

K O S M O S

Experimenteerhandboek

K O S M O S
electronic XN 3000

Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart

Eerste druk
Franckh-KosmosVerlags-GmbH & Co., Stuttgart/1993
Alle rechten voorbehouden, met name het recht van
vermenigvuldiging en vertaling.
Niets uit deze opgave mag worden vermenigvuldigd,
opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of
openbaar worden gemaakt, in enige vorm of op enigerlei
wijze hetzij elektronisch, hetzij mechanisch, door
fotokopieën, opnamen dan wel op enige andere manier
zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de
uitgever.
Opneming van gegevens in dit boek prejudiceert niet ten
aanzien van het al of niet bestaan van merk-, octrooi- of
gebruiksrechten met betrekking tot deze gegevens.
©1993 Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart
Technisch ontwerp: Kosmos Entwicklungslabor
Met medewerking van Günther Ramm, Braunschweig
Tekeningen: Friedrich Werth, Horb
Foto's: Atelier Weishaupt, Stuttgart
Printed in Germany/Imprimé en Allemagne

Algemene instructies en tips voor ouders en gebruikers:

Let op! Aan sommige onderdelen in deze doos zitten puntige of scherpe hoeken en randen. Deze kunnen **verwondingen** veroorzaken!

Om te experimenteren hebt u één, voor sommige proeven twee batterijen van 9 volt nodig van het **type 6 F 22**. Omdat deze batterijen slechts beperkte tijd houdbaar zijn, zijn ze niet aan de inhoud van het onderdelenpakket toegevoegd.

Gebruik uitsluitend batterijen van hetzelfde type en met dezelfde ladingsconditie.

Schakel batterijen niet parallel!

Gebruik geen oplaadbare accu's (NiCd), omdat deze bij kortsluiting kunnen **ontploffen**!

Batterijen nooit opladen! Dit kan een **ontploffing** veroorzaken!

Gebruik nooit batterijen in combinatie met een nettransformator. Dit kan een **ontploffing** veroorzaken!

Gebruik voor de netvoeding uitsluitend de KOSMOS-nettransformator X, bestelnummer 617 813.

Controleer de nettransformator en de toevoerleidingen regelmatig op beschadigingen aan kabel, leiding en steker, en het paneel op scheurtjes enz.

Als u een of ander mankement ontdekt, gebruik de nettransformator dan niet en laat hem in een gespecialiseerde elektrozaak of door de afdeling reserve-onderdelen van KOSMOS repareren.

Ga niet experimenteren met de wandcontactdoos van het lichtnet! De netspanning (220 volt) van het lichtnet is **levensgevaarlijk**!

Attentie! Voor het thuis aanwezig hebben van een radio (al is het type nog zo eenvoudig) is een bewijs van aangifte nodig. Het aangifteformulier is verkrijgbaar op het postkantoor.

KOSMOS

Experimenteerhandboek

KOSMOS electronic XN 2500 en XN 3000

door Klaus Schlenzig

voor meer dan 300 proeven

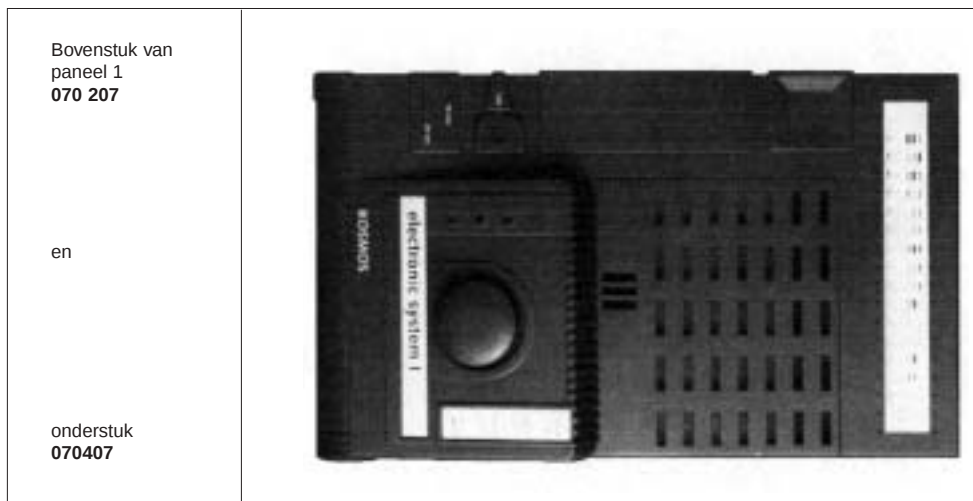
Om zonder risico's te experimenteren zijn twee batterijen van 9 volt nodig van het type 6F22. Deze batterijen zitten niet in het pakket omdat ze maar beperkt houdbaar zijn. In plaats van de batterijen kan gebruik worden gemaakt van de KOSMOS net-transformator X, bestelnummer 617813.

Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart

KOSMOS electronic pakket 1

Technische wijzigingen voorbehouden

Spuitstukje 1
2 doppen
draaiknop voor instelbare
condensator
004 012



electronic multipack 1 000 845

naam	onderdeel	opbouw-en schakelsymbool
weerstand 10 stuks verschillende waarden		
condensatoren 6,8 nF 2 stuks		
electrolytische condensatoren (elco's) 10 µF 100 µF		
germaniumdiode		

2

Zakje met klemveren 33 stuks (multipack 6) 000 612		batterij- aansluiting (multipack 6) 042 106	
set contacthulzen 6 stuks 004 002		3 stukken draad, gebundeld (multipack 6) 000 151	

naam	onderdeel	opbouw-en schakelsymbool
oortelefoon (multipack 4) 042 056		
zakje 1 2 toetsen 3 schroeven (multipack 6) 000 148		
licht-emitterende diode, superrood 000 145 licht-emitterende diode, groen 002 198 (multipack 4)		
nnp-transistor-module 2 stuks (multipack 4) 043 006		
instelbare condensator (multipack 4) 000 143		 aansluitingen instelbare condensator in klemveren A, B en C
L-module (multipack 4) 000 144		
10 korte draadbruggen 000 282 10 lange draadbruggen 000 292 (multipack 6)		

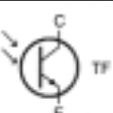
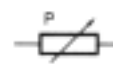
KOSMOS

electronic pakket 2

Technische wijzigingen voorbehouden



Spuitstukje 2 draaiknop voor potmeter scharnierbout 004 022		zakje met klemveren 33 stuks (multipack 7) 000 612	
zakje 2 2 ogen 4 verbindingsspennen 2 montageschroeven (multipack 7) 001 006		3 stukken draad, gebundeld (multipack 7) 000151	

naam	onderdeel	opbouw-en schakelsymbool	
luidspreker (multipack 5) 001 003		luidsprekeraansluitingen op klemveren M en N	
fototransistor (multipack 5) 002 159		 	
versterkermodule (multipack 5) 043 036		 	
potentiometer P1, 10 kΩ (multipack 5) 001 004		potmeteraansluitingen op klemveren D, E en F	
10 korte draadbruggen 000 282 10 lange draadbruggen 000 292 (multipack 7)			

electronic multipack 2 001 009			
naam	onderdeel	opbouw-en schakelsymbool	
weerstanden 5 stuks verschillende waarden		 	
condensator 100 nF		 	
elektrolytische condensatoren (elco's) 1 μF 10 μF		 	

KOSMOS electronic pakket 3

Technische wijzigingen voorbehouden

2 zakjes met elk 33 klemveren 000 612		set contactthulzen 6 stuks 004 002	
Spuitsstukjes 3 2 doppen draaiknop voor potmeter 004 032		lichtgolfgeleider (LGG) 000 676	
batterij- aansluiting 042 106		IC-sokkel- module 001 015	
2x 3 stukken draad, gebundeld 000 151		2x 10 korte draadbruggen 000 282 2x lange draadbruggen 000 292	

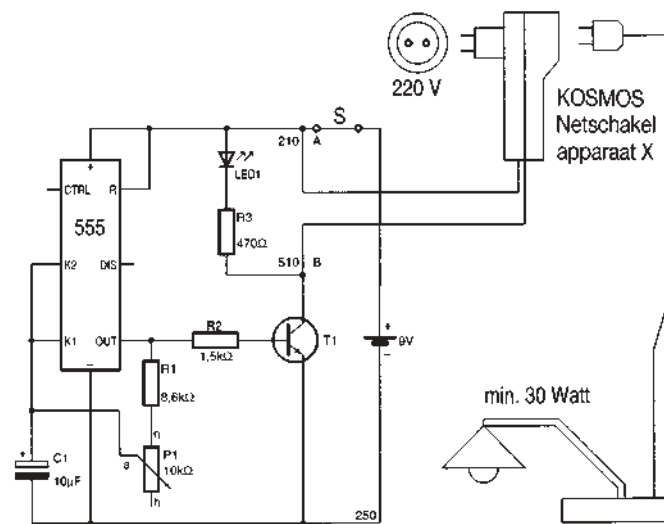
electronic multipack 3 001 018

naam	onderdeel	opbouw-en schakelsymbool
weerstand 15 stuks verschillende waarden		
condensator 100 nF		
elektrolytische conden- satoren (elco's) 10 µF 2 stuks 100µF 470 µF		
siliciumdiode 2 stuks		

