* en de onderste anode de *emitter.*
We kunnen ook een dubbele diode maken waarvan de anoden met elkaar verbonden zijn. We krijgen dan een zogenaamde NPN-transistor, waarvan het schemasymbool in afbeelding 60b is weergegeven. Het enige verschil met het schemasymbool van de PNP-transistor is dat de pijl in de emitter de andere kant opwijst.
NPN- en PNP-transistors lijken wat hun gedrag betreft sterk op elkaar. Ze kunnen allebei versterken. Maar bij een PNP-transistor moet de voedingsspanning andersom worden aangesloten dan bij een NPN-transistor. Daarom moeten we deze twee typen goed uit elkaar houden en mogen we een PNP-type nooit vervangen door een NPN-type, ook niet als alle andere eigenschappen gelijk zijn.



Afb. 59
Schemasymbolen halfgeleiderdiode



Afb. 60
Schemasymbolen transistors

Er is nog een verschil dat transistors onderscheidt: het materiaal waarvan ze gemaakt zijn. In het begin van het transistortijdperk was dat altijd *germanium,* maar langzamerhand is men steeds vaker *silicium* gaan gebruiken. Silicium transistors hebben het voordeel dat ze van zichzelf stabieler zijn dan germanium transistors, waardoor ze in het algemeen met wat minder voorzorgen in de schakeling kunnen worden opgenomen.

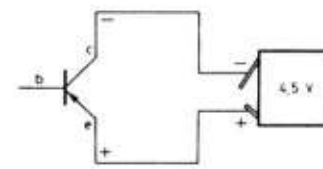
Wat doet een transistor?

De werking van een transistor is geen eenvoudige zaak. Gelukkig is het niet nodig precies te weten wat er in zo'n transistor gebeurt om hem te kunnen gebruiken. Het is voldoende te weten dat een gangbare transistor een huisje is met drie aansluitingen die verbonden zijn met de emitter, de basis en de collector. Deze aansluitingen mogen niet verwisseld worden, want in het gunstigste geval zal de schakeling dan niet werken en in het ongunstigste geval raakt de transistor onherstelbaar defect.

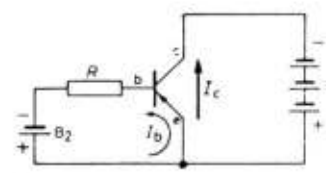
In afbeelding 61 hebben we een PNP-transistor (de pijl in de emitter wijst naar de basis) aangesloten op een platte 4,5 V-batterij; de collector is verbonden met de minpool, de emitter met de pluspool. We laten in het midden of het een germanium of een silicium transistor betreft, want dat maakt hier geen verschil.

Wat gebeurt er nu in deze eenvoudige transistorschakeling? Het antwoord is: niets. Op een klein lekstroompje na zal geen stroom gaan lopen. Dat is ook logisch als we bedenken dat de stroom de twee dioden zou moeten doorlopen, namelijk de diode die wordt gevormd door basis en emitter en de collector-basisdiode. Doordat de beide dioden de katode (de basis) gemeenschappelijk hebben, zal altijd één van de twee de stroom blokkeren. In dit geval is dat de collector-basis-diode. De situatie wordt radicaal anders als we door de basis-emitterdiode een stroompje sturen. Dit hebben we weergegeven in afbeelding 62. Tussen basis en emitter hebben we een kleine 1,5 V-batterij aangesloten, met de pluspool aan de emitterkant. De weerstand dient om de stroom te beperken. Er gaat nu een klein stroompje lopen van de plus van batterij B_2, via de emitter-basisdiode (die in doorlaatinrichting is aangesloten) en via de weerstand naar de minpool van B_2. Het wonderlijke is nu dat er een veel grotere stroom gaat lopen van de plus van B_1, via de emitter, de basis en de collector naar de min van B_1. Dit is alleen maar te verklaren door diep in het inwendige van de transistor te duiken. Dat zullen we niet doen. Neemt u maar aan dat de collectorstroom een aantal keren groter is dan de basisstroom. We noemen dit de *gelijkstroomversterking*.

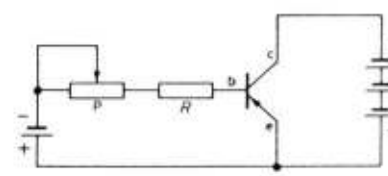
De volgende stap is dat we de basisstroom gaan variëren, bij voorbeeld door aan de potentiometer P in afbeelding 63 te draaien. De basisstroom zal dan beurtelings toe- en afnemen, maar hij verandert alleen van grootte en niet van richting. Dit is in de grafiek van afbeelding 64 weergegeven. De veranderende basisstroom is eigenlijk



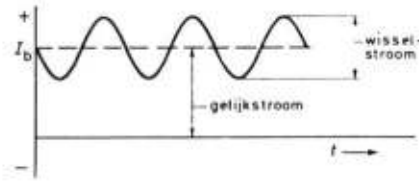
Afb. 61
PNP transistorschakeling



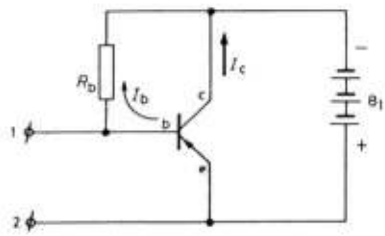
Afb. 62
Gelijkstroomversterking



Afb. 63
Transistorschakeling
met potentiometer



Afb. 64
Variërende gelijkstroom



Afb. 65
Transistorschakeling
met basisweerstand

samengesteld uit een gelijkstroom en een wisselstroom.
We hebben in afbeelding 62 gezien dat de collectorgelijkstroom groter is dan de basisgelijkstroom. Maar ook de veranderingen van de basistroom komen als grotere veranderingen in de collectorstroom tevoorschijn. Anders gezegd: het wisselstroomdeel van de basisstroom komt versterkt in de collectorstoom voor. We noemen dit de *wisselstroomversterking*.

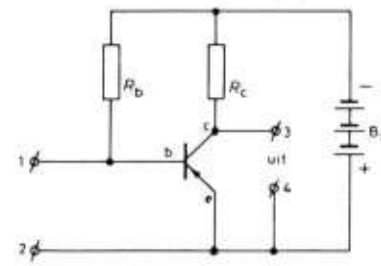
Het versterken van wisselstromen
Het komt natuurlijk niet vaak voor dat we de basisstroom van een transistor met de hand variëren. In de praktijk hebben we meestal te doen met kleine „natuurlijke" wisselstroompjes, bij voorbeeld van een platenspeler, die we willen versterken. Een transistor kan echter niet zonder meer wisselstroom verwerken en versterken want bij een echte wisselstroom verandert niet alleen de grootte van de stroom voortdurend, maar ook de richting. Als we aan de basis een echte wisselstroom zouden toevoeren, zou de basis-emitterdiode alleen de positieve halve periode doorlaten en de negatieve halve perioden tegenhouden. Het handigheidje om deze moeilijkheid te omzeilen zijn we al eerder tegengekomen; om precies te zijn: in afbeelding 64. We kunnen best een wisselstroom door de basis-emitterdiode sturen, als we maar zorgen dat de stroomrichting nooit kan omkeren. Dat kunnen we bereiken door ervoor te zorgen dat de basisgelijkstroom altijd groter is dan de „amplitude" van de wisselstroom die we willen versterken. Eigenlijk hebben we nu niet meer te doen met een wisselstroom, maar met een variërende gelijkstroom, zoals uit afbeelding 64 blijkt.
De hulp-gelijkstroom of instelstroom kunnen we verkrijgen op de manier van afbeelding 63 dus met een extra batterij. Maar dat is natuurlijk niet erg praktisch. Veel beter is het een naar verhouding grote weerstand op te nemen tussen de basis en de minaansluiting van de voedingsbatterij B_1, zoals in afbeelding 65 is getekend. Er loopt nu een constante gelijkstroom van de pluspool via de emitterbasisdiode en de weerstand naar de minpool, die een grotere collectorgelijkstroom tot gevolg heeft. Beide gelijkstromen worden gebruikt om de wisselstromen, waarom het ons te doen is, te laten meerijden.

De te versterken wisselstroom vloeit tussen de punten 1 en 2, dus ook door de basis-emitterdiode. Die wisselstroom wordt dikwijls veroorzaakt door een *wisselspanning* die wordt aangesloten tussen de punten 1 en 2. Meestal willen we deze *spanning* versterken. Weliswaar leidt de basiswisselspanning tot een basiswisselstroom, maar deze heeft alleen een versterkte collectorwisselstroom tot gevolg. Van die collectorwisselstroom kunnen we echter op eenvoudige wijze een collectorwisselspanning maken door een weerstand op te nemen in de collectorleiding, zoals in afbeelding 66 is getekend. Door deze weerstand zal de variërende collectorstroom lopen en

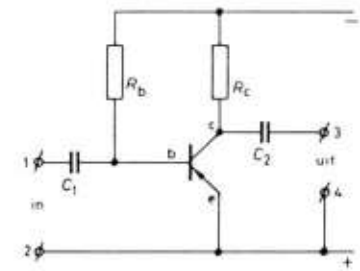
daardoor zal over de weerstand een variërende spanning ontstaan, waarvan het wisselspanningsgedeelte groter is dan de oorspronkelijke wisselspanning tussen 1 en 2. Met andere woorden: hoewel een gewone transistor in feite een wisselstroomversterker is, kunnen we hem door middel van enkele eenvoudige trucjes gebruiken als wissel*spanningsversterker*.
De wisselspanning die over de collectorweerstand ontstaat zouden we kunnen gebruiken om een volgende transistor te besturen, zodat de wisselspanning nog meer versterkt wordt.

Versterkerschakelingen
Voordat we op de hierboven beschreven wijze een echte versterker met meer transistors kunnen gaan maken, moeten we eerst nog enkele problemen oplossen.
Als we in afbeelding 66 tussen 1 en 2 een wisselspanningsbron aansluiten, zal deze invloed hebben op de gelijkstroom door R_b, die we gebruiken om de transistor „in te stellen". De instelling van de transistor kan dus verstoord worden.
Voor de „uitgang", punt 3, geldt in zekere zin hetzelfde. We kunnen dit punt niet zonder meer met de basis van de volgende transistor verbinden. Deze problemen kunnen eenvoudig worden opgelost door „voor" en „achter" de transistor een condensator te gebruiken met een capaciteit die voldoende groot is om de wisselspanningen vrijwel ongehinderd door te laten. De condensatoren blokkeren de gelijkstroom, zodat de instelling van de transistor altijd gehandhaafd blijft, onverschillig wat we op de ingang en de uitgang aansluiten. Op die wijze ontstaat de schakeling van afbeelding 67.

Het lijkt erop alsof we er nu zijn, maar dat is niet zo. Een complicatie is namelijk dat transistors van nature niet erg stabiel zijn. De temperatuur heeft grote invloed op de instelling van de transistor. En daarmee moeten we terdege rekening houden, want niet alleen kan de omgevingstemperatuur sterk variëren, de transistor wordt ook verwarmd door de elektrische stroom die erdoor vloeit. En het ongelukkige is dat de collectorstroom de neiging heeft groter te worden naarmate de temperatuur van de transistor hoger is. Die grotere collectorstroom veroorzaakt dan weer meer warmte-ontwikkeling in de transistor met als gevolg dat de col-



Afb. 66
Wisselspanningsversterker

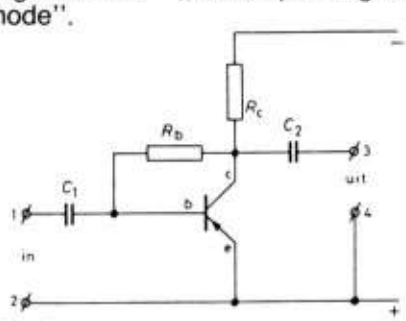


Afb. 67
Wisselspanningsversterker
met koppelcondensatoren

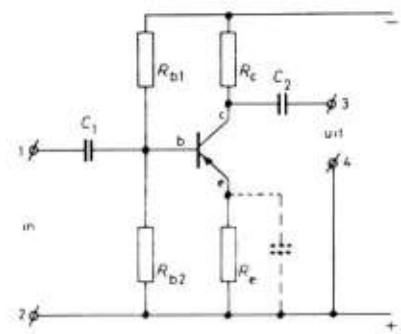
lectorstroom nog meer stijgt. Er treedt dus een soort sneeuwbaleffect op, waardoor de transistor als het ware op hol slaat. In de praktijk is een transistor dan ook altijd zo geschakeld dat dit effect afdoende wordt tegengegaan. Een eenvoudige methode is weergegeven in afbeelding 68.

Zodra de transistor de neiging krijgt meer stroom te gaan trekken, zal over de collectorweerstand een hogere spanning ontstaan (volgens de Wet van Ohm). Het gevolg is dat de spanning op de collectoraansluiting lager, dus minder negatief wordt. Door de basisweerstand R_b, die met dit punt verbonden is, zal een kleinere stroom gaan lopen. De basisstroom wordt dan ook kleiner en dit leidt weer tot het af-

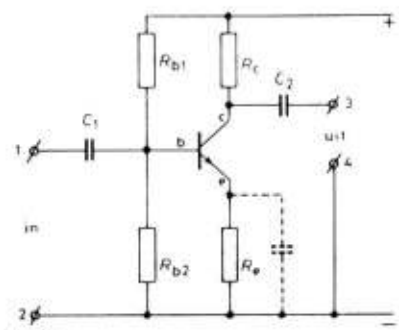
nemen van de collectorstroom. De neiging van de collectorstroom om toe te nemen wordt dus tegengewerkt. Als de waarde van de weerstanden R_c en R_b zo wordt gekozen dat de spanning tussen emitter en collector even groot is als die tussen collector en minleiding, kan in ieder geval geen overbelasting meer optreden door eigenzinnig gedrag van de transistor. Dit is de zogenaamde „halve-spanningsmethode".



Afb. 68
Transistor met halve spanningsschakeling



Afb. 69
Transistorschakeling met ontkoppelcondensator



Afb. 70
Transistorschakeling als 69 nu met NPN-transistor

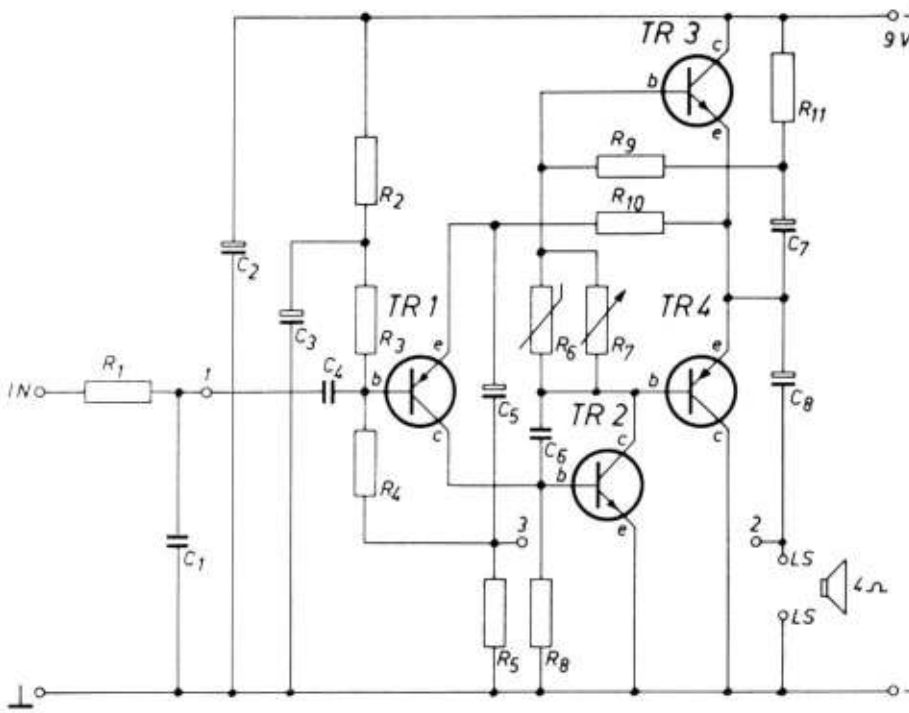
Andere methoden

De „halve-spanningsmethode" heeft een aantal nadelen, zoals de beperkte ontwerpvrijheid. Bovendien worden niet alleen de langzame veranderingen van de collectorstroom (die het gevolg zijn van temperatuurwisselingen) tegengegaan, ook de snelle. Met andere woorden: de versterking vermindert. Er is hier sprake van *tegenkoppeling*, een begrip waarop we later nog eens terug zullen komen.

Een betere methode om de transistor te stabiliseren tegen temperatuurswisselingen is weergegeven in afbeelding 69. De basisspanning, en daarmee de basisruststroom, wordt betrokken van een vaste spanningsdeler tussen plus en min (R_{b1} en R_{b2}).

In de emitterleiding is de weerstand R_e opgenomen, die een betrekkelijk lage weerstandswaarde heeft.

Wat gebeurt er nu als de temperatuur van deze transistor stijgt? Dan neemt de collectorstroom toe. Maar ook de emitterstroom zal dan toenemen, met als gevolg dat de spanning over de emitterweerstand stijgt. De spanning op de basis, afkomstig van de spanningsdeler, blijft echter redelijk constant. Het gevolg van dit alles is dat de spanning over de basis-emitterdiode afneemt. Daardoor neemt de basisstroom af en dit leidt ertoe dat de collectorstroom en dus ook de emitterstroom kleiner worden. Een toenemende collectorstroom wordt dus tegengewerkt door een afnemende basis-emitterspanning. Het effect is hetzelfde als in afbeelding 68: de collectorstroom kan bij stijgende temperatuur maar een heel klein beetje toenemen. Maar ook hier geldt dat niet alleen voor de langzame collectorstroom-veranderingen, maar ook voor de snelle. Ook hier wordt door tegenkoppeling de versterking veranderd. Dit kan worden vermeden door over de emitterweerstand een *ontkoppelcondensator* te monteren (in afbeelding 69 gestippeld getekend), die een voldoend grote capaciteit moet hebben. Deze laat de wisselstroom vrijwel on-



Afb. 71 Schema 2,5 W versterker NL 7014

gehinderd passeren, zodat hij de emitterweerstand voor de wisselstroom als het ware kortsluit. Voor wat de wisselstroom betreft is er dus geen emitterweerstand, dus ook geen tegenwerking. Voorwaarde voor het goed functioneren van deze schakeling is wel dat de weerstanden en condensatoren de juiste waarden hebben.

De schakeling van afbeelding 69 werd vooral in het begin van het transistortijdperk veelvuldig toegepast. Een kenmerk van de schakelingen uit die tijd is ook dat de pluspool van de voeding met massa is verbonden en de minpool met de voedingslijn. Dit komt doordat de eerste (germanium) transistors van het PNP-type waren en pas later de NPN-typen, meestal van silicium, hun intrede deden. De schakeling van afbeelding 69 kunnen we echter zonder bezwaar ook uitvoeren met een NPN-transistor; dan onstaat het schema van afbeelding 70. Merk op dat de pijl in de emitterleiding van de basis af wijst en dat plus en min verwisseld zijn.

PNP en NPN door elkaar

Soms worden PNP- en NPN-transistors door elkaar gebruikt, bij voorbeeld in de eindtrap van sommige versterkers. Twee voorbeelden van dit ,,gemengd dubbel'' vinden we in de 2,5 W-versterker NL 7014 (zie afbeelding 71). Zowel in de voorversterker (TR_1 en TR_2) als in de eindtrap (TR_3 en TR_4) worden een PNP- en een NPN-transistor gecombineerd. In dit schema, met de min aan massa, staan TR_2 en TR_4 als het ware op hun kop.

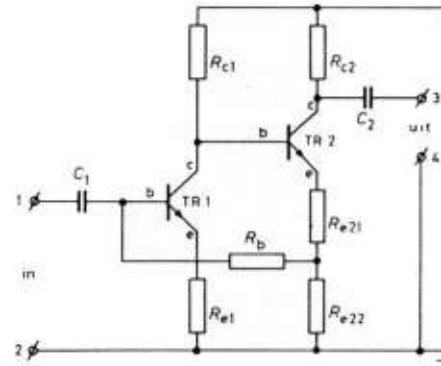
In dergelijke schakelingen zorgt men er altijd voor dat de transistors goed gestabiliseerd zijn en niet op hol kunnen slaan, maar de methoden die wij hier hebben beschreven zijn dikwijls moeilijk terug te vinden.

Vergroten van de versterking

Met één transistor is maar een beperkte versterking mogelijk, vooral als we eisen aan de kwaliteit stellen. Dan kunnen we namelijk niet uit een transistor halen wat erin zit en hebben we al gauw twee of drie achter elkaar geschakelde transistors nodig. We kunnen natuurlijk een aantal schakelingen zoals in de afbeeldingen 69 en 70 zijn getekend, achter elkaar schakelen, maar ook dat is niet ideaal, vooral door de aanwezigheid van de koppelcondensator C_2. Die condensator kunnen we vermijden door de in afbeelding 72 getekende schakeling toe te passen, waarbij de twee NPN-transistors direct, dus zonder koppelcondensator, met elkaar verbonden zijn. Dit kan alleen als de gelijkspanning tussen de collector van TR_1 en de plusleiding een zodanige waarde hebben, dat de basis van TR_2 de juiste voorspanning krijgt en de juiste basis-instelstroom gaat lopen. De stabilisatie van beide transistors is gecombineerd. Dat kunnen we inzien door te veronderstellen dat de collectorstroom van TR_1 wil toenemen als gevolg van een stijging in temperatuur. Dan neemt de spanning over weerstand R_{c1} toe, dus de collector van TR_1 en daarmee de basis van TR_2 worden minder positief. Dit heeft tot gevolg dat de collectorstroom en dus de emitterstroom van TR_2 kleiner wordt.

Daardoor zal de spanning op het knooppunt van R_{e21} en R_{e22} eveneens minder positief worden (de stroom door R_{e22} wordt kleiner, dus ook de spanning over deze weerstand wordt lager). De basis van TR_1 is via een weerstand met dit knooppunt verbonden, dus ook zal de basis van de eerste transistor een lagere instelspanning krijgen. Deze verlaging van de basisspanning werkt de dreigende toeneming van de collectorstroom tegen en de cirkel is dus rond.

Na het voorgaande kunt u zelf nagaan wat er gebeurt als de collectorstroom van TR_2 wil toenemen. U zult



Afb. 72 Versterkingsschakeling met twee NPN transistors

zien dat ook deze toeneming wordt afgeremd. In de praktijk zal het zelden voorkomen dat de collectorstroom van één transistor wil toenemen (of afnemen), want als de temperatuur van de omgeving stijgt zullen beide collectorstromen de neiging hebben toe te nemen.

Uit het voorgaande blijkt echter dat een toeneming van de collectorstroom van bij voorbeeld TR_1 onmiddellijk leidt tot een afneming van de collectorstroom van TR_2 en omgekeerd. Daardoor is de stabilisatie nog beter dan wanneer elke transistor afzonderlijk gestabiliseerd zou worden, bij voorbeeld door tweemaal de schakeling van afbeelding 70 te gebruiken.
Ook in de schakeling van afbeelding 72 geldt natuurlijk dat zij alleen goed functioneert als de weerstanden de juiste waarden hebben. Het berekenen daarvan is echter geen eenvoudige zaak.

Tot dusver hebben we de transistor alleen gebruikt als versterker, maar we kunnen ook nog andere dingen doen met een transistor. Bovendien hebben we ons beperkt tot een aantal varianten van één en dezelfde principeschakeling van de transistor, namelijk de zogenaamde geaarde-emitterschakeling. Er bestaan ook nog geaarde-collector- en geaarde-basisschakelingen. Over al die mogelijke schakelingen zullen wij het hierna hebben.

Drie manieren om een transistor te gebruiken

De transistorschakelingen die we in het vorige hoofdstuk zijn tegengekomen, waren zogenaamde geaarde-emitterschakelingen. In afbeelding 73 hebben we zo'n schakeling, ontdaan van alle franje, nog eens getekend. De schakeling ontleent zijn naam aan het feit dat de emitter verbonden is met de ,,aarde'' ofwel de massa van de schakeling, aangegeven met ⊥ .

We hebben gezien dat de ingangsspanning wordt aangesloten tussen basis en emitter en dat de versterkte uitgangsspanning wordt afgenomen tussen collector en emitter. Ingang en uitgang hebben de emitteraansluiting dus gemeenschappelijk. Daarom wordt deze schakeling ook wel gemeenschappelijke-emitterschakeling genoemd. In beide gevallen is de afkorting GES, dus dat kan geen verwarring geven. Het is echter ook mogelijk de ingangsspanning aan te leggen tussen emitter en basis en de uitgangsspanning af te nemen tussen collector en basis, zoals in afbeelding 74 is getekend. De basis is in dit geval geaard en om voor de hand liggende redenen noemen we deze schakeling geaarde- of gemeenschappelijke-basisschakeling, afgekort tot GBS. Deze schakeling wordt niet veel gebruikt en we zullen er dan ook niet te veel over zeggen.

De derde mogelijkheid om een transistor te schakelen is weergegeven in afbeelding 75. Dit is de geaarde- of gemeenschappelijke-collectorschakeling afgekort tot GCS. De schakeling lijkt bedrieglijk veel op de GES van afbeelding 73, maar bij nadere beschouwing blijkt dat de collector direct met de voedingsspanning (in dit geval de +) en via de condensator met massa is verbonden terwijl de emitter juist van massa gescheiden is door een weerstand. De ingangsspanning wordt aangesloten tussen basis en massa, dus tussen basis en collector, en de uitgangsspanning wordt afgenomen tussen emitter en massa, dus tussen emitter en collector (de collector is immers via de condensator met massa verbonden).

Deze schakeling wordt daarom ook wel emittervolger genoemd.

Het meest opmerkelijke van deze schakeling is dat zij niet versterkt; de ingangsimpedantie is hoog en de uitgangsimpedantie laag.

Hoewel een emittervolger de ingangsspanning niet versterkt, wordt hij toch veel gebruikt om er zwakke signaalbronnen op aan te sluiten, bij voorbeeld een hoogohmige keramische pick-up. Die levert een lage wisselspanning bij een hoge impedantie. Hij kan dus vrijwel geen vermogen leveren, want als we hem aansluiten op een versterker met een lage ingangsimpedantie, blijft er van de toch al zwakke signaalspanning vrijwel niets over.

De emittervolger wordt nu als een tussenschakel gebruikt naar een versterkerschakeling met een lage ingangsimpedantie, omdat hier de uitgangsspanning vrijwel niet wordt beïnvloed door een lage impedantie. De GCS wordt ook wel impedantietransformator of aanpasschakeling genoemd. In het voorgaande hebben we gezien dat een transistor op drie manieren kan worden geschakeld: als GES, als GBS en als GCS. Verder is gebleken dat van zo'n schakeling verschillende eigenschappen belangrijk kunnen zijn, zoals de (spannings)versterking, de ingangsimpedantie en de uitgangsimpedantie. De ideale transistorschakeling heeft een grote versterking (dat spreekt voor zich), een hoge ingangsimpedantie (daardoor wordt de signaalbron vrijwel niet belast) en een lage uitgangsimpedantie (daardoor kan de uitgang flink worden belast, zonder dat de uitgangsspanning noemenswaardig daalt). Maar zoals meestal het geval is in dit ondermaanse, bestaat er ook geen ideale transistorschakeling. Meestal moeten we dus kiezen uit de drie mogelijkheden en daarbij hangt het van de omstandigheden af wat de beste keus is. In onderstaande tabel hebben we de belangrijkste eigenschappen van de

drie mogelijke transistorschakelingen samengevat.

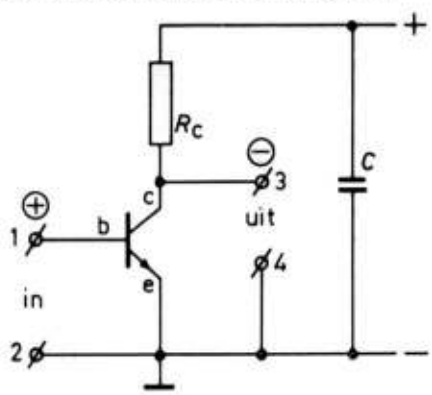
	GES	GBS	GCS
Spannings-versterking	middel-matig	hoog	iets kleiner dan 1
Ingangs-impedantie	middel-matig	zeer laag	zeer hoog
Uitgangs-impedantie	middel-matig	hoog	zeer laag
Afbeelding	73	74	75

De faze

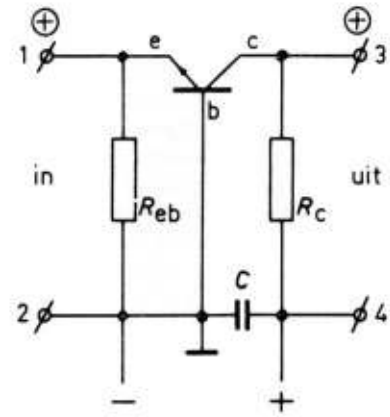
Er is nog een eigenschap van een transistorschakeling die belangrijk kan zijn, en dat is de faze. In de vorige aflevering hebben we gezien dat in een GES bij toenemende ingangsspanning de uitgangsspanning daalt. Dit betekent dat ingangsspanning en uitgangsspanning in tegenfaze zijn. In afbeelding 73 hebben we dit aangegeven met een plus- en minteken in een cirkel.

We hebben kunnen constateren dat bij een GCS of emittervolger de uitgangsspanning stijgt als de ingangsspanning toeneemt (vandaar de naam emittervolger). Bij een GCS zijn ingangsspanning en uitgangsspanning dus in faze. In afbeelding 75 is dit aangegeven met twee plustekens in cirkeltjes.

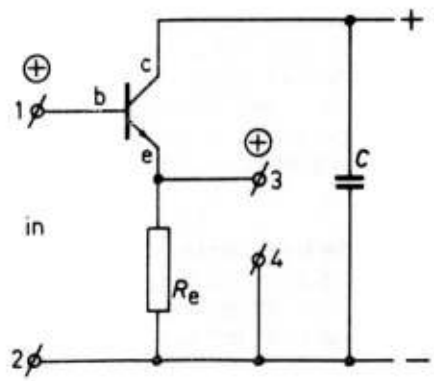
Het is mogelijk de GES van afbeelding 73 en de GCS van afbeelding 75 te combineren. Deze schakeling is in



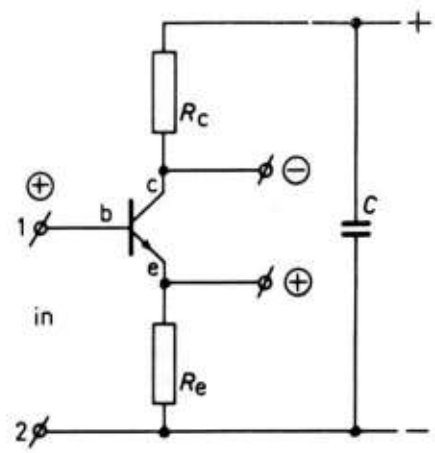
Afb. 73 Geaarde of gemeenschappelijke emitterschakeling (GES).



Afb. 74 Geaarde of gemeenschappelijke basisschakeling (GBS).



Afb. 75 Geaarde of gemeenschappelijke collectorschakeling (GCS).



Afb. 76 Schakeling van een fazedraaier, combinatie van de GES (afb. 73) en de GCS (afb. 75).

afb. 76 weergegeven. We zien daar dat bij het positiever worden van de basis de collectorstroom zal toenemen. Daardoor stijgt de spanning op de emitter, terwijl de spanning op de collector daalt. In de tekening is te zien dat dan de emitterspanning in faze is met de ingangsspanning, terwijl de collectorspanning daarmee in tegenfaze is. Zo krijgen we dus een schakeling waarbij twee spanningen in tegenfaze worden gegeven. Deze schakeling, die we **fazedraaier** noemen, wordt vaak gebruikt om de twee vermogenstransistors van een eindversterker te sturen. Deze twee transistors moeten gestuurd worden met signalen van gelijke grootte, die echter met elkaar in tegenfaze zijn. Als we in de schakeling de collectorweerstand en de emitterweerstand even groot nemen dan zal, omdat de stroom door deze weerstanden ongeveer gelijk is, over beide weerstanden een wisselspanning van gelijke grootte en, zoals we zagen, van tegengestelde faze ontstaan.

Een serie-balanstrap

Een complete serie-balanseindtrap is getekend in afbeelding 77. De twee eindtransistors, beide van het NPN-type, zijn in serie aangesloten op de voedingsspanning. De basis van de bovenste transistor is verbonden met de collector van de fazedraaier, de basis van de onderste transistor met de emitter van de fazedraaier.

Wat gebeurt er nu als we op de basis van de fazedraaier een sinusvormige spanning aansluiten?

Voor de duidelijkheid hebben we de positieve helft van die sinus volgetrokken getekend en de negatieve helft gestippeld, zodat we ze op hun weg door de eindversterker gemakkelijk kunnen volgen.

De fazedraaier versterkt het signaal niet, maar levert aan de emitter een spanning die overeenkomt met het ingangssignaal en aan de collector een spanning die ,,omgeklapt'' is; de positieve halve periode is negatief geworden en de negatieve positief. De basis van de eindtransistors krijgen dus gelijke maar in tegenfaze zijnde signalen toegevoerd.

We veronderstellen dat de eindtrap (onder meer met enkele niet getekende weerstanden) zo is ingesteld dat er, bij afwezigheid van een signaal, een verwaarloosbare ruststroom door de eindtransistors loopt. Die twee transistors vormen dan een spanningsdeler met twee gelijke ,,weerstanden'' en zoals we hebben gezien is de spanning op de aftakking van zo'n spanningsdeler, in dit geval dus op de linkerplaat van de condensator, precies de helft van de voedingsspanning. De condensator wordt dus via LS opgeladen tot de halve voedingsspanning.

De eerste halve periode stuurt TR_3 open en doordat TR_2 tegelijkertijd een negatief gemaakte halve periode krijgt toegestuurd, wordt deze transistor dichtgestuurd. De condensator, die een zeer grote waarde heeft, gaat zich nu ontladen via TR_3 en de luidspreker, zoals met volgetrokken pijlen is aangegeven.

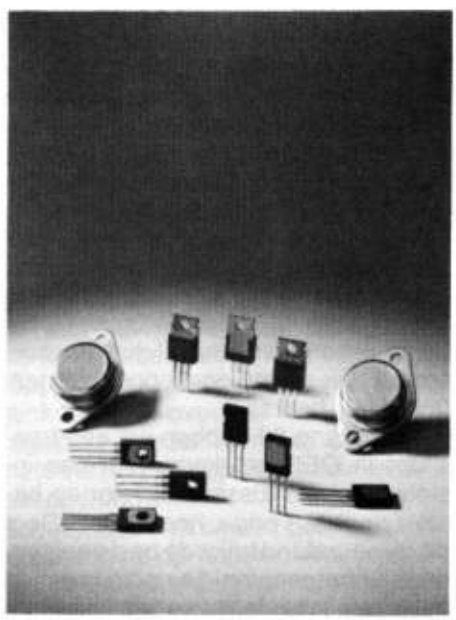
Bij de volgende halve periode is het net andersom. TR_3 wordt dichtgezet en TR_2 wordt opengestuurd. Er zal nu een stroom gaan lopen van de plus van de voedingsspanning, via TR_2, de condensator en de luidspreker naar de min van de voedingsspanning. Dit is aangegeven met de gestippelde pijlen. We zien dat de stroom door de luidspreker nu in omgekeerde richting gaat. De stroom keert niet alleen om, maar neemt ook geleidelijk toe en af, zodat er dus een sinusvormige wisselstroom door de luidspreker gaat.

De ene eindtransistor ,,drukt'' en de andere ,,trekt''. Vandaar dat Engelssprekenden zo'n schakeling een ,,push-pull''-versterker noemen. Wij zeggen er balansversterker tegen en omdat de eindtransistors in serie zijn geschakeld, noemen we de schakeling een serie-balansversterker.

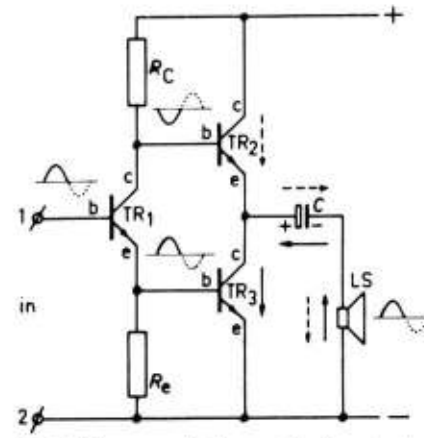
We hebben gezien dat een transistor in principe een stroomversterker is, maar dat we er meestal een spanningsversterker van maken door middel van collector- en emitterweerstanden. Bij

een eindversterker gaat het echter niet om de spanning, maar om de stroom die door de luidspreker wordt gestuurd. Deze heeft meestal een zeer lage weerstand (4 of 8 ohm). Daarom is een eindversterker altijd een stroomversterker.

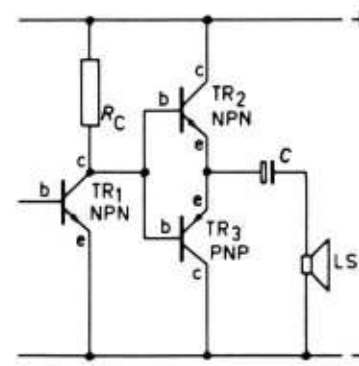
Het is mogelijk de fazedraaier te vermijden door de eindtrap uit te rusten met zogenaamde complementaire transistors waarvan alle eigenschappen gelijk zijn, maar waarvan de ene een PNP- en de andere een NPN-type is. Zo'n eindtrap is getekend in afbeelding 78. Ook in deze schakeling versterkt elke transistor de helft van de sinus, zodat door de luidspreker toch weer een complete wisselstroom vloeit. Een voordeel van deze schakeling is dat de eerste transistor zo kan worden ingesteld dat hij versterkt, in tegenstelling tot de fazedraaier in afbeelding 77. Een nadeel is dat het niet zo eenvoudig is complementaire transistors te maken die volkomen gelijke eigenschappen hebben.



Enige Darlington transistors voor uitgangsschakelingen van audioversterkers.



Afb. 77 Vereenvoudigde serie-balanseindtrap.

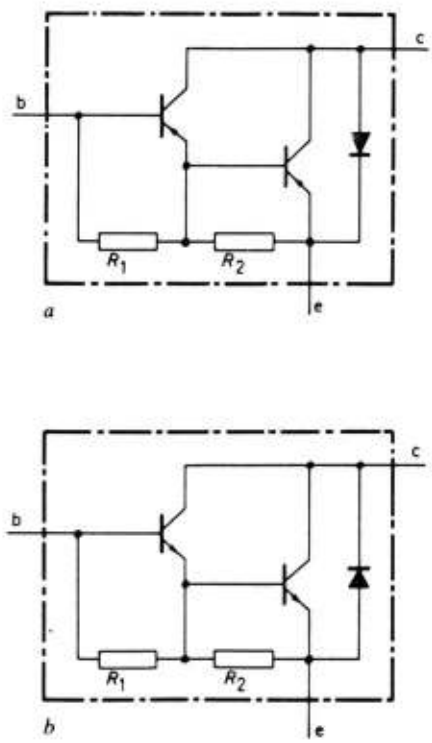


Afb. 78 Eindtrap met complementaire PNP- en NPN-transistors.

Darlingtons

Eindtransistors hebben de taak zoveel mogelijk vermogen te leveren aan de luidspreker. Het zijn, zoals we hebben gezien, typische stroomversterkers. Door de aard van hun constructie vragen ze nogal wat stuurvermogen. Ook de transistor die wordt gebruikt om de eindtransistors te sturen moet dus een behoorlijk vermogen kunnen leveren, dat wil zeggen meer als stroomversterker dan als spanningsversterker fungeren. Omdat stuurtransistor en eindtransistor heel vaak in een zelfde schakeling bij elkaar worden gebruikt, heeft men al jaren geleden een zogenaamde Darlingtonschakeling bedacht, die in afbeelding 79 is getekend.

Zo'n Darlingtonschakeling kan men zelf bouwen met een eindtransistor, een stuurtransistor en enkele weerstanden. Het blijkt echter grote voordelen te hebben de hele Darlingtonschakeling te integreren op een enkel schijfje silicium. De twee transistors ondergaan dan dezelfde temperatuurwisselingen, evenals de weerstanden. Dat is van belang in verband met de stabiliteit. Zo'n complete Darlington op één schijfje silicium is in feite maar een kleine geïntegreerde schakeling, maar in de praktijk merk je daar niets van want een Darlington heeft, net als een gewone transistor, drie aansluitingen die als basis, collector en emitter kunnen worden beschouwd. Het belangrijkste verschil met een gewone eindtransistor is dat een Darlington veel meer versterkt. De stroomverdeling kan wel 1000 tot 1500 maal bedragen, vergeleken met bij voorbeeld 20 à 30 maal bij een gewone eindtransistor.
Een voordeel van een Darlington is verder dat de versterker minder transistors hoeft te bevatten en dus sneller en met minder kans op fouten gemonteerd kan worden. Darlingtons zijn er zowel in PNP- (afbeelding 79a) als in NPN-uitvoering (afbeelding 79b).

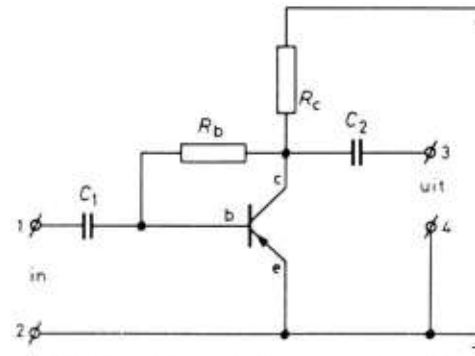


Afb. 79 Darlingtons in PNP- (a) en NPN- (b) uitvoering.

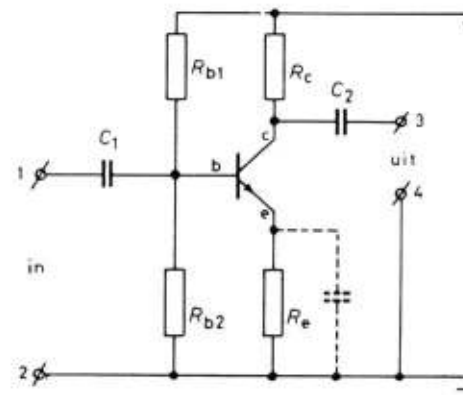
Terugkoppeling

In alle versterkers krijgen we bedoeld of onbedoeld te maken met terugkoppeling; dat is, populair gezegd, het terugvoeren van een signaal naar een punt dat meer naar voren in de versterker ligt. Is de faze van het teruggevoerde signaal zodanig dat het oorspronkelijke signaal wordt tegengewerkt (de twee signalen zijn dan in de tegenfaze), dan spreken we van tegenkoppeling. In gewone versterkers is altijd sprake van tegenkoppeling, want in het andere geval, wanneer het teruggekoppelde signaal dezelfde faze heeft als het oorspronkelijke signaal en de signalen elkaar dus ondersteunen, bestaat er een grote kans op genereren of oscilleren. Hoewel de term niet erg gebruikelijk is, kunnen we in dit geval spreken van meekoppeling. Meekoppeling wordt alleen toegepast als we willen dat de versterker gaat genereren of oscilleren, dus als we bewust een signaal willen opwekken.
Tegenkoppelen en meekoppelen zijn dus de twee vormen van terugkoppelen. Het teruggekoppelde signaal hoeft natuurlijk niet precies in faze of in tegenfaze met het oorspronkelijke signaal te zijn. Ook alle „tussenfazen" zijn in principe mogelijk. Maar voorlopig beperken we ons tot de twee duidelijkste vormen van terugkoppelen, waarbij het fazeverschil tussen oorspronkelijk en teruggekoppeld signaal 0° of 180° bedraagt.
In afbeelding 80 hebben we een transistor in GES getekend, met een instelweerstand tussen collector en basis (zie het vorige hoofdstuk). Door deze weerstand krijgt de basis een geringe voorspanning die nodig is om de transistor in te stellen en te stabiliseren tegen temperatuurveranderingen. Via deze weerstand komt echter ook een deel van het versterkte signaal van de

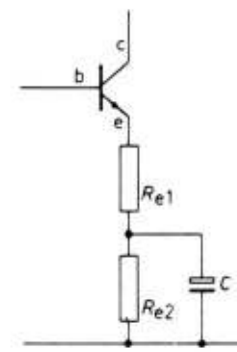
collector in tegenfaze terug op de basis. Er is dus sprake van tegenkoppeling. Het gevolg is dat de schakeling minder versterkt. Het voordeel van tegenkoppeling is echter dat daardoor de vervorming wordt gereduceerd. In dit korte bestek zou het te ver voeren om een volledige uitleg te geven van de ingewikkelde werking van tegenkoppeling.
In afbeelding 80 is de weerstand tussen collector en basis tamelijk groot, waardoor de tegenkoppeling niet sterk is.
In afbeelding 81 is een andere methode getekend om de transistor in te stellen. In een vorig hoofdstuk is deze schakeling ook al ter sprake geweest. Er is hier geen weerstand tussen collector en basis, dus tegenkoppeling wordt langs deze weg niet veroorzaakt. Maar de niet-ontkoppelde emitterweerstand veroorzaakt hetzelfde effect. Dat kunnen we als volgt inzien. Als de spanning op de basis stijgt, zal ook de spanning over de emitterweerstand stijgen. Dit werkt het spanningsverschil tussen basis en emitter tegen. We kunnen hieruit zien, dat de spanning over de emitterweerstand de stuurspanning op de basis zal tegenwerken. Dus ook hier is sprake van tegenkoppeling.



Afb. 80. Transistor in GES met tegenkoppeling via instelweerstand tussen collector en basis.



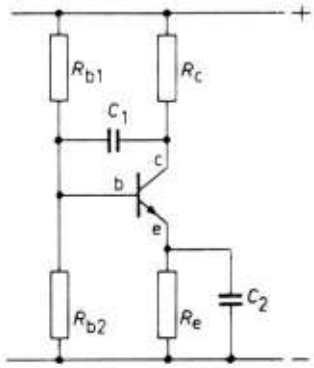
Afb. 81. Schakeling met tegenkoppeling via de emitterweerstand.



Afb. 82. Tegenkoppeling met „opgedeelde" emitterweerstand.

„Gedeeltelijke" tegenkoppeling

Als de tegenkoppeling niet gewenst is, kan de emitterweerstand worden ontkoppeld door middel van een flinke condensator, zoals in afbeelding 81 gestippeld is aangegeven.
Het kan ook wenselijk zijn dat een versterker „gedeeltelijk" wordt tegengekoppeld. Dat kan betekenen dat de tegenkoppeling over het hele frequentiegebied minder sterk is, of dat de mate van tegenkoppeling afhankelijk is van de frequentie.
Het eerste wordt bereikt door de emitterweerstand op te delen in twee stukken en één deel hiervan te ontkoppelen, zoals in afbeelding 82 is getekend.
Een frequentie-afhankelijke tegenkoppeling kan bij voorbeeld worden bereikt door de waarde van de condensator zo klein te kiezen, dat de emitterweerstand voor de hoge frequenties wel voldoende ontkoppeld is en voor de lage frequenties niet. De tegenkoppeling voor de lage tonen is dan groter en de schakeling zal de



Afb. 83. Frequentie-afhankelijke tegenkoppeling.

hoge tonen dus meer versterken dan de lage.
Zo'n frequentie-afhankelijke tegenkoppeling kan ook worden bereikt door tussen collector en basis een kleine condensator op te nemen, zoals in afbeelding 83 is getekend. Deze voert de hoge frequenties wel (in tegenfaze) terug naar de basis, maar de lage niet. Hier is de tegenkoppeling voor de hoge frequenties groter dan die voor de lage en de schakeling zal de lage frequenties dus meer versterken dan de hoge. Merk op dat de terugkoppelcondensator „dezelfde plaats" inneemt als de weerstand in afbeelding 80.

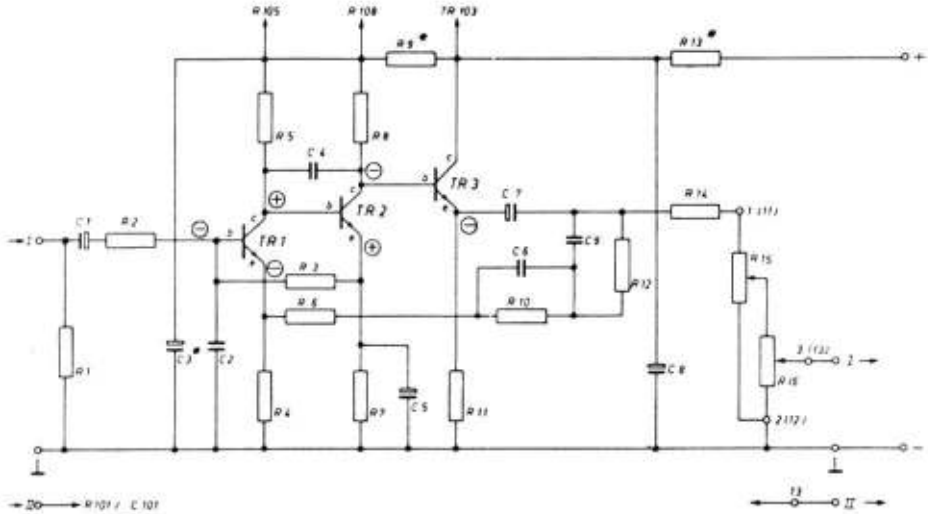
Tegenkoppeling over meer transistors

Het is ook mogelijk tegen te koppelen in een schakeling die verscheidene transistors omvat. Dit wordt geïllustreerd door de voorversterker NL 7306, waarvan in afbeelding 84 het schema is weergegeven. Ook in zo'n geval kan de tegenkoppeling frequentie-afhankelijk of frequentie-onafhankelijk zijn.
Tegenkoppeling alleen voor de hoge frequenties vindt plaats via C_4 tussen basis en collector van TR_2.
Er is nog een tegenkoppeling aanwezig in deze versterker, maar die is wat lastiger te ontdekken. Deze tegenkoppeling vindt plaats via het netwerk C_9-C_6-R_{10}-R_{12}-R_6, tussen TR_3 en TR_1. Dit netwerk is frequentie-afhankelijk. Daardoor zal de schakeling de lage tonen meer versterken (minder tegenkoppeling) dan de hoge. Het netwerk is zo bemeten, dat de versterker de bekende RIAA-karakteristiek krijgt die nodig is voor het natuurgetrouw weergeven van grammofoonplaten.
Aan de plusjes en minnetjes te zien lijkt het alsof het tegenkoppelsignaal in faze is met het signaal over de emitter van TR_1, zodat er sprake lijkt te zijn van meekoppeling. Het teruggekoppelde signaal werkt echter de basis-emitterspanning van TR_1 tegen en deze wordt dus lager dan zonder terugkoppeling het geval zou zijn geweest, dus hier is toch sprake van tegenkoppeling.
De emitterweerstand van TR_1 is natuurlijk niet ontkoppeld, anders zou het hele effect verloren gaan.
De emitterweerstand van TR_2 is daarentegen wel ontkoppeld. Daardoor voert deze emitter geen wisselspanning. De terugkoppelweerstand R_3 levert dan ook alleen maar een tegenkoppelsignaal aan de basis van TR_1 voor frequenties die zo laag zijn, dat de ontkoppelcondensator C_5 de veranderingen kan bijbenen. Dat is alleen het geval voor stroomveranderingen die het gevolg zijn van temperatuurwisselingen (z.g. gelijkstroom-tegenkoppeling). R_3 dient dus alleen voor het stabiliseren van de beide transistors tegen temperatuurvariaties. Deze vorm van stabiliseren (in feite ook een vorm van tegenkoppeling) zijn we verder tegengekomen in de schakeling van afbeelding 72 in een voorgaand hoofdstuk.
Condensator C_7 speelt geen rol bij de tegenkoppeling maar dient alleen om te voorkomen dat de gelijkspanning over R_{11} wordt beïnvloed door het tegenkoppelnetwerk en het netwerk met R_{14} enz.

In afbeelding 84 zijn TR_1 en TR_2 direct gekoppeld (zonder koppelcondensator); beide zijn „geaarde-emitterschakelingen", TR_3 is een „geaarde-collectorschakeling" of emittervolger.

Meekoppeling

Als een signaal in faze wordt terugge-



Afb. 84. Voorversterker van NL 7306.

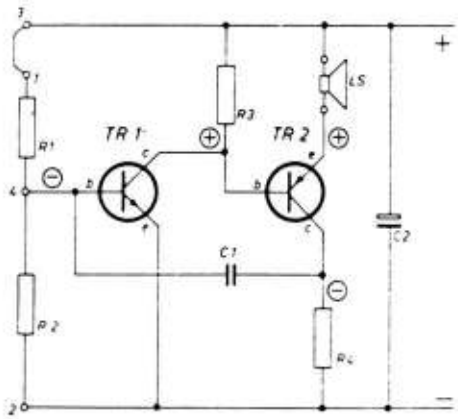
voerd naar een punt „meer naar voren", is er sprake van meekoppeling. Het oorspronkelijke ingangssignaal wordt vergroot met het teruggekoppelde signaal dat vanaf de uitgang wordt teruggevoerd. Doordat het totale ingangssignaal hierdoor groter wordt, zal ook het uitgangssignaal in sterkte toenemen. Daardoor wordt het teruggekoppelde signaal weer groter en daarmee het ingangssignaal. Kortom: binnen de kortste keren wordt het uitgangssignaal zo groot als met de aangelegde voedingsspanning maar mogelijk is. Zelfs als we nu het oorspronkelijke ingangssignaal wegnemen blijft de schakeling genereren, dat wil zeggen zelf een signaal opwekken.

Van dit verschijnsel kunnen we bewust gebruik maken om bij voorbeeld een toongenerator te bouwen. De terugkoppeling is daarbij in faze. Overigens dient hierbij wel een zekere begrenzing te worden toegepast omdat het „voluit" genereren niet bepaald een goede sinusvorm zou opleveren.

Het verschijnsel kan ook ongewild optreden, waardoor een versterker verandert in een soort toongenerator. Als de meekoppeling erg sterk is ontstaat geen gelijkmatige toon maar een geluid als bij voorbeeld het bekende „motorboten". Ook kan er, als de meekoppeling wat minder sterk is, een giltoon uit de luidspreker komen. Maar het is ook mogelijk dat de versterker gaat genereren op een frequentie die boven de gehoorgrens ligt. Het genereren zelf horen we dan niet, maar de invloed ervan op de weergave is meestal duidelijk te merken doordat de vervorming erbarmelijk wordt.

Ongewenst genereren van een versterker is meestal het gevolg van verkeerde bedrading. Als bij voorbeeld de bedrading van de eindversterker te dicht in de buurt van de gevoelige ingang van de versterker komt kan genereren optreden. Dat kan ook gebeuren bij zogenaamde „aardfouten", als de massaverbindingen van eindversterker en voorversterker gedeeltelijk samenvallen.

Frequentie-onafhankelijke meekoppeling komt niet veel voor; dit in tegenstelling tot de veel toegepaste frequentie-onafhankelijke tegenkoppeling. De reden is dat het er bij meekoppeling meestal om gaat een signaal van een bepaalde frequentie op te wekken. Het

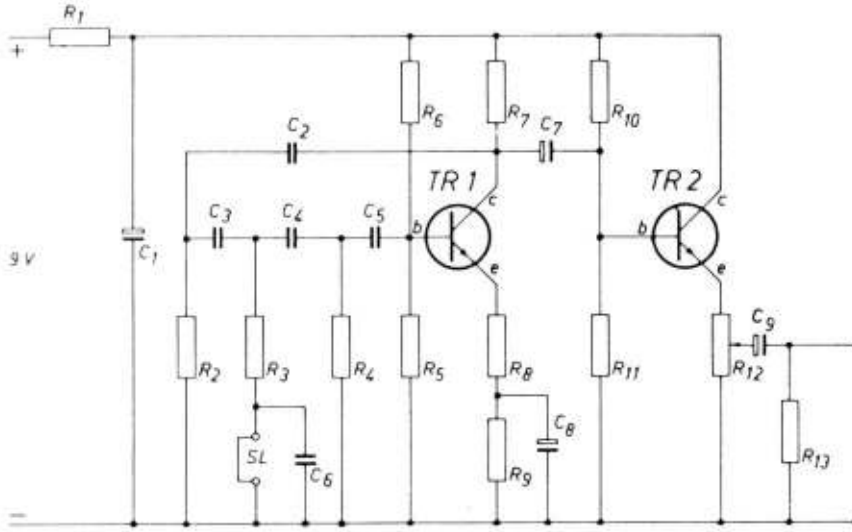


Afb. 85. Elektronische zoemer met meekoppeling voor de hogere frequenties.

meekoppelnetwerk wordt dan zo ingericht dat alleen voor die ene, gewenste frequentie aan de genereervoorwaarde wordt voldaan. Dit wil zeggen dat alleen voor die frequentie het teruggekoppelde signaal minstens gelijk in grootte en precies in faze is met het oorspronkelijke signaal. Voor alle andere frequenties is er een fazeverschil, waardoor bij de frequenties geen genereren kan optreden. Een gedeeltelijk frequentie-afhankelijke meekoppeling vinden we in de schakeling van de elektronische zoemer H 6714, waarvan in afbeelding 85 het schema is weergegeven. Aan de plusjes en minnetjes is te zien dat hier inderdaad sprake is van meekoppeling. De frequentie wordt hier echter niet duidelijk bepaald. Het genereren wordt namelijk alleen in de lage frequenties tegengegaan, maar voor het overige is er weinig „rem" op de meekoppeling.
Oplettende lezers zullen misschien opmerken dat er helemaal geen sprake is van een „oorspronkelijk" signaal dat, na versterking, in faze wordt teruggevoerd naar de ingang. In elke schakeling treedt echter „ruis" op en ruis kan worden beschouwd als een signaal waarin alle frequenties voorkomen. Een generator selecteert uit die ruis een signaaltje met een frequentie waarvoor aan de genereervoorwaarde is voldaan en beschouwt dat als het oorspronkelijke signaal. Dit zeer zwakke signaal hoeft maar een klein beetje versterkt te worden om via het meekoppelnetwerk sterker op de ingang te verschijnen. Zolang het teruggekoppelde signaal maar sterker is dan het oorspronkelijke ruissignaaltje, zal de generator aan de gang gaan. Er treedt dan namelijk een soort lawineeffect op. De terugkoppeling vindt in afbeelding 85 plaats via condensator C_1. Het teruggekoppelde signaal is in faze met het oorspronkelijke „ruissignaal" op de basis van TR_1. Merk op dat TR_2 op zijn kop staat, met de collector aan de onderkant.
De generator van deze elektronische zoemer is dus niet helemaal zuiver op de graat. De frequentie-afhankelijkheid wordt bepaald door de terugkoppelcondensator C_1. De toonhoogte van de zoemer kan worden gewijzigd door voor C_1 verschillende waarden te kiezen. Voor deze zoemer werd de getekende schakeling gekozen, omdat hier het genereren tamelijk „wild" optreedt. Het levert een soort blokjes-signaal op met vele boventonen, waardoor een „alarmerend" geluid uit de luidspreker komt. En dat is precies de bedoeling.

Een toongenerator

Een voorbeeld van een generator die maar één toon van een bepaalde frequentie opwekt is de 1000 Hz-generator R 6830, waarvan in afbeelding 86 het schema is weergegeven. De terugkoppeling vindt plaats vanaf de collector van TR_1 naar de basis van dezelfde transistor. Collector- en basissignaal zijn van nature in tegenfaze, maar door het netwerk van vier condensatoren en vier weerstanden tussen collector en basis wordt bij een frequentie van 1000 Hz de faze precies 180° gedraaid. Theoretisch kan met één condensator de faze 90° worden gedraaid, maar de weerstanden maken dat de verdraaiingshoek kleiner is, zodat er een aantal combinaties van weerstanden en condensatoren nodig is (de R 6830 heeft drie van deze „takken"). De waarde van condensatoren en



Afb. 86. Schema van de 1000 Hz-generator R 6830.

weerstanden is zo gekozen dat alleen voor een frequentie van 1000 Hz aan de genereervoorwaarde wordt voldaan (rondgaande versterking groter dan 1 en het teruggekoppelde signaal precies in faze). Onder „rondgaande versterking groter dan 1" verstaan we het volgende. Als we de basis van TR_1 losmaken en op deze basis een zwak signaaltje met een frequentie van 1000 Hz aansluiten, moet het signaal dat via het terugkoppelnetwerk over de (losgenomen) weerstand R_5 staat, groter zijn dan het oorspronkelijke.
Om de vervorming te verkleinen en dus een zuivere toon van 1000 Hz te krijgen, is de emitterweerstand van TR_1 gedeeld en is het onderste deel ontkoppeld met een grote condensator. Het bovenste, niet-ontkoppelde deel geeft enige tegenkoppeling ter beperking van de vervorming. TR_1 moet ongehinderd kunnen genereren. Als deze transistor te zwaar belast zou worden, zou de rondgaande versterking wel eens kleiner dan 1 kunnen worden en dan genereert de zaak niet. Daarom is via C_7 een emittervolger aangesloten op de collector van TR_1. Eerder hebben we gezien dat één van de voornaamste kenmerken van een emittervolger de zeer hoge ingangsimpedantie is. De emittervolger belast de generator dus vrijwel niet.
Verder heeft een emittervolger een lage uitgangsimpedantie, en dat is in dit geval ook gunstig. De uitgang kan nu flink worden belast, zonder dat de uitgangsspanning merkbaar daalt. Als het apparaat, waarop de 1000 Hz-generator wordt aangesloten, een ingangsimpedantie heeft van slechts 1000 ohm, is de belasting al te verwaarlozen. Meestal is die ingangsimpedantie aanzienlijk hoger.

De transistor als schakelaar

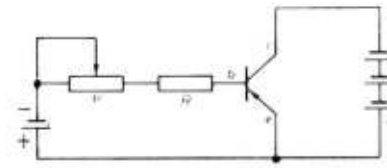
In het vorige hoofdstuk hebben we de schakeling van afbeelding 87 ten tonele gevoerd. Met die schakeling konden we de collectorstroom variëren door aan de potentiometer te draaien. Met de loper van de potentiometer helemaal naar links was de collectorstroom minimaal en met de loper geheel naar rechts maximaal. Tussen die twee uitersten kon de collectorstroom in principe elke waarde hebben. Er zijn dus oneindig veel mogelijke stroomsterkten tussen minimum en maximum. De transistor is in dit geval gebruikt als „lineaire" versterker of, om een modern woord te gebruiken, als *analoge* versterker. Analoog wil dus

zeggen dat er tussen twee grenswaarden oneindig veel tussenwaarden zijn. Een potentiometer is dus analoog, maar ook een klok met wijzers.

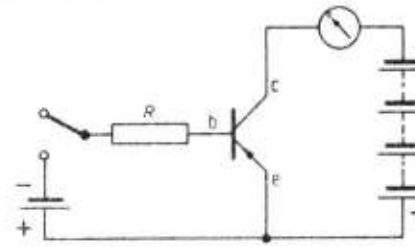
Tegenover analoog staat het begrip *digitaal*. Digitaal wil oorspronkelijk zeggen dat het betrekking heeft op (het tellen met) de vingers, dus van 1 tot 10. In de praktijk wil het zeggen dat het aantal ,,waarden'' eindig (dus niet oneindig) is. Een gaaf voorbeeld van een digitaal onderdeel is een aan/uit-schakelaar. Deze kan immers maar twee ,,waarden'' aannemen: aan en uit. Een klein beetje meer aan of een beetje meer uit gaat niet.
Het aantal mogelijkheden hoeft niet altijd twee te zijn. Ook een schakelaar met twaalf standen is digitaal, want het aantal mogelijke ,,waarden'' is beperkt tot twaalf. 11½ kan niet, laat staan 11,378.

Hieruit blijkt wel dat een digitale klok digitaal is omdat de cijfers telkens verspringen en niet geleidelijk veranderen. Om dezelfde redenen is de kilometerteller van een auto digitaal, maar de snelheidsmeter analoog.

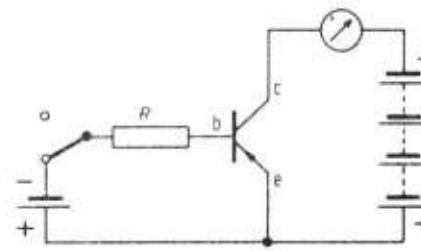
Terug naar de transistor. In afbeelding 88 hebben we de ,,analoge'' potentiometer van afbeelding 87 vervangen door een ,,digitale'' schakelaar met twee standen. We kunnen de collectorstroom nu niet meer fijn regelen. Als de schakelaar omhoog staat, zoals in afbeelding 88a, loopt er helemaal geen collectorstroom. Zetten we de schakelaar omlaag, zoals in afbeelding 88b, dan loopt de maximale collectorstroom. Het is dus alles of niets. Het gedrag van de transistor lijkt een beetje op dat van een aan/uit-schakelaar. In het eerste geval loopt er geen stroom door de transistor en is de transistorschakelaar open; in het tweede geval is de transistorschakelaar gesloten en loopt de maximale stroom. De schakeling van afbeelding 88 lijkt misschien een beetje kinderachtig, maar in feite de grondslag waarop alle moderne computers gebouwd zijn. Honderddui-



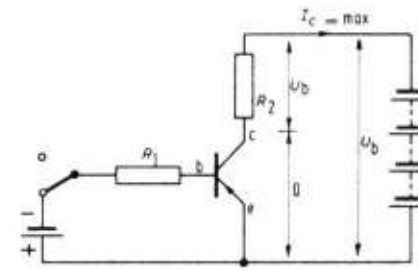
Afb. 87. Transistorschakeling met variabele collectorstroom



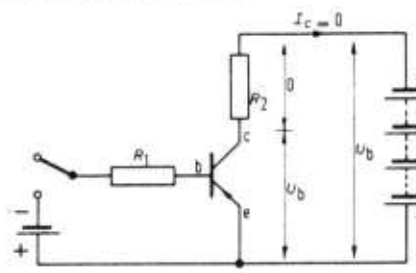
Afb. 88a. Transistorschakeling met ,,digitale'' schakelaar. Stand ,,uit''



Afb. 88b. Stand ,,aan''



Afb. 89a. Schakeling met volle batterijspanning over de collectorweerstand



Afb. 89b. Schakeling met volle batterijspanning tussen emitter en collector.

zenden van deze *schakeltransistors* die elkaar besturen volgens ijzeren wetten vormen samen zo'n computer.

Toch lijkt de schakeling van afbeelding 88 weinig perspectief te bieden. Als het de bedoeling is een stroom in en uit te schakelen, kunnen we beter meteen de mechanische schakelaar daarvoor gebruiken. Het enige voordeel van deze schakeling kan zijn dat we een zeer teer schakelaartje kunnen gebruiken om een kanjer van een transistor te schakelen. Door het schakelaartje loopt dan alleen de betrekkelijk kleine basisstroom van de transistor, maar dank zij de versterkende eigenschappen van de transistor is de collectorstroom groot en sterk. In feite lijkt deze schakeling nog het meest op een relais.

Voordat we gaan bezien wat de mogelijkheden zijn als we twee of meer transistors combineren, maken we eerst nog een paar belangrijke kanttekeningen.

De koele schakeltransistor

Voor ,,transistorschakelaars'' worden soms speciale schakeltransistors gebruikt, die op ondergeschikte punten afwijken van de ,,lineaire'' transistors. Maar met de gewone lineaire transistors kan ook heel goed een transistorschakelaar worden gemaakt.

De waarden van spanningen en weerstanden worden bij transistorschakelaars meestal zo gekozen, dat de transistor in de ,,aan''-stand *verzadigd* is. Dit betekent dat de collectorstroom niet verder kan toenemen als de basisstroom groter wordt. In deze verzadigde toestand is de spanning tussen collector en emitter bijna nul. Deze toestand is weergegeven in afbeelding 89a. Doordat de spanning over de transistor praktisch gesproken nul is, staat de volle batterijspanning over de collectorweerstand.

Het andere uiterste is getekend in afbeelding 89b. Nu is de transistor *afgeknepen*. Er loopt geen collectorstroom en er gaat dus ook geen stroom door de collectorweerstand. Volgens de wet van een zekere heer Ohm is de spanning over de weerstand dus nul, waaruit volgt dat de volle batterijspanning tussen emitter en collector van de transistor staat.

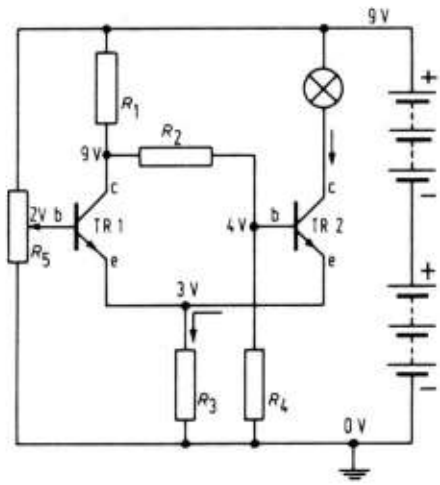
Zoals bekend wordt in een elektrisch element, of dat nu een weerstand of een transistor is, elektrische energie omgezet in warmte. De hoeveelheid energie is het produkt van stroom en spanning. Anders gezegd: P (W) = U (V) × I (A).
In de situatie van afbeelding 89a loopt er weliswaar een grote stroom door de transistor, maar de spanning tussen collector en emitter is bijna nul. In de transistor wordt dus bijna geen warmte opgewekt (in de formule wordt $V = 0$ V, dus ook de energie P is nul).
Iets soortgelijks doet zich voor in de situatie van afbeelding 89b. Nu staat er een flinke spanning tussen collector en emitter van de transistor, maar de collectorstroom is nul. Ook nu wordt er dus geen warmte in de transistor ontwikkeld.

Hieruit blijkt: of de transistor nu open (,,verzadigd'') of dicht (,,afgeknepen'') is, altijd is óf de spanning over de transistor, óf de stroom erdoor nul. In beide situaties wordt de transistor dus vrijwel niet warm.

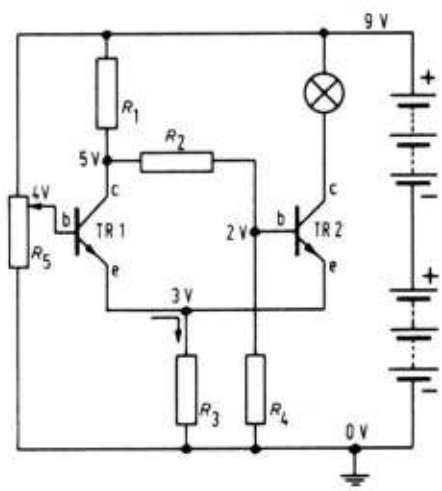
De trigger van Schmitt

Als we twee transistors combineren, ontstaan meteen veel interessanter mogelijkheden. In afbeelding 90 hebben we een zogenaamde Schmitt-trigger getekend, bestaande uit twee gekoppelde NPN-transistors. We hebben deze schakeling betrapt op een moment dat de linker transistor gesperd is. De spanningen ten opzichte van massa hebben we op verschillende punten in de schakeling aangegeven (de spanningen zijn benaderde waarden, alleen bedoeld om aan te geven wat er in de schakeling gebeurt).
Doordat potentiometer R_5 zover naar

beneden geschoven is dat de spanning op de basis van TR_1 maar 2 V bedraagt, terwijl de emitterspanning 3 V bedraagt, is TR_1 afgeknepen. Door R_1 loopt dus geen collectorstroom, en als er geen stroom door een weerstand loopt (de kleine stroom via R_2 en R_4 verwaarlozen we maar even), staat er ook geen spanning overheen. De spanning op de collector van TR_1 is dus 9 V.



Afb. 90. Schmitt-trigger, met TR_1 geblokkeerd



Afb. 91. Schmitt-trigger met TR_2 geblokkeerd

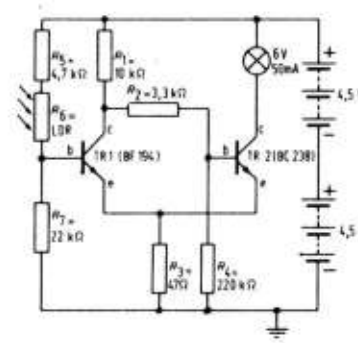
De spanningsdeler van R_2 en R_4 is zo gemaakt, dat TR_2 een basisspanning van 4 V heeft (de spanning van 9 V op de collector van TR_1 deelt zich over de twee genoemde weerstanden).
Het is duidelijk dat TR_2 geleidt, want de basisspanning is hoger dan de emitterspanning. De emitterstroom van TR_2 zorgt voor de spanning van 3 V over R_3.

Wat gebeurt er nu als we de loper van de potentiometer zover omhoog schuiven dat de basisspanning van TR_1 hoger wordt dan de emitterspanning, zodat deze transistor gaat geleiden? Dan zal door R_1 de collectorstroom van TR_1 gaan lopen. Daardoor zal over deze weerstand een spanning ontstaan en zal de collectorspanning van TR_1 dalen tot bij voorbeeld 5 V. De basisspanning van TR_1 is echter via de spanningsdeler gekoppeld met de collectorspanning van TR_1; die basisspanning zal dus dalen tot ongeveer 2 V, dat wil zeggen lager worden dan de emitterspanning. Hierdoor zal TR_2 afgeknepen worden. De rollen zijn nu omgekeerd, zoals in afbeelding 91 is getekend. De beide transistors beïnvloeden elkaar ook via de gemeenschappelijke emitterweerstand *R3*. Als TR_1 bij voorbeeld meer stroom gaat trekken, zal de spanning over de gezamenlijke emitterweerstand toenemen. Daardoor zal de emitterspanning van TR_2 hoger worden en zal de basisemitterspanning van deze transistor afnemen. Daardoor neemt de emitterstroom van TR_2 af. Er onstaat een soort lawine-effect.
Het slot van het liedje is dat TR_1 geleidt en TR_2 afgeknepen is. Deze situatie hebben we, zoals gezegd, weergegeven in afbeelding 91. De essentie van deze Schmitt-trigger is dat de twee transistors niet beide tegelijk kunnen geleiden, maar ook niet beide tegelijk afgeknepen kunnen zijn. Als de basisspanning van TR_1 laag is, geleidt TR_2 en is TR_1 afgeknepen. Bij stijgende spanning op de basis van TR_1 klapt de schakeling plotseling om: TR_1 gaat geleiden en TR_2 is gesperd. Schuiven we

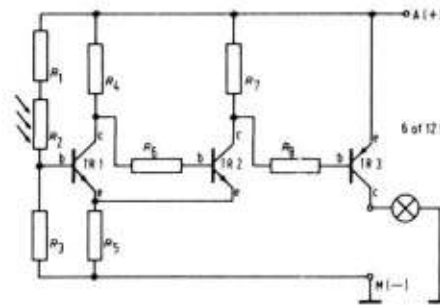
de loper van de potentiometer nu weer zover naar beneden dat de basisspanning van TR_1 lager wordt dan de emitterspanning, dan gaat TR_1 weer dicht en TR_2 open.
Het lampje in de collectorleiding van TR_2 brandt dan ook volop of helemaal niet. Op halve kracht branden is er niet bij.

Een praktische Schmitt-trigger

De schakeling van afbeelding 90 en 91 heeft niet veel praktische betekenis. Zij diende alleen maar om het principe van de Schmitt-trigger duidelijk te maken. Met een kleine verandering kunnen we er echter een uiterst praktische schakeling van maken, namelijk door de potentiometer te vervangen door een spanningsdeler met een lichtgevoelige weerstand (LDR). We krijgen dan de schakeling van afbeelding 92 (ontleend aan een der EE-experimenteerdozen). Als de LDR verduisterd is, is de weerstand hoog. De basisspanning van TR_1 is dan laag en deze transistor is afgeknepen. Dan moet TR_2 geleiden en het lampje branden.
Als er een bepaalde hoeveelheid licht op de LDR valt, zal de weerstand daarvan zoveel afnemen dat TR_1 gaat geleiden. TR_2 zal dan gesperd zijn en het lampje is gedoofd. Wat we hier hebben is een schakeling die in het duister een lampje laat branden en het overdag uitschakelt.
Een klein nadeel van de schakeling is dat hij maar een klein lampje kan in- en uitschakelen. Dat bezwaar kan worden verholpen met een extra vermogenstransistor, zoals in afbeelding 93 is getekend. En daar hebben we dan de parkeerlichtschakelaar, die als onderdelenpakket A 6828 voor een luttel bedrag verkrijgbaar is.
In deze schakeling is het lampje vervangen door een weerstand. Als TR_2 geleidt (en dat is het geval als het donker is), ontstaat over deze weerstand een spanning die wordt gebruikt om de basis van de toegevoegde transistor TR_3 te sturen. Merk op dat dit, in tegenstelling tot de andere transistors, een PNP-type is dat „op zijn kop" staat. Als



Afb. 92. Praktische Schmitt-trigger met LDR.



Afb. 93. Schmitt-trigger met LDR en vermogenstransistor

TR_2 geleidt zal de basisspanning van TR_3 negatief zijn ten opzichte van de plusleiding, waarmee de emitter van TR_3 verbonden is. Ook TR_3 zal dan geleiden en het lampje zal branden.

Eerst nog wat begrippen

De schakeling die wij zojuist besproken hebben heeft de eigenschap dat zij bij een langzaam veranderende ingangsspanning plotseling omklapt. Net alsof je zeer langzaam de trekker („trigger") van een pistool overhaalt; hoe langzaam dat ook gebeurt, op een gegeven moment komt de kogel toch met een knal uit de loop. De naam Schmitt-trekker zou beter zijn, maar wordt om de een of andere reden niet vaak gebruikt.

We kunnen de Schmitt-trigger nog op een andere manier bekijken. Het is een schakeling met twee stabiele toestanden. Zolang de ingangsspanning boven een bepaalde drempelwaarde blijft geleidt TR_1 en is TR_2 gesperd. Zolang de ingangsspanning beneden een ongeveer gelijke drempelwaarde blijft, geleidt TR_2 en is TR_1 gesperd. Vanwege die twee stabiele toestanden behoort de Schmitt-trigger tot de *bistabiele* (bi = twee) schakelingen, evenals de schakeling die wordt aangeduid met de ludieke naam *flip-flop* (hierover straks meer).
Later zullen we zien dat er ook *monostabiele* (mono = één) en *astabiele* (a = niet) schakelingen bestaan. Monostabiele schakelingen kennen maar één stabiele toestand; door invloed van buitenaf kunnen ze maar tijdelijk in de andere toestand worden gebracht, maar ze keren zelf automatisch terug naar de ene stabiele toestand.
Astabiele schakelingen voelen zich in geen van de twee toestanden happy; ze blijven omschakelen van de ene toestand in de andere.

De flip-flop

De flip-flop is, zoals we hebben gezegd, een bistabiele schakeling, dus een schakeling die twee stabiele toestanden kent. In afbeelding 94 hebben we het principeschema getekend van zo'n schakeling die „flip" of „flop" kan zijn.
Wat gebeurt er als we de voedingsspanning inschakelen? Net als bij de Schmitt-trigger kan maar één transistor in geleiding zijn. Alleen hangt dat bij de flip-flop niet af van de spanning die we aan de basis van TR_1 toevoeren, maar (zolang we van de schakelaars afblijven) van toevallige omstandigheden, zoals kleine verschillen in weerstandswaarden of transistoreigenschappen.

Laten we aannemen dat TR_1 de strijd wint en in verzadiging komt. De collectorspanning is dan bijna nul. Ook de basisspanning van TR_2, die via de spanningsdeler met R_2 en R_6 is afgeleid van de collectorspanning van TR_1 is dus zo goed als nul. TR_2 is dan ook afgeknepen. Dit heeft weer tot gevolg dat de collectorspanning van TR_2 vrijwel gelijk is aan de voedingsspanning en daardoor is ook de basisspanning van TR_1 hoog; deze is immers via de spanningsdeler met R_4 en R_5 afhankelijk van de collectorspanning van TR_2.
Hetzelfde verhaal gaat natuurlijk op als TR_2 als overwinnaar uit de strijd komt.
Als TR_1 in verzadiging is en we sluiten schakelaar S_2 kortstondig, wat zou er dan gebeuren? Het antwoord is: helemaal niets! Want de spanning op de basis van de TR_2 was al bijna nul en deze transistor was afgeknepen. Het sluiten van schakelaar S_2 betekent dat de basisspanning van TR_2 exact nul wordt, maar afgeknepen is afgeknepen en er gebeurt dus niets.

Vervolgens sluiten we S_1. De basispanning van TR_1 wordt dan plotseling nul, met als gevolg dat deze transistor wordt afgeknepen. Dit leidt er weer toe dat de collectorspanning plotseling stijgt tot de waarde van de voedingsspanning en daardoor stijgt ook de basisspanning van TR_2. Transistor TR_2 komt nu in verzadiging; de collectorspanning daalt tot bijna nul en ook de basisspanning van TR_1 zou tot bijna nul dalen, als dat al niet het geval was door het sluiten van schakelaar S_1. Het openen van deze schakelaar heeft nu geen enkele invloed meer, want de basisspanning van TR_1 wordt toch laag gehouden doordat TR_2 verzadigd is.

Wat daarnet gold voor schakelaar S_2, geldt nu voor S_1: opnieuw sluiten van deze schakelaar brengt geen verandering in de situatie. We kunnen de flip-flop alleen laten omklappen door S_2 weer te sluiten.

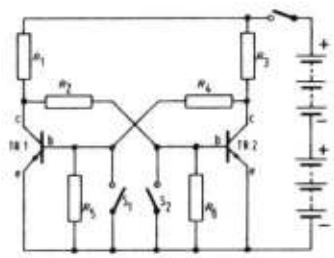
Als we de weerstanden R_1 en R_3 vervangen denken door gloeilampjes, kunnen we altijd zien welke schakelaar het laatst gesloten is geweest. Als het lampje in de collectorleiding van TR_2 brandt, is S_1 het laatst gesloten geweest. De schakeling herinnert zich

welke schakelaar het laatst gesloten was; we hebben dus een geheugenschakeling. De geheugens in computers en zakrekenmachines zijn dikwijls opgebouwd uit een groot aantal flip-flops.

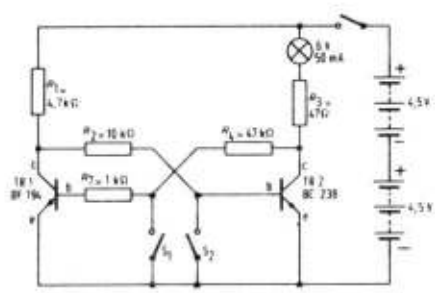
Een praktische flip-flop

De weerstanden R_5 en R_6 in het schema van afbeelding 94 hebben we voor de duidelijkheid getekend. Ze vormen met respectievelijk R_4 en R_2 spanningsdelers, die voorkomen dat de basisspanningen van TR_1 en TR_2 te hoog worden. Hetzelfde effect kunnen we echter bereiken door R_4 en R_2 groot genoeg te nemen. Ze beperken dan de basisstroom van de beide transistors, zodat deze niet de geest kunnen geven, en de weerstanden R_5 en R_6 kunnen dan gemist worden. Dat scheelt twee weerstanden en maakt de schakeling overzichtelijker. We naderen dan al aardig tot de praktische flip-flop-schakeling van afbeelding 95 (ontleend aan een van de EE-experimenteerbouwdozen).

De andere verschillen met de schakeling van afbeelding 94 zijn te verklaren uit het feit dat twee verschillende transistors zijn gebruikt en dat één van die transistors een lampje moet kunnen besturen. Dit neemt niet weg dat in de schakeling van afbeelding 95 duidelijk die van afbeelding 94 is te herkennen. En het voordeel van de schakeling van afbeelding 95 is dat zij echt functioneert. Zij herinnert zich dus welke schakelaar het laatst gesloten is geweest. De schakeling van afbeelding 95 is zoals we hebben gezien, een bistabiele schakeling die ook wel bistabiele multivibrator wordt genoemd. Hierna zullen we ook andere soorten multivibrators tegenkomen: de monostabiele en de astabiele multivibrator. Het woord multivibrator zal dan ook duidelijk worden.



Afb. 94. Principe van de flip-flop-schakeling



Afb. 95. Praktische uitvoering van flip-flop-schakeling

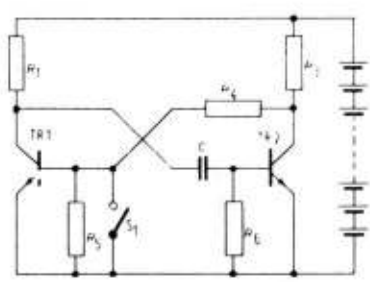
De monostabiele multivibrator

In afbeelding 96 hebben we het principe-schema getekend van een schakeling die op het eerste gezicht erg veel lijkt op de flip-flop van afbeelding 94 uit het vorige hoofdstuk. Het enige verschil is dat we één schakelaar hebben weggelaten en dat tussen de collector van TR_1 en de basis van TR_2 een condensator is opgenomen.

Wat gebeurt er nu als we de voedingsspanning aansluiten? Dat is moeilijk te zien, maar laten we aannemen dat, net als bij de flip-flop, één van de transistors gaat geleiden en laten we dan meteen maar aannemen dat dit TR_1 is. De collectorspanning van TR_1 is dan laag als gevolg van de spanningsval over de collectorweerstand.

De basisspanning van transistor TR_2 is eveneens laag, want deze basis is via een weerstand met de massa verbonden. Daardoor is TR_2 afgeknepen. De collectorspanning van deze transistor is dus hoog; zij is gelijk aan de voedingsspanning doordat er geen stroom door R_3 loopt. Dit heeft tot gevolg dat de basis van TR_1 via de spanningsdeler van R_4 en R_5 een positieve span-

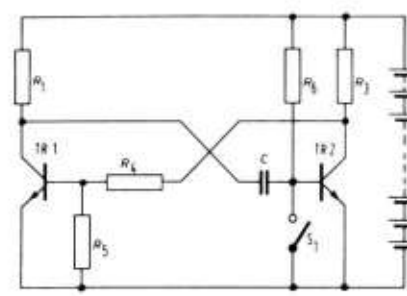
ning krijgt toegevoerd, die ervoor zorgt dat TR_1 blijft geleiden.
Nu sluiten we de schakelaar S_1 kortstondig. De basis van TR_1 wordt dan met massa verbonden en deze transistor geleidt niet langer. Daardoor zal de collectorspanning plotseling stijgen tot de voedingsspanning. De condensator kan die plotselinge spanningsstijging niet zo snel volgen.
Als de spanning op de linker-„plaat" snel stijgt, kan de spanning op de rechterplaat alleen maar meegaan. Dit heeft tot gevolg dat ook de basisspanning van TR_2 plotseling stijgt en dat deze transistor gaat geleiden. Er treedt een schijnbaar stabiele toestand in, waarbij TR_1 afgeknepen en TR_2 geleidt.
De werkelijkheid is echter anders. Op het moment dat de collectorspanning van TR_1 gelijk werd aan de voedingsspanning begon er een ladingsperiode van de condensator C. De stroomsterkte, waarmee dat geschiedt, wordt o.m bepaald door de som der waarden van de weerstanden R_1 en R_6. Naarmate de condensator C meer geladen wordt, neemt de stroom waarmee de lading wordt opgebouwd, af. Na een zekere tijd is deze laadstroom zover afgenomen dat de over R_6 ontwikkelde spanning niet meer voldoende is om TR_2 open te houden. Als vóór dat moment de schakelaar S1 weer is geopend zal de schakeling omklappen naar de begintoestand. De condensator wordt via de dán geleidende TR_1 weer ontladen. Wat is er nu gebeurd? Door het sluiten van de schakelaar is de schakeling „omgeklapt", maar na verloop van tijd klapt zij weer terug. Hoe lang dat duurt hangt af van de tijd die nodig is om de condensator te laden. En die tijd hangt op zijn beurt weer af van de capaciteit van de condensator en de weerstandswaarde van R_1 en R_6. Hoe groter de condensator is, des te langer duurt het laden; en ook: hoe groter de weerstandswaarde is, des te langer duurt het laden. De tijd dat TR_2 blijft geleiden is dus afhankelijk van de waarde van *R* en *C*. Men noemt dit de *RC-tijd*.



Afb. 96. Monostabiele multivibrator

Uit het voorfgaande blijkt wel dat de schakeling altijd na verloop van tijd terugkeert in de toestand waarbij TR_1 geleidt en TR_2 blokkeert. De schakeling heeft dus maar één stabiele toestand en heet daarom *monostabiele multivibrator* (mono = één).

Nog een monostabiele mulivibrator
Een monostabiele multivibrator kan ook nog op een andere manier worden gerealiseerd. Het principe van deze schakeling is getekend in afbeelding 97. Het verschil met de schakeling van afbeelding 96 is dat de „lekweerstand" R_6 van transistor TR_2 nu niet verbonden is met massa, maar met de voedingsspanning, en dat de schakelaar nu tussen de basis van TR_2 en massa is geschakeld.



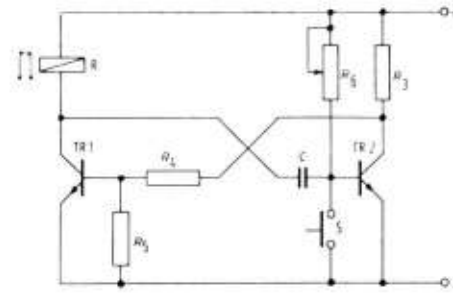
Afb. 97. Nog een schakeling van een monostabiele multivibrator

Bij het inschakelen van de voedingsspanning zal nu TR_2 gaan geleiden en

TR_1 worden afgeknepen. Ook hier is dat niet zo makkelijk te zien, maar we zullen ontdekken dat de schakeling altijd na verloop van tijd in deze toestand terugkeert. Laten we er dus maar van uitgaan dat TR_2 geleidt en TR_1 is afgeknepen.
Sluiten we nu de schakelaar, dan wordt de basis van TR_2 die aanvankelijk een positeve spanning via R_6 kreeg, kortgesloten tegen massa. TR_2 kan dan niet meer geleiden. De collectorspanning van TR_2 stijgt daardoor meteen tot de waarde van de voedingsspanning en ook de basis van TR_1 krijgt daar, via de spanningsdeler, zijn deel van. TR_1 gaat dus geleiden; de collectorspanning van TR_1 daalt plotseling en deze spanningsdaling wordt via de condensator, die het zo snel niet kan bijhouden, meegedeeld aan de basis van TR_2. TR_2 wordt dus dichtgedrukt, ook al is de schakelaar, die het allemaal op zijn geweten heeft, al weer geopend.
Nu gaat de condensator zich weer opladen via weerstand R_5. Dit heeft tot gevolg dat de basis van TR_2 geleidelijk weer positief wordt, zodat TR_2 op een gegeven moment weer in geleiding zal komen. Daardoor daalt de collectorspanning en deze daling wordt via de spanningsdeler meegedeeld aan de basis van transistor TR_1, die prompt weer gaat blokkeren. We hebben nu weer de oorspronkelijke toestand terug, waarbij TR_1 afgeknepen is en TR_2 geleidt. Ook deze schakeling kent dus maar één stabiele toestand.

Een eenvoudige tijdschakelaar

In afbeelding 98 hebben we de schakeling van afbeelding 97 nog eens getekend, met een paar kleine wijzigingen; R_1 is vervangen door een relais en R_6 is regelbaar gemaakt.
Na het inschakelen van de voedingsspanning zal TR_2 gaan geleiden en TR_1 afgeknepen blijven. Het relais is dus niet aangetrokken. Drukken we nu de schakelaar S. even in, dan klapt de monostabiele multivibrator om en wordt het relais aangetrokken. Onmiddellijk na het loslaten van de drukschakelaar zal de condensator zich weer opladen via R_6 en na verloop van tijd zal de toestand weer omklappen, zodat het relais afvalt.
Wat we hier hebben is een eenvoudige tijdschakelaar. We zouden het relais bij voorbeeld kunnen gebruiken om de lamp van een vergrotingsapparaat in te schakelen. De inschakelduur kunnen we regelen met behulp van de regelbare weerstand R_6.



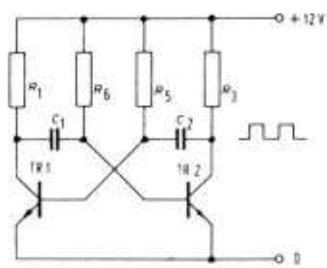
Afb. 98. Tijdschakelaar

Nu rijst natuurlijk de vraag hoe lang het relais aangetrokken blijft als we de schakelaar indrukken. Die tijd hangt af van de *RC*-tijd van *C* en R_6. Het is niet mogelijk om exact aan te geven na hoeveel tijd de schakeling weer terugklapt, want dat hangt van een aantal factoren af. We kunnen die tijd echter wel ongeveer benaderen door middel van de *RC*-tijd, dat wil zeggen door de waarden van condensator en weerstand met elkaar te vermenigvuldigen. Heeft de condensator bij voorbeeld een waarde van 10 μF (0,000 010 F) en de weerstand een waarde van 1 MΩ, dan bedraagt de *RC*-tijd 0,000010 x 1 000 000 = 10 seconden.
Voor dergelijke lange tijden moet de tijdschakelaar wel iets anders worden uitgevoerd dan in afbeelding 98 is getekend, want bij zulke grote waarden voor weerstand en condensator gaan allerlei bijverschijnselen, zoals de lekstroom van de (elektrolytische) condensator, roet in het eten gooien. Het gaat hier echter alleen om het principe en het is wel degelijk mogelijk de schakeling van afbeelding 98 zo te perfec-

tioneren dat een schakelklok voor lange tijden ontstaat, waarin het principe gemakkelijk is terug te vinden.

De astabiele multivibrator

Behalve een bi-stabiele multivibrator (b.v. de flip-flop die twee stabiele toestanden heeft) en de mono-stabiele multivibrator (die altijd na verloop terugkeert naar die ene stabiele toestand waarin hij zich prettig voelt) is er ook nog een a-stabiele multivibrator (a betekent „niet"). Een astabiele multivibrator voelt zich in geen van de twee toestanden thuis en blijft rusteloos zoeken welke toestand het beste is. In afbeelding 99 hebben we het principeschema getekend. In deze schakeling is zowel tussen de collector van TR_1 en de basis van TR_2, als tussen de collector van TR_2 en de basis van TR_1 een condensator opgenomen. Voorlopig nemen we even aan dat de schakeling symmetrisch is; de transistors, de condensatoren, de collectorweerstanden en de basisweerstanden zijn dus twee aan twee gelijk.

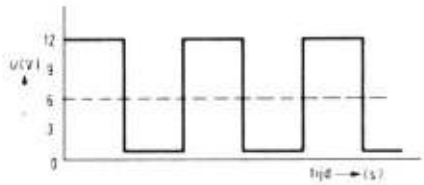


Afb. 99. Principeschakelaar a-stabiele multivibrator

Voor de verklaring van de werking gaan we er in dit geval van uit dat de voedingsspanning is ingeschakeld en dat de twee transistors beide geleidend zijn. Wanneer er nu, door welke oorzaak dan ook, een kleine toename van de stroom door TR_1 optreedt, dan daalt diens collectorspanning; daardoor wordt, omdat condensator C_1 zich niet zo snel kan aanpassen, de basis van TR_2 minder positief. Het gevolg is een kleinere collectorstroom door TR_2 en een hogere spanning op de collector. Die spanningsstijging op de collector van TR_2 wordt via C_2 medegedeeld aan de basis van TR_1 en betekent een ondersteuning van de kleine stroomtoename waar we van uit zijn gegaan. Dit zgn. „cumulatieve" effect zorgt ervoor dat TR_1 in zeer korte tijd geheel geleidend is. Dat houdt tevens in dat TR_2 geheel gesperd is, door de tot nul gedaalde spanning op de collector van TR_1. Wanneer de lading van condensator C_1 zich na enige tijd heeft aangepast komt het moment dat de basis van TR_2 (via R_6) weer enigszins positief wordt. Daardoor gaat TR_2 iets open, de collectorspanning daalt, de basisspanning van TR_1 daalt, de collectorspanning van TR_1 stijgt enz., met als uiterste de spertoestand van TR_1 en de maximale geleiding van TR_2. Dit proces kent geen stabiele toestand.

De astabiele multivibrator blijft dus tot in het oneindige omklappen. We hebben een *oscillator* of een *generator* gekregen; maar wel een bijzondere. Dat blijkt als we proberen te achterhalen hoe de spanning op de collectors eruit ziet. We gaan er van uit dat na het inschakelen van de voedingsspanning het eerst TR_1 gaat geleiden. TR_2 is dus afgeknepen en de collectorspanning is gelijk aan de voedingsspanning (+ 12 V). Na enige tijd klapt de schakeling om en gaat TR_2 geleiden. In zeer korte tijd daalt daardoor de collectorspanning van TR_2 tot bijna 0 V (er blijft een kleine restspanning over de transistor staan). Deze toestand blijft een tijdje gehandhaafd, totdat de schakeling weer omklapt en de collectorspanning van TR_2 zeer snel stijgt tot de voedingsspanning. De collectorspanning van TR_2 ziet er dus uit zoals we in afbeelding 100 hebben getekend (u kunt zelf nagaan dat de collectorspanning van TR_1 hiervan het spiegelbeeld is).

De generator wekt dus een zogenaamde *kanteel-* of *blokspanning* op.



Afb. 100. Kanteel- of blokspanning

Een muziektoongenerator

Er is maar weinig fantasie voor nodig om in het schema van afbeelding 101 het principe van de astabiele multivibrator te herkennen. Dit is het schema van de muziektoongenerator, die als onderdelenpakket NL 7110 verkrijgbaar is. We zullen de schakeling niet helemaal analyseren, maar volstaan met enkele opmerkingen.

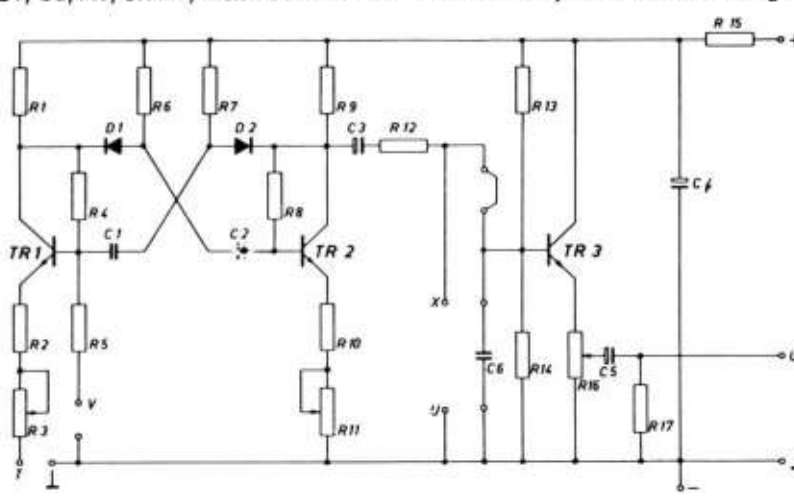
Het mulitvibratorgedeelte (links) is symmetrisch; daardoor zijn TR_1 en TR_2 beurtelings even lang ingeschakeld, zodat ook de kanteelspanning die via een elektrolytische condensator wordt afgenomen van de collector van TR_2, symmetrisch is.

De frequentie van de kanteelspanning hangt niet alleen af van de waarden van C_1, C_2, R_6, en R_7, maar ook van de totale weerstand in de emitterleiding van TR_1. Door tussen punt T en massa verschillende weerstanden te schakelen, kunnen verschillende frequenties, dus toonhoogten, worden opgewekt. Hoe dat gaat, kunt u in de handleiding van de NL 7110 lezen.

De astabiele multivibrator van de muziektoongenerator wekt, zoals we hebben gezien, geen sinusvormige spanning op, maar een kanteelvormige. Nu heeft de Franse wiskundige Fourier al omstreeks 1820 via buitengewoon ingewikkelde wiskundige formules aangetoond dat een kanteelvormig signaal in feite bestaat uit een groot aantal sinusvormige componenten.

De kanteelvormige spanning van de muziektoongenerator bevat naast een sinusvormige component met dezelfde frequentie als het kanteelvormige signaal een groot aantal componenten met frequenties die een veelvoud zijn van de „grondfrequentie". Naarmate de frequentie van deze „harmonischen" hoger is, neemt de amplitude ervan af.

Het gedeelte van de muziektoongenerator tussen C_3 en de basis van de eindtransistor TR_3 is een *filterschakeling* waarmee we, door het aanbrengen van weerstanden, condensatoren, dioden of spoelen, het signaal van de multivibrator kunnen filteren en daarmee een bepaalde klankkleur geven.



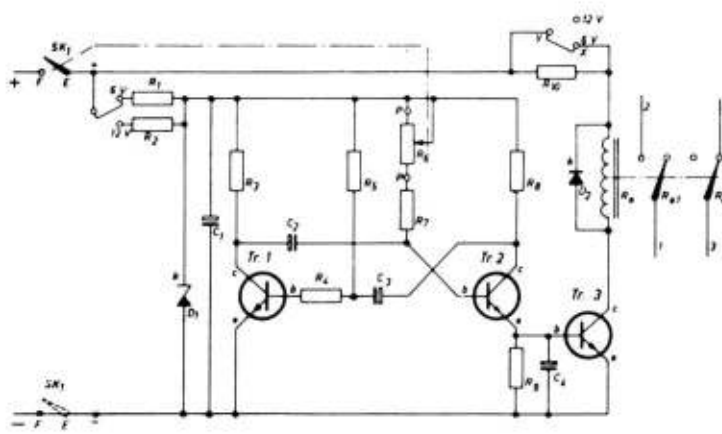
Afb. 101. Muziektoongenerator NL 7110

Ruitewisserautomaat
Er is nog een Philips onderdelenpakket waarin een astabiele multivibrator voorkomt: ruitewissersturing A 6702. Deze multivibrator lijkt zelfs meer op het principeschema van afbeelding 99 dan de muziektoongenerator (zie afbeelding 102). Wat in dit schema echter niet goed te zien is, is dat deze multivibrator asymmetrisch is. R_5 en C_3 hebben bij voorbeeld veel kleinere waarden (een kortere *RC*-tijd) dan $R_6 + R_7$ en C_2. Daardoor blijft TR_2 veel langer geblokkeerd dan TR_1.

Wat gebeurt er nu als we de ruitewisserregeling aansluiten op de accuspanning van de auto? Laten we wel even aannemen dat TR_1 het eerst in geleiding komt. De collectorspanning daalt dan en die daling wordt doorgegeven aan de basis van TR_2, die dus afgeknepen wordt. Enfin, het bekende verhaal dus. Als TR_2 blokkeert, staat er geen spanning over de emitterweerstand en krijgt de basis van TR_3 geen positieve spanning. TR_3 geleidt dus ook niet en het relais trekt niet aan.
Doordat $R_6 + R_7$ en C_2 een lange *RC*-tijd hebben, zal het tamelijk lang duren voordat de basis van TR_2 weer positief is geworden, zodat deze transistor gaat geleiden. De collectorspanning daalt, en TR_1 wordt afgeknepen. Over de emitterweerstand van TR_2 ontstaat nu een spanning (er gaat immers een stroom doorheen), transistor TR_3 wordt opengestuurd, het relais trekt aan en de ruitewissers beginnen te lopen.
Doordat de *RC*-tijd van C_3 en R_5 kort is, duurt deze toestand maar even. Circa een halve seconde later zijn de rollen weer omgedraaid; TR_2 is weer afgeknepen en het relais is afgevallen. Dat de ruitewissers weer terugkomen in de ruststand komt doordat het ruitewissermechanisme de taak van het relais overneemt en een contact gesloten houdt totdat de wissers terug zijn in de ruststand.

Met R_6 kan de *RC*-tijd van TR_2 worden geregeld. Met andere woorden: door aan de potentiometerknop te draaien kan de automobilist bepalen na hoeveel tijd het relais weer eventjes moet aantrekken voor een nieuwe zwiep van de ruitewissers.

Wat is een multivibrator?
We hebben tot dusver drie soorten multivibrators leren kennen (meer zijn er trouwens niet): de monostabiele, de bistabiele en de astabiele multivibrator. Het woord multivibrator betekent eigenlijk veel-triller of meervoudige tril-



Afb. 102. Ruitewissersturing A 6702

ler (multi = veel, vibrator triller); dat veelvoudig trillen gaat strikt genomen alleen maar op voor de astabiele multivibrator, want de andere twee typen kunnen oneindig lang in een stabiele toestand blijven verkeren; zolang er voedingsspanning is en er geen schakelaar gesloten wordt, blijven ze staan zoals ze staan. Maar goed; deze schakelingen noemt men nu eenmaal multivibrators. Er wordt nog wel eens een andere naam gebruikt, namelijk *relaxatieschakelingen,* maar daartoe behoren behalve de multivibrators ook nog enkele andere schakelingen, zoals de blokkeeroscillator.

Wat hebben we nu aan die multivibrators? De astabiele multivibrator kunnen we gebruiken voor het opwekken van kanteelvormige signalen, bij voorbeeld voor een elektronisch muziekinstrument. In computers wordt hij wel gebruikt als ,,klokgenerator'', een schakeling die voor de ,,timing'' zorgt, zodat alle bewerkingen keurig op tijd plaats vinden. En hij kan worden gebruikt als periodiek schakelende tijdschakelaar, bij voorbeeld voor een ruitewissersturing, een clignoteur, het periodiek in- en uit-schakelen van neonreclame of knipperlichten en zo voort.

De monostabiele multivibrator, die door invloed van buitenaf tijdelijk in de niet-stabiele toestand kan worden gebracht maar die altijd weer uit zichzelf terugkeert naar de stabiele toestand, wordt hoofdzakelijk toegepast als tijdschakelaar, bij voorbeeld voor de donkere kamer of om een slagboom enige tijd open te houden nadat een auto een inductielus in het wegdek gepasseerd is of, zoals in parkeergarages, als de bestuurder een munt in een automaat heeft gestopt. Dit zijn dus toepassingen waarbij ,,iets'' gedurende een vastgestelde tijd moet worden ingeschakeld nadat daarvoor een ,,opdracht'' is gegeven.
Tenslotte de bistabiele multivibrator. Die bestaat in twee basisversies: de Schmitt-trigger en de flip-flop. De Schmitt-trigger wordt gebruikt om te constateren of een ,,variabele'' groter of kleiner is dan een bepaalde waarde, de *drempelwaarde.* Dat klinkt ingewikkelder dan het is. Als voorbeeld kunnen we een vorstdetector nemen.

Op de Schmitt-trigger sluiten we een temperatuurgevoelige weerstand aan, die deel uitmaakt van een spanningsdeler. Zodra de temperatuur beneden nul graden Celsius komt (de drempelwaarde die we hebben gekozen), is de spanning op de ingang van de Schmitt-trigger zoveel toegenomen, dat hij omklapt en een lampje of een bel in werking stelt. Stijgt de temperatuur weer tot boven het vriespunt, dan neemt de ingangsspanning van de Schmitt-trigger af tot ongeveer de drempelwaarde en stopt het alarm.

Van de tweede bistabiele multivibrator, de flip-flop, hebben we gezien dat hij kan ,,onthouden'' welke van de twee schakelaars het laatst gesloten is geweest. Hij kan dus een geheugenfunctie vervullen en daarvoor wordt hij in computers dan ook vaak gebruikt.

Maar de flip-flop kan nóg iets leuks. Het is in principe mogelijk de twee schakelaars tegelijk te bedienen doordat alleen de geleidende transistor daarop reageert (de andere transistor is al afgeknepen). Stel dat we die twee schakelaars combineren. Elke keer dat we de dubbele schakelaar even sluiten, klapt de flip-flop om. Een lampje in de collectorleiding van TR_2 (of TR_1, dat maakt in principe geen verschil) zal dan elke keer dat we de gecombineerde schakelaar sluiten óf uit, óf aan gaan. Als we de schakelaar dus honderd keer per minuut sluiten, zal het lampje vijftig keer aan gaan en eveneens vijftig keer weer uit gaan. Vervangen we het lampje door een relais, dan zal dat relais precies half zo vaak gesloten worden als de schakelaar. Met dat relais (het kan natuurlijk ook elektronisch) kunnen we een volgende flip-

flop besturen, die het aantal keren schakelen opnieuw door twee deelt.
Hieruit blijkt dus dat een flip-flop de frequentie door twee kan delen, maar ook dat we met een reeks flip-flops een teller kunnen maken. Hoe dat in zijn werk gaat, bewaren we voor verderop.

Geïntegreerde schakelingen

Het bleek dat een transistor niet alleen gebruikt kan worden als versterker van signalen, maar ook als elektronische schakelaar. Dat opende geheel nieuwe wegen. Voorlopig laten we de a-, bi-, en monostabiele multivibrators even voor wat ze zijn: elementen die zo'n belangrijke rol spelen in de moderne computertechnieken. In dit hoofdstuk keren we terug tot de transistor als versterker, om vervolgens een uitstapje te maken naar de bouwelementen die de transistor steeds verder naar de achtergrond dringen: de geïntegreerde schakelingen. (IC's)

Een transistor is een ding met drie pootjes

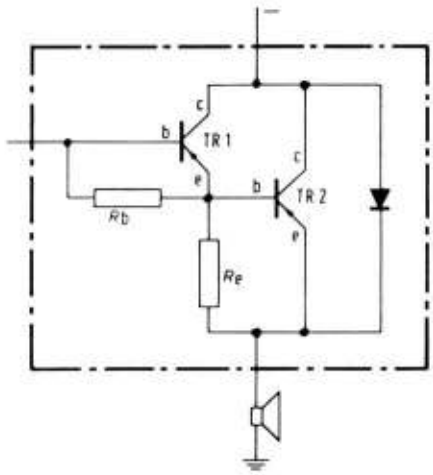
Als u wel eens een transistorhandboek hebt doorgebladerd, zal het u opgevallen zijn dat er zoveel verschillende transistors bestaan. Grote, kleine, PNP of NPN, met een grote of een kleine versterking, geschikt om kleine signalen veel te versterken of om een groot vermogen af te leveren. Ze hebben eigenlijk maar één ding gemeen: drie aansluitingen, die we emitter, basis en collector plegen te noemen (we hebben het nu uitsluitend over de gewone transistors, en niet over MOS- en veldeffecttransistors).

In een schakeling komt een transistor zelden alleen voor. Van een versterker wordt bij voorbeeld verlangd dat hij een zwak signaal voldoende versterkt, maar ook dat hij een zeker vermogen kan leveren aan een luidspreker of iets dergelijks. Deze twee functies kunnen doorgaans niet door één transistor worden vervuld. Een transistor die veel kan versterken, is in het algemeen niet in staat een behoorlijk vermogen te leveren. En een typische vermogenstransistor heeft meestal een geringe versterking. Daarom bestaat een vermogensversterker doorgaans uit twee nogal innig gekoppelde transistors, waarvan de eerste veel versterkt en de tweede veel vermogen kan leveren.

Zo'n combinatie van twee transistors kan eruit zien zoals in afbeelding 103 vereenvoudigd is getekend. Transistor TR_1 is een „kleine" transistor die als emittervolger is gebruikt. Hoewel een emittervolger geen spanningsversterking levert, geeft hij wel stroomversterking. De emitterstroom is dus vele malen groter dan de basisstroom waarmee TR_1 gestuurd wordt. Die emitterstroom wordt gebruikt om de tweede transistor te sturen. Ook deze „grote" transistor is als emittervolger gebruikt; de weerstand van de luidsprekerspreekspoel doet hierbij dienst als emitterweerstand (in werkelijkheid zal de luidspreker nooit direct in de emitterleiding worden opgenomen omdat dan ook de emittergelijkstroom door de spreekspoel gaat, waardoor ernstige vervorming ontstaat en de luidspreker een goede kans maakt het loodje te leggen; het gaat maar even om het idee).

Ook de tweede transistor geeft geen spanningsversterking, maar wel stroomversterking. De emitterstroom van TR_2 is dus weer een aantal keren groter dan zijn basisstroom. Het resultaat van dit alles is dat de emitterstroom van TR_2 meer dan duizendmaal zo groot kan zijn als de basisstroom van TR_1. Doordat de spanningsversterking van een emittervolger altijd kleiner dan 1 is, zullen deze twee gekoppelde emittervolgers geen spanningsversterking geven. Maar dat wordt ruimschoots goedgemaakt door de grote stroomversterking. Als we de spanningsversterking gemakshalve

even op 1 stellen en de stroomversterking van de combinatie bedraagt 1200, dan is de **vermogensversterking** 1 x 1200 = 1200. De schakeling kan dus 1200 x meer vermogen aan de luidspreker leveren dan nodig is om de basis te sturen.
De schakeling van afbeelding 103 noemt men een **Darlington**-schakeling.

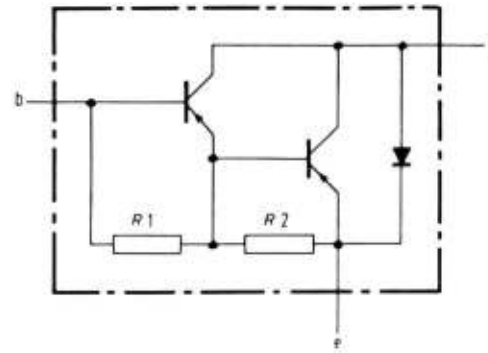


Afb. 103. Darlington-schakeling

Een Darlington heeft ook drie pootjes

Omdat zo'n combinatie van een kleine en een grote transistor in de praktijk vaak van pas komt, heeft men ernaar gestreefd deze schakelingen kant-en-klaar te fabriceren. Beide transistors worden volgens dezelfde methode gefabriceerd op schijfjes silicium (chips). Geraffineerde technieken maken het echter mogelijk niet alleen de transistors, maar ook de benodigde weerstanden op één en hetzelfde schijfje silicium aan te brengen. Alle onderdelen van afbeelding 103 zijn dan geïntegreerd.

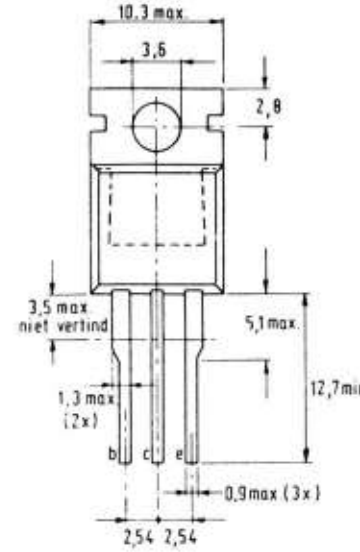
Afbeelding 104 toont het schema van zo'n **geïntegreerde schakeling,** om precies te zijn de Darlington BD 646. Het is duidelijk dat deze geïntegreerde



Afb. 104. Geïntegreerde schakeling

schakeling elektrisch identiek is aan de gewone schakeling van afbeelding 103. Er is echter iets merkwaardigs met de Darlington van afbeelding 104; hij heeft maar drie aansluitingen want er zijn maar drie punten waar we van buitenaf bij moeten kunnen. Dat zijn achtereenvolgens de basis van de eerste transistor (voor het stuursignaal), de doorverbonden collectors van beide transistors (voor de negatieve voedingsspanning) en de emitter van de tweede transistor (voor het aansluiten van de belasting). Een Darlington heeft dus ook maar drie pootjes, net als een transistor. Vandaar dat die drie aansluitingen aangeduid zijn met b, c en e, ofwel basis, collector en emitter. Sterker nog: een Darlington ziet er van buiten uit als een gewone vermogenstransistor, zoals uit de maatschets van de BD 646 blijkt, die in afbeelding 105 is weergegeven.
Hoewel zo'n Darlington een echte, zij het eenvoudige geïntegreerde schakeling is, gedraagt hij zich als een normale vermogenstransistor. Het enige verschil is dat de Darlington een veel grotere stroomversterking heeft dan een gewone vermogenstransistor. Voor de BD 646 bedraagt die maar liefst 1500 maal, vergeleken met 50 à

100 maal voor een gewone vermogenstransistor.
Wat heeft het nu voor zin de Darlingtonschakeling van afbeelding 103 te integreren? Dat blijkt duidelijk als we het aantal soldeerpunten van de schakeling van afbeelding 103 tellen. De transistors hebben ieder drie aansluitingen en de weerstanden en de diode ieder twee. In totaal moeten dus twaalf aansluitingen gesoldeerd worden. Bij de geïntegreerde Darlington zijn dat er maar drie. Deze is dus sneller en met minder kans op (soldeer)fouten te monteren. Bovendien neemt de geïntegreerde Darlington veel minder plaats in. Alle onderdelen zijn ondergebracht in eenzelfde omhulling als de eindtransistor van afbeelding 103 heeft. Daardoor kan de schakeling compacter worden gemonteerd.
Heel belangrijk is ook dat de kosten van een geïntegreerde Darlington aanzienlijk lager kunnen zijn dan die van een identieke schakeling die uit „losse" onderdelen is opgebouwd. Het aantal fabricagestappen en de gebruikte technieken bij het maken van een geïntegreerde Darlington wijken nauwelijks af van die voor een normale vermogenstransistor. Dit betekent dat de prijs van een geïntegreerde Darlington niet veel hoger hoeft te zijn dan die van een gewone vermogenstransistor. Voor de schakeling van afbeelding 103 zijn twee weerstanden, een diode en twee transistors nodig, die ieder afzonderlijk gefabriceerd, gecontroleerd en van een omhulling voorzien moeten worden.
Tenslotte is nog van belang dat alle onderdelen van de geïntegreerde Darlington thermisch met elkaar gekoppeld zijn doordat ze zich allemaal op hetzelfde silicium schijfje bevinden. Daardoor kan de thermische stabiliteit groter zijn, zodat de eigenschappen van de schakeling minder veranderen onder invloed van temperatuurvariaties.
De BD 646 gedraagt zich als een Darlington-schakeling met PNP-transistors en wordt daarom een PNP-Darlington genoemd. Net als bij gewone

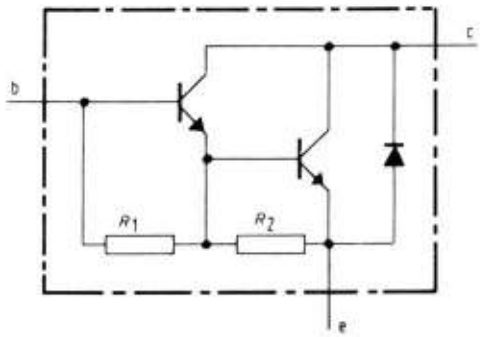


Afb. 105. Maatschets van de Darlington BD 646

transistors is het echter ook mogelijk NPN-Darlingtons te fabriceren. Een voorbeeld is de BD 645, waarvan in afbeelding 106 het inwendige schema is getekend. Deze Darlington heeft precies dezelfde eigenschappen als de BD 646; alleen lopen alle stromen de andere kant op.

Een stukje geschiedenis

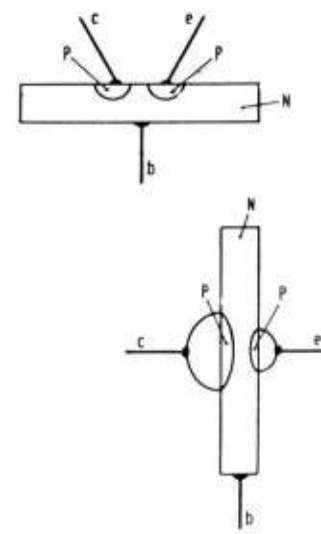
Hoewel een geïntegreerde Darlington is opgebouwd uit een aantal onderdelen die tegelijk zijn gefabriceerd op één schijfje silicium, wordt hij toch niet tot de echte geïntegreerde schakelingen gerekend, vooral niet omdat hij in de praktijk kan worden beschouwd als een normale vermogenstransistor met een grote stroomversterking. We hebben de Darlington ten tonele gevoerd om de meest in het oog lopende voordelen van integratie naar voren te brengen: de geringe omvang, de eenvoudige montage en de lage kosten. Bovendien is de geïntegreerde Darlington iets van de laatste jaren. We laten de Darlingtons verder met rust en



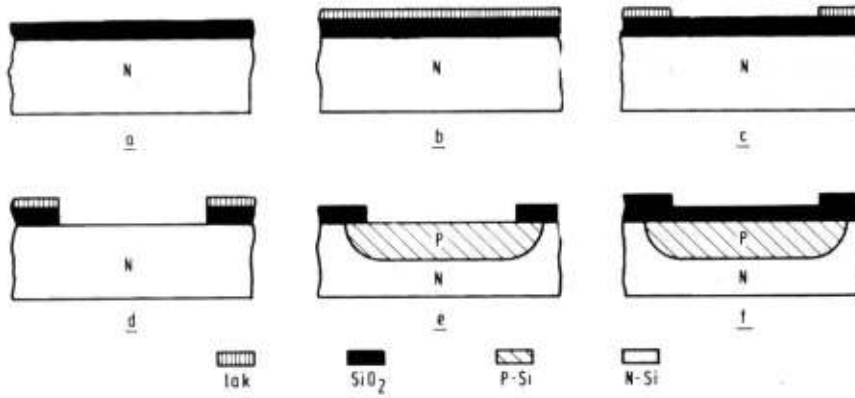
Afb. 106. Schema van de Darlington BD 645

gaan we een eindje terug in de geschiedenis, om vandaar in vogelvlucht de situatie van nu te benaderen.

Alle transistors zijn opgebouwd uit drie laagjes halfgeleidermateriaal, germanium of silicium. Die laagjes zijn afwisselend van P- en N-halfgeleidermateriaal. De manier waarop men tot die drie laagjes kan komen is sinds 1948, het jaar waarin Bardeen en Brattain de transistor ontdekten, nogal veranderd. De eerste transistors, die voor zeer hoge prijzen op de markt verschenen, waren zogenaamde **puntcontacttransistors.** De P-zones ontstonden hierbij rond twee dunne draadjes, die men dicht bij elkaar op een schijfje N-germanium vastsmolt (zie afbeelding 107). Een dergelijke transistor was dus van het PNP-type.
Wat later ontwikkelde men een legeringstechniek om **lagentransistors** te vervaardigen. Aan weerszijden van een dun laagje N-germanium smolt men een bolletje indium vast. Daardoor drong een aantal indiumatomen door in het N-materiaal, waardoor zones van P-materiaal werden gevormd (zie afbeelding 108). Ook hierbij was sprake van een PNP-transistor, die echter heel wat meer kon verdragen dan de kwetsbare puntcontacttransistor.
We zullen hier niet alle transistortechnieken in extenso bespreken, en alleen constateren dat de twee hier beschreven technieken en een aantal van de technieken die we verder niet zullen beschrijven, alleen geschikt zijn voor het maken van **discrete** transistors; individuele transistors dus, die ieder in een afzonderlijk huisje worden ondergebracht.
In het begin van de zestiger jaren was de transistortechniek echter zover gevorderd, dat men op een schijfje silicium met een doorsnee van enkele centimeters een groot aantal transistors tegelijk kon maken. Na de fabricage werden al die transistors losgesneden en afzonderlijk in een omhulling gemonteerd. Van het maken van een groot aantal identieke transistors op één schijfje naar het maken van een aantal verschillende transistors, die onderling werden verbonden, was maar een klein stapje.
De techniek die men hiervoor gebruikt vertoont veel overeenkomst met de methode die men gebruikt om clichés te maken. In de afbeeldingen 109 en 110 hebben we de principes van die methode schematisch weergegeven.



Afb. 107. Puntcontacttransistor (boven)
Afb. 108. Lagentransistor (onder)



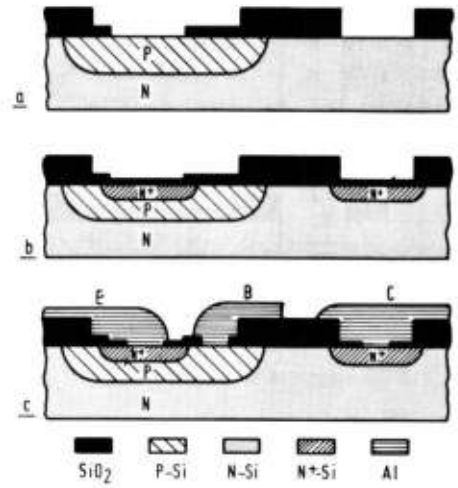
Afb. 109. Schematische voorstelling van de stadia bij de fabricage van geïntegreerde schakelingen. Op een schijfje N-geleidend silicium wordt door middel van stoom bij een temperatuur van meer dan 1100 °C een laagje siliciumoxide (SiO_2) gevormd (a). Siliciumoxide noemen we in het dagelijks leven glas, een materiaal dat, zoals bekend, goed isoleert. Op dit laagje SiO_2 wordt vervolgens een laag fotolak aangebracht (b). Het schijfje silicium met de laag fotolak wordt nu belicht via een masker; de niet-belichte gedeelten van de fotolak worden opgelost en de lak die op de belichte plaatsen overblijft wordt gehard (c). Vervolgens wordt op de plaatsen die niet beschermd zijn door de geharde, belichte fotolak het laagje SiO_2 weggeëtst, waardoor het N-silicium vrij komt (d). Nu kan ook de resterende fotolak worden verwijderd (e). Het schijfje silicium wordt nu in een oven gebracht met een temperatuur van bijna 1200 °C en een atmosfeer waarin zich borium bevindt. Op de plaatsen die niet beschermd worden door de laag SiO_2 dringen boriumatomen in het silicium binnen, waardoor dit wordt omgezet in P-silicium. Hoe langer het proces duurt, des te dieper zullen de boriumatomen in het siliciumkristal binnendringen. Men noemt dit diffusie. Men kan nu het hele proces van oxideren (f), fotolak aanbrengen, belichten via een (ander) masker, fotolak wegnemen, SiO_2-laag wegetsen en diffunderen een of meer keer herhalen. Op die manier kan bij voorbeeld in de P-zone weer een N-zone worden gevormd, waardoor een NPN-transistor ontstaat, zoals afbeelding 110 laat zien. Hier is volgens de beschreven methode in de P-zone een (N+-materiaal heeft een grotere concentratie dan N-materiaal; dat is nodig om als het ware het aanwezige P-materiaal te overheersen).

Geïntegreerde schakelingen

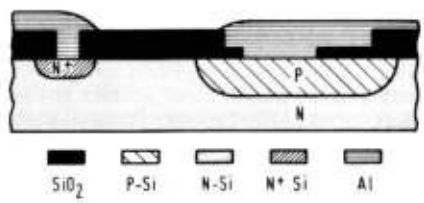
De verschillende zones worden tot slot van een aansluiting voorzien door het opdampen van aluminium geleiders (zie afbeelding 110c). Er is nu een NPN-transistor ontstaan, waarvan de collector wordt gevormd door het oorspronkelijke N-silicium. Om een goed contact met de aluminium geleider mogelijk te maken is hierin rechts een kleine N+-zone gediffundeerd.

Het opmerkelijke van deze techniek is dat men de plaats, de grootte en de diepte van de P-, N- en N+-zones goed in de hand heeft. De plaats en de grootte door middel van de fotografische maskers die worden gebruikt om de fotolak te belichten, en de diepte door het silicium schijfje langer of korter in de diffusieoven te laten verblijven.

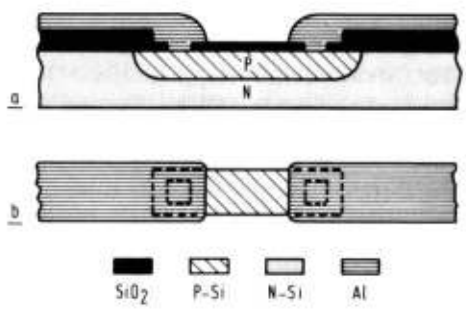
Maar er is nog een groot voordeel van deze methode, namelijk dat men door middel van etsen en diffunderen ook andere onderdelen kan maken dan alleen transistors, namelijk dioden (zie afbeelding 111), weerstanden (zie afbeelding 112) en zelfs kleine condensatoren. De weerstand wordt gevormd door een dunne laag P-materiaal en als condensator kan men een diode gebruiken, die in sperrichting is aangesloten. Al deze onderdelen kan men door middel van aluminium sporen met elkaar verbinden. Er is nog één probleem, namelijk dat al die onderdelen



Afb. 110. Vervaardiging van een N-P-N transistor

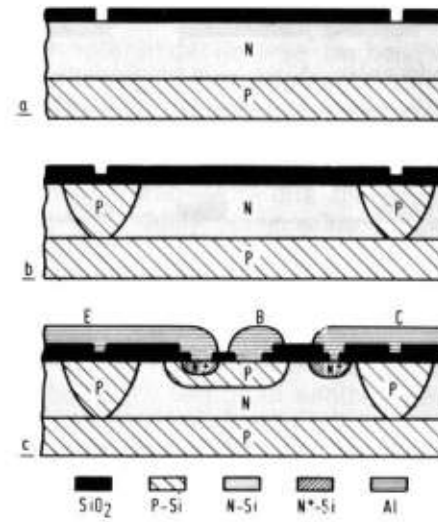


Afb. 111. Vervaardiging van een diode



Afb. 112. Doorsnede en bovenaanzicht van een weerstand van een laagje P-silicium

zijn aangebracht in dezelfde laag N-silicium en dus allemaal contact met elkaar maken. De oplossing die men



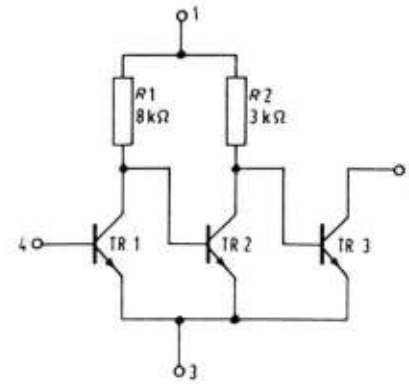
Afb. 113. Het isoleren van de elementen van een geintegreerde schakeling

hiervoor heeft gevonden is getekend in afbeelding 113. De N-laag, waarin later alle onderdelen worden gevormd, laat men groeien op een schijfje P-silicium (zogenaamde **epitaxie**). Rondom ieder gebiedje waar een onderdeel moet worden gevormd laat men nu eerst een diepe P-diffusie plaatsvinden (b). Alle later gevormde onderdelen zijn dus rondom én aan de onderkant geisoleerd door een zone P-materiaal. Weliswaar is P-silicium geen isolator, maar de P-gebieden en de „epitaxiale" N-eilandjes vormen samen een diode. Door middel van een spanning in sperrichting zorgt men ervoor dat die diodes niet geleiden, dus isoleren.

Klein beginnen

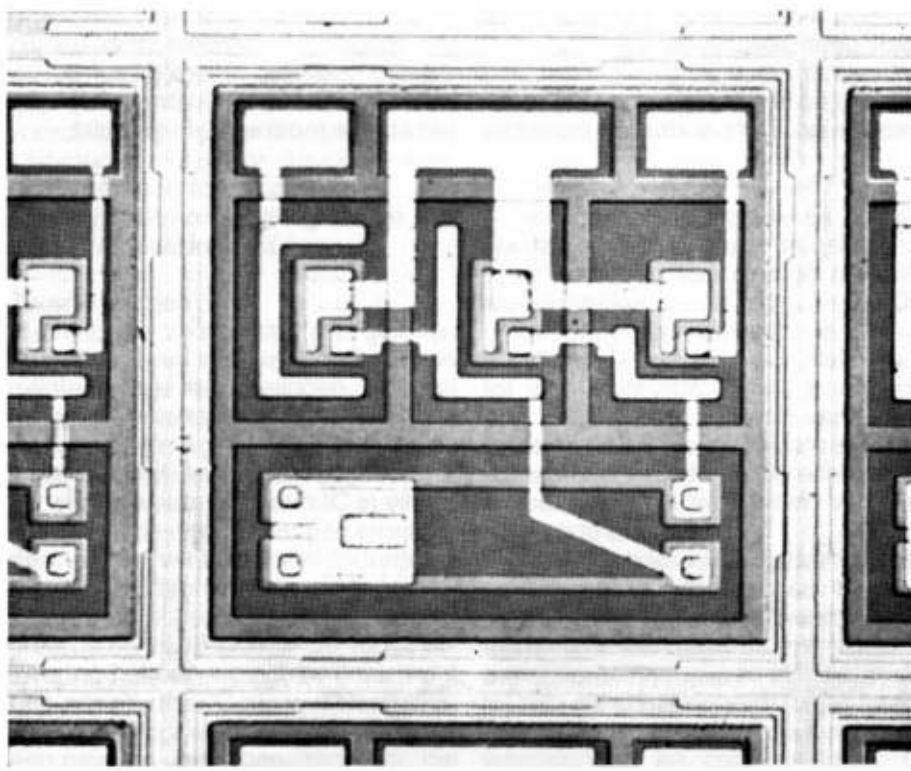
De techniek die wij hiervoor hebben beschreven, de zogenaamde planair-epitaxiale techniek, is ontwikkeld uit de technieken die men toepaste bij de fabricage van discrete transistors. Het

spreekt vanzelf dat men niet meteen begonnen is met het integreren van complexe schakelingen met tientallen transistors. Daarvoor moest men eerst alle stadia van het proces tot in de details beheersen. En dat is een kwestie van jaren.
Aanvankelijk werden alleen schakelingen geïntegreerd waarbij de voordelen van geringe afmetingen en laag energieverbruik opwogen tegen de toen nog hoge kosten. Eén van de eerste geïntegreerde schakelingen die Philips in de handel bracht was de OM 200, een in onze ogen simpele versterker met drie transistors en twee weerstanden, die werd toegepast in hoortoestellen. Die konden daardoor een stuk kleiner zijn dan voorheen het geval was. Afbeelding 114 toont het schema van deze versterker en afbeelding 115 is een bovenaanzicht van de geïntegreerde schakeling. De drie transistors zijn duidelijk te zien, ieder in hun eigen



Afb. 114. Schema versterker met OM 200

Afb. 115. Bovenaanzicht geïntegreerde schakeling OM 200



,,eilandje'' (omgeven door isolerende zones). De lichte gedeelten zijn de aluminium verbindingssporen. De drie emitters zijn verbonden met het grote aansluitvlak midden-boven. In het onderste eiland zijn de twee weerstanden aangebracht, die links met elkaar en met een aansluitvlakje zijn verbonden. De geïntegreerde schakelingen worden met een groot aantal tegelijk op een schijfje silicium gemaakt. Later worden ze losgesneden en in een omhulling ondergebracht, waarbij verbindingsdraadjes worden aangebracht tussen de aansluitvlakjes en de pennen of draden die aan de omhulling bevestigd zijn.

Doordat men de integratietechniek steeds beter leerde beheersen kon men steeds meer onderdelen van een schakeling integreren, zonder dat de ,,uitval'' bij de produktie te groot werd. Op het ogenblik kan men schakelingen met tienduizenden transistors integreren op een silicium oppervlak van een vierkante centimeter of minder, zoals de bekende microprocessors. Het hoeft geen betoog dat een dergelijke complexe schakeling eigenlijk niet meer kan worden opgebouwd uit losse onderdelen. Zelfs al zou een transistor maar een dubbeltje kosten, dan zou men alleen al voor zo'n tweeduizend gulden transistors moeten aanschaffen. Die zouden allemaal gemonteerd moeten worden, wat natuurlijk ook geld kost. Daarbij komen dan nog alle andere onderdelen, zoals de weerstanden. Een dergelijke, uit discrete onderdelen opgebouwde processor zou dan ook vele tienduizenden guldens kosten en bovendien een flinke ruimte in beslag nemen. Een microprocessor daarentegen meet maar een paar centimeter en kost slechts enkele tientjes. Langzamerhand is er dus een situatie ontstaan waarbij het er niet alleen meer om gaat dat een geïntegreerde schakeling kleiner en goedkoper is dan een zelfde schakeling die uit losse onderdelen is samengesteld. Nee, de integratietechnieken hebben het mogelijk gemaakt schakelingen te produceren die op conventionele manier eenvoudigweg niet verwezenlijkt zouden kunnen worden. De integratietechniek heeft dus geheel nieuwe wegen geopend.

We zullen nu terugkeren tot de minder ingewikkelde geïntegreerde schakelingen, die ook door elektronica-hobbyisten steeds meer worden gebruikt.

Operationele versterkers

We hebben kennis gemaakt met de geïntegreerde schakeling. Zo'n „Integrated Circuit", in de wandeling IC geheten, is een meer of minder complexe elektronische schakeling waarvan alle onderdelen, zoals transistors, dioden en weerstanden, in één procesgang op een enkel schijfje silicium worden aangebracht. Niet al te ingewikkelde geïntegreerde schakelingen, zoals die uit het begintijdperk van de integratietechniek, hebben als voordelen onder meer kleinere afmetingen, eenvoudiger montage en lagere kosten dan identieke schakelingen die uit „discrete" onderdelen zijn opgebouwd. Doordat de fabricagetechniek voortdurend verbeterd is, kan men nu geïntegreerde schakelingen maken die uit tienduizenden onderdelen bestaan. Voor deze complexe schakelingen gelden niet alleen maar de drie voordelen die wij noemden; ze zouden eenvoudig niet meer gebouwd kunnen worden uit losse onderdelen.
Allereerst keren we terug tot de wat minder ingewikkelde IC's.

Zwarte kastjes

Technici die zo'n vijftien jaar geleden geconfronteerd werden met de eerste geïntegreerde schakelingen, hadden de neiging die te beschouwen als gewone schakelingen, dus alsof ze uit losse onderdelen waren opgebouwd. Ze wilden weten hoe zo'n IC in elkaar zat en wat de eigenschappen en waarden van de verschillende onderdelen waren. De fabrikanten publiceerden daarom de schema's van hun geïntegreerde schakelingen. In de vorige aflevering hebben we echter gezien dat een eenvoudige IC als een Darlington heel goed kan worden beschouwd als een gewone vermogenstransistor, die toevallig wat meer versterkt, maar zich verder heel normaal gedraagt. We hoeven niet precies te weten wat erin zit om zo'n IC te kunnen gebruiken.
Naarmate de geïntegreerde schakelingen ingewikkelder werden, was het steeds minder gemakkelijk om de werking te doorgronden door bestudering van het schema. Op het laatst was dat zelfs volslagen onmogelijk. Daarom is men geïntegreerde schakelingen steeds meer gaan geschouwen als „black boxes", zwarte doosjes met een aantal aansluitingen, die een bepaalde functie kunnen vervullen. Wat er in werkelijkheid in zo'n IC zat liet men over aan de technici die hem ontwikkeld hadden.
Toch zullen we van enkele geïntegreerde schakelingen die we hierna beschrijven het schema publiceren. Als u daar aardigheid in heeft, kunt u proberen dat schema te doorgronden.

Twee soorten IC's

In voorgaande hoofdstukken hebben we laten zien dat een transistor op twee manieren kan worden gebruikt: als versterker en als schakelaar. Dat geldt voor iedere willekeurige transistor. Omdat er aan een schakeltransistor toch enigszins andere eisen worden gesteld dan aan een versterkertransistor, heeft men speciale schakeltransistors ontwikkeld, die echter principieel niet veel verschillen van versterkende broertjes.
Hetzelfde onderscheid vinden we bij geïntegreerde schakelingen. Maar er is toch een belangrijk verschil met transistors. Een gewone „versterker"-transistor kunnen we zo schakelen dat hij zich als schakeltransistor gedraagt. Populair gezegd: door de keuze van weerstanden en condensatoren. Bij

een geïntegreerde schakeling wordt echter de entourage van elke transistor mee-geïntegreerd. Die ligt dus vast in de geïntegreerde schakeling. Een IC is dan ook veel minder universeel dan een transistor; hij is in het algemeen maar voor een beperkt aantal functies te gebruiken. Een IC die ontworpen is voor versterkingsdoeleinden zullen we daardoor in het algemeen niet kunnen gebruiken om te schakelen. Omgekeerd ook niet. Dit betekent dat er twee groepen geïntegreerde schakelingen zijn:

1 IC's die in het algemeen worden gebruikt voor versterking en signaalverwerking. Deze noemt men analoge geïntegreerde schakelingen (vroeger ook wel lineaire IC's geheten).
2 IC's die worden gebruikt voor schakelfuncties. Dit zijn de digitale geïntegreerde schakelingen.

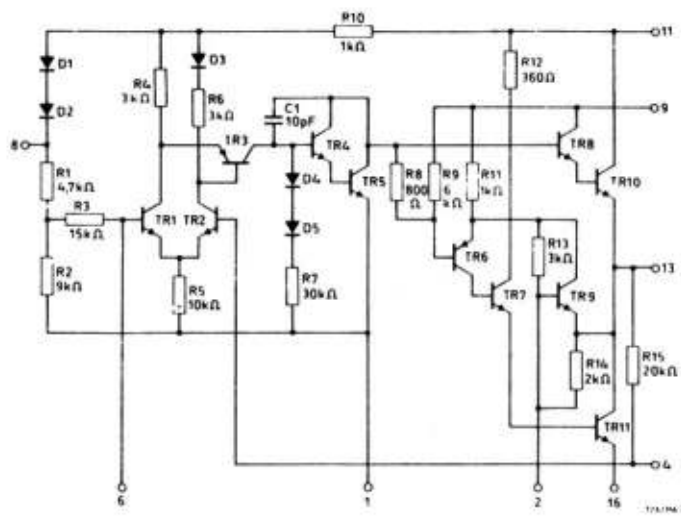
Beide soorten zijn er in talloze uitvoeringen, van zeer eenvoudig tot uiterst complex.

Het verschil tussen analoog en digitaal hebben we al eerder besproken, maar misschien is het goed dit verschil nog even te onderstrepen. Bij digitaal is er sprake van exact gedefinieerde „standen". Een schakelaar is dus digitaal, want hij kent maar twee standen: aan en uit. Daar zit niets tussenin. Een digitale klok is digitaal omdat hij telkens een hele minuut verspringt; van 09.55 uur naar 09.56 uur.

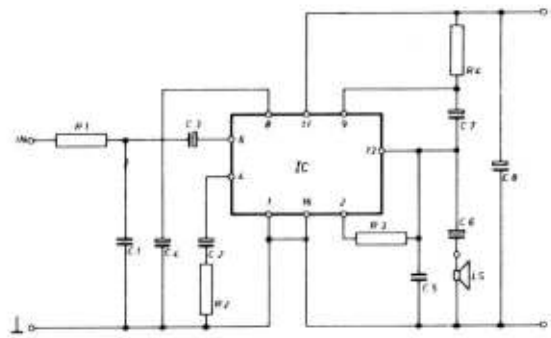
Bij analoog zijn er oneindig veel tussenstanden. Een klok met wijzers is analoog omdat de wijzers zich continu bewegen. Ze kunnen dus iedere tijd aangeven, tot op fracties van seconden nauwkeurig. Dat we een gewone klok niet zo nauwkeurig kunnen aflezen doet niet ter zake. Een goed voorbeeld van een analoog en een digitaal instrument vinden we in een auto, namelijk de analoge snelheidsmeter en de digitale kilometerteller.

Geïntegreerde geluidsversterker

Een goed voorbeeld van een analoge geïntegreerde schakeling is de TCA 160 B, een geluidsversterker die een vermogen van ongeveer 2 watt kan leveren aan een 8 Ω-luidspreker. De TCA 160 B werd onder meer toegepast in onderdelenpakket NL 3402. In afbeelding 116 hebben we het inwendige schema weergegeven. Afbeelding 117



Afb. 116. Schema TCA 160

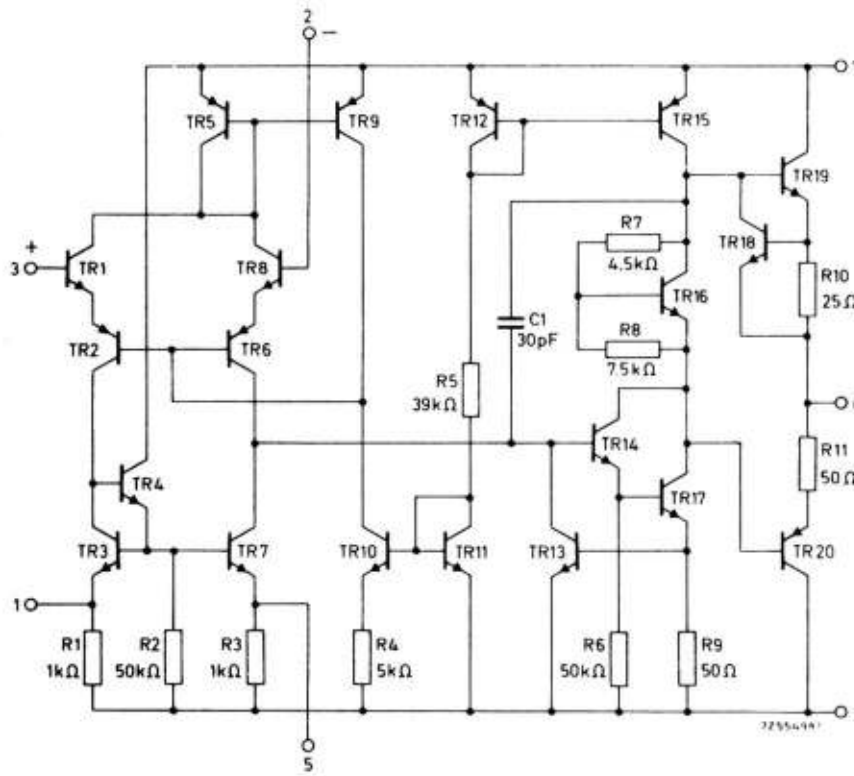


Afb. 117. Schema NL 3402

toont de geïntegreerde schakeling als zwart kastje, opgenomen in een schakeling die is opgebouwd uit discrete componenten.
Als u het schema van afbeelding 116 vergelijkt met dat van een versterker die geheel uit losse onderdelen is gebouwd, zal het u opvallen dat er nogal kwistig met transistors is omgesprongen. Verder bevat de schakeling nogal wat weerstanden. Opmerkelijk is dat de geïntegreerde schakeling maar één condensator bevat, en dat is dan nog een zeer kleine van slechts 10 pF. De uitwendige schakeling daarentegen (zie afbeelding 117) bestaat bijna uitsluitend uit condensatoren. De reden hiervoor is dat het erg lastig is geïntegreerde condensatoren te maken. Een condensator bestaat namelijk uit twee geleiders, gescheiden door een isolator. Van een condensator met een capaciteit groter dan enkele honderden pF moet de oppervlakte van de geleiders (de „platen") al gauw enkele vierkante centimeters zijn; meer dus dan de hele oppervlakte van de geïntegreerde schakeling. Grote condensatoren stuiten dus op praktische bezwaren. Voor het maken van kleine condensatoren, zoals de 10 pF van de TCA 160 B, neemt men zijn toevlucht tot een trucje. Men integreert dan op de plaats van de condensator een diode in sperrichting. De capaciteit tussen de P- en de N-laag fungeert dan als condensator. Als in een schakeling grote capaciteiten nodig zijn, zal men die in het algemeen uitwendig moeten aansluiten. Tot op zekere hoogte kunnen condensatoren echter worden omzeild door de schakeling anders op te zetten. Soms is het mogelijk een schakeling met bij voorbeeld vier transistors zo te maken dat hij hetzelfde doet als een schakeling met één transistor en condensator. Het aantal transistors dat wordt geïntegreerd speelt echter nauwelijks een rol; ze worden toch allemaal tegelijk op hetzelfde schijfje silicium gefabriceerd.
Dit verklaart waarom de ontwerpers van geïntegreerde schakelingen niet op een transistor of diode meer of minder kijken, maar het aantal condensatoren tot het absolute minimum trachten te beperken.
Dit verklaart ook waarom het schema van een geïntegreerde schakeling er heel anders uitziet dan het schema van een schakeling die uit discrete onderdelen moet worden opgebouwd, hoewel ze precies dezelfde functie kunnen hebben.
Het zal duidelijk zijn dat het volledig verklaren van het schema van de TCA 160 B geen eenvoudige zaak is. Toch kunnen we in dat schema wel het een en ander herkennen. TR_{10} en TR_{11} zijn de eindtransistors; ze zijn van hetzelfde type. De luidspreker wordt via een condensator aangesloten op punt 13 en massa. De aansluitpunten 1 en 16 worden eveneens verbonden met massa, zoals afbeelding 117 toont.
Een deel van het uitgangssignaal van

punt 13 wordt via een weerstand teruggevoerd naar de basis van TR_2. Deze is geschakeld als emittervolger. Het teruggekoppelde signaal komt dus versterkt over de gemeenschappelijke emitterweerstand van TR_1 en TR_2 te staan. TR_1 is een vrij normaal geschakelde voorversterker. Met deze tegenkoppeling wordt een vermindering van de vervorming bereikt.
De werking van de voorversterker kunnen we doorgronden door even af te zien van het teruggekoppelde signaal. Zonder dat signaal is de basisspanning van TR_2 constant. Ook de collectorspanning van TR_2 en daarmee de basisspanning van TR_3 zijn dus constant.
Het ingangssignaal (punt 6) wordt door TR_1 versterkt en komt terecht op de emitter van TR_3 die, zoals we veronderstellen, een constante basisspanning heeft. Voor TR_3 geldt dat een variërende emitterspanning en een constante basisspanning hetzelfde effect hebben als een constante emitterspanning en een variërende basisspanning. In beide gevallen varieert namelijk de emitter-basisspanning en zal de transistor die versterken. Het versterkte signaal op de collector van TR_3 komt terecht op de basis van TR_4. TR_4 en TR_5 vormen een soort Darlington, die het signaal nog meer versterkt. Vanaf de collector van TR_5 gaat het signaal naar de basis van TR_8, die samen met de eindtransistor TR_{10} eveneens een Darlington vormt.
Aan de basis van de tweede eindtransistor, TR_{11}, moet een even groot signaal worden toegevoerd als aan de basis van TR_{10}, maar dan in tegenfaze. Voor het „omkeren van de faze" zorgt TR_6 (de collectorspanning is immers in tegenfaze met de basisspanning). Het omgekeerde signaal gaat naar TR_7, die als emittervolger geschakeld is en

Afb. 118. Schema TBA 221D



het signaal zonder fazedraaiing doorgeeft aan de basis van de tweede eindtransistor TR_{11}.

Operationele versterker

De operationele versterker wordt in amateurkringen niet zoveel gebruikt. Dat we er toch een paar woorden aan wijden is omdat hij goed illustreert wat met geïntegreerde schakelingen zoal mogelijk is.

In het voorgaande hebben we opgemerkt dat het aantal transistors in een IC zonder bezwaar groot kan zijn. De transistors worden toch allemaal tegelijk in dezelfde procesgang gemaakt en ze nemen maar weinig plaats in. Hierdoor is het mogelijk geïntegreerde schakelingen te maken met een enorme versterking. De TBA 221 D bij voorbeeld, waarvan in afbeelding 118 het schema is getekend,kan een ingangssignaal meer dan 200000 keer versterken. Sluiten we op de ingang een MD-opneemelement aan, dat een signaalspanning van 5 mV geeft, dan levert de operationele versterker dus een uitgangssignaal van 1000 V. Het hoeft geen betoog dat dit niet kan. Bij een voedingsspanning van 12 V kan de uitgangsspanning natuurlijk nooit groter zijn dan 12 V piek-piekspanning; dat komt overeen met een wisselspanning met een effectieve waarde van ca 4,2 V. Wat zouden we trouwens moeten beginnen met een signaalspanning van 1000 V?

Hieruit blijkt wel dat een operationele versterker niet zomaar te gebruiken is. Hij moet altijd ,,getemd'' worden door middel van een sterke tegenkoppeling. In een van de vorige afleveringen hebben we gezien dat tegenkoppeling de versterking vermindert, maar ook de vervorming. Die zeer sterke tegenkoppeling maakt dat de eigenschappen van de versterker vrijwel uitsluitend afhangen van het tegenkoppelnetwerk. Een operationele versterker die zoveel versterkt is van nature nogal onstabiel. Een verandering van de temperatuur bij voorbeeld heeft grote invloed. De sterke tegenkoppeling maakt de versterker echter veel stabieler.

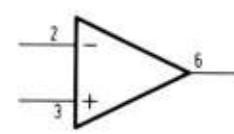
Hetzelfde geldt voor de twee belangrijkste soorten vervorming: de lineaire en de niet-lineaire vervorming. Niet-lineaire vervorming ontstaat doordat de uitgangsspanning in het algemeen niet recht evenredig is met de ingangsspanning. Daardoor zal de vorm van het uitgangssignaal niet precies gelijk zijn aan die van het ingangssignaal. De tegenkoppeling vermindert deze soort vervorming aanzienlijk.

Lineaire vervorming is een gevolg van het feit dat de versterking voor signalen van verschillende frequenties niet gelijk is. De frequentiekarakteristiek is dus niet volkomen recht. De tegenkoppeling kan deze karakteristiek rechter maken, vooropgesteld dat het tegenkoppelnetwerk zelf niet frequentie-afhankelijk is, dat wil zeggen alleen uit ohmse weerstanden is opgebouwd.

Er is nog iets merkwaardigs met de operationele versterker. Hij is namelijk uitgevoerd met twee ingangen (de punten 2 en 3). Men noemt dit een differentiaal-ingang.

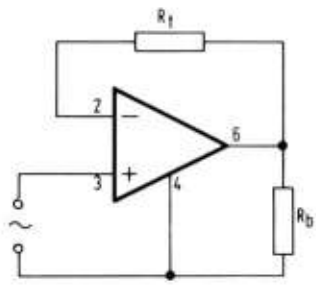
Enkele toepassingen van operationele versterkers

In afbeelding 119 is het schemasymbool van een operationele versterker getekend; als zwart doosje dus. Alleen de uitgang en de twee ingangen zijn aangegeven. Het plusteken bij ingang 3 betekent dat een signaal, dat tussen deze ingang en massa wordt aangesloten *in faze* op de uitgang verschijnt (versterkt uiteraard). Een signaal dat tussen ingang 2 en massa wordt aangesloten, verschijnt ,,omgekeerd'' op de uitgang; in tegenfaze dus. Men zegt in zo'n geval dat het uitgangssignaal *geïnverteerd* is.



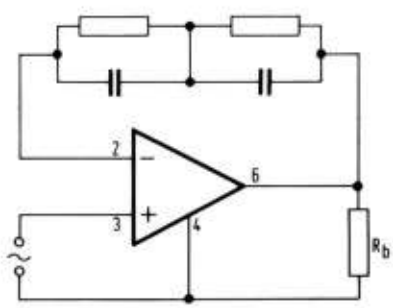
Afb. 119. Operationele versterker

In afbeelding 120 is de operationele versterker (in het Engels: operational amplifier, dikwijls afgekort tot op-amp) toegepast als gewone signaalversterker. Het te versterken signaal wordt aangelegd tussen massa en ingang 3. Het uitgangssignaal op punt 6 is in faze met het ingangsignaal. Via de (betrekkelijk kleine) tegenkoppelweerstand Rt wordt het uitgangssignaal teruggekoppeld naar de tweede ingang. Doordat deze ingang „inverteert", zullen in de operationele versterker twee signalen versterkt worden: het oorspronkelijke signaal en het teruggekoppelde signaal, dat in tegenfaze is en dus het oorspronkelijke tegenwerkt. Hierdoor zal het uitgangssignaal kleiner zijn dan zonder tegenkoppeling; de versterking is dus verminderd.



Afb. 120. Op-amp als signaalversterker

In afbeelding 120 hebben we met een slangetje aangegeven dat het ingangssignaal een wisselspanning is („gedragen" door een gelijkspanning). Dat hoeft echter niet per se het geval te zijn. Als u nog even naar het schema van afbeelding 118 kijkt, zult u zien dat alle transistors rechtstreeks gekoppeld zijn, zonder condensatoren (de operationele versterker bevat alleen een kleine terugkoppelcondensator). Dit betekent dat het om een gelijkspanningsversterker gaat. Ook een zeer langzame verandering van de ingangsspanning zal dus worden versterkt. Zelfs een constante gelijkspanning zal leiden tot een constante uitgangsspanning. Het is mogelijk de tegenkoppeling frequentie-afhankelijk te maken door in het tegenkoppelnetwerk condensatoren op te nemen, zoals in afbeelding 121 is aangegeven. In deze schakeling is de tegenkoppeling voor hoge frequenties groter dan voor lage frequenties. De schakeling van afbeelding 121 zou als voorversterker voor HiFi-toonopnemers kunnen worden gebruikt. De gewenste RIAA-correctie wordt verkregen door voor het tegenkoppelnetwerk condensatoren en weerstanden van de juiste waarden te gebruiken.



Afb. 121. Op-amp met frequentie-afhankelijke tegenkoppeling

Een operationele versterker kan verder worden gebruikt als oscillator. Voor oscilleren is nodig dat het uitgangssignaal van een versterker in faze wordt teruggevoerd naar de ingang en aldus het oorspronkelijke signaal ondersteunt. Verder moet de „rondgaande versterking" groter zijn dan 1, maar dat is bij een operationele versterker geen punt. Voor het opwekken van sinusvormige signalen moet aan nóg een tweetal voorwaarden zijn voldaan; er moet een frequentiebepalend netwerk zijn dat ervoor zorgt dat maar voor één bepaalde frequentie aan de genereervoorwaarden wordt voldaan; én de versterking moet begrensd worden tot 1 omdat het oscilleren anders uit de hand loopt en er geen sinusvormig,

maar een blokvormig signaal zal ontstaan. Het zou te ver voeren hier uitvoerig te vertellen hoe aan al deze voorwaarden kan worden voldaan. Wij hebben alleen maar willen aantonen dat een operationele versterker een element met een groot aantal toepassingsmogelijkheden is, dat uitstekend de mogelijkheden van analoge geïntegreerde schakelingen illustreert.

Philips Nederland B.V. - Eindhoven

42521/606663