naam	onderdeel	opbouw-en schakelsymbool
meetinstrument 001 010		
vochtigheidssensor 043 186		
licht-emitterende diode, geel 001 013 infrarood-zenddiode 001 012		
pnp-transistor module 043 066		
viervoudige operationele versterker IC 324 001 016		
zeventrapsteller IC 4024 001 017		
MOSFET- module 042 956		
timermodule met IC 555 001 014		
potentiometer P2, 100 kΩ 001 011		

Schakelsymbolen

	kruising van leidingen zonder geleidend verbinding
	aftakking van leiding met geleidende verbinding
	kruising van leidingen met geleidende verbinding
	aansluitpunt
	toets
	9 volt-batterij
	weerstand
	potentiometer (potmeter)
	condensator
	elektrolytische condensator(elco)
	licht-emitterende diode
	diode
	nnp-transistor
	pnp-transistor
	fototransistor
	N-kanaal-mosfet
	versterkermodule
	hf-transformator met kern (spoel)
	instelbare condensator
	meetinstrument
	luidspreker (SP=speaker)
	oortelefoon (EP=earphone)
	operationele versterker
	hygro-sensor (HS=humidity sensor)
	555 timermodule
	teller IC 4024
	antenne
	aarde
	massa



Inhoudsopgave

Gebruiksaanwijzing voor de montage van			
electronic XN 3000	.7		
Het monteren van de panelen	.7		
De instelbare condensator en de potentiometers	.8		
De luidspreker en het meetinstrument	.8		
De stroomvoorziening	.9		
Draadbruggen en draden	.10		
LED-houders	.11		
De LGG-houder	.12		
IC-former en -ejector	.13		
Het eerste experiment	.14		
Het waarschuwingsknipperlicht met klinkgeluid	.14		
Het kan ook langzamer	.15		
Van klikken naar piepen	.15		
Het kan nog hoger	.15		
Snelle oren, langzame ogen	.15		
Schakelschema en opbouwschema:			
De twee plaatjes van een schakeling	.15		
De kosmos van de elektronika	.16		
1. Elektronische geestenbezwinging	.16		
Insider-info 1	.16		
2. Boven-natuurlijke elektriciteit	.18		
3. Spanning en stroom	.18		
De lange tocht van de elektronen	.19		
Insider-info 2	.20		
Insider-info 3	.20		
De kracht die elektronen vooruitduwt	.21		
Insider-info 4	.21		
Prestatiemaatschappij	.21		
4. Weerstand ter voorkoming van catastrofes	.22		
Laat honderd bloemen bloeien!	.22		
Kleuren in zicht	.23		
Serie en parallel	.23		
5. Spanning, stroom en weerstand-de wet van Ohm	.24		
De weg naar Ohm	.24		
Insider-info 5	.25		
Ongrijpbare weerstand	.26		
6. Condensator: een opslagplaats voor elektronen	.27		
Stroom in kleine hoeveelheden	.27		
Vlakken op afstand gehouden	.27		
Insider-info 6	.27		
Geleidelijke overgangen	.28		
Insider-info 7	.28		
Vlakken gekoppeld	.28		
Tijdmultiplicato	.28		
Wisselende verhoudingen	.29		
Insider-info 8	.29		
7. Geleider en halfgeleider	.29		
Carpooling in het kristalrooster	.30		
Verstoring van de bestaande orde	.30		
Nuttige consequenties	.30		
Geven en nemen - de pn-overgang	.31		
De straat met eenrichtingsverkeer voor elektronen	.31		
Bonte verscheidenheid	.32		
Insider-info 9	.33		
Hulp van buitenaf	.33		
De derde dimensie	.33		
8. De transistor	.33		
'n Steuntje bij het nadenken	.34		
Emitterschakeling	.35		
Alweer een drempel	.35		
Versterker of schakelaar?	.36		
Ja wordt nee	.36		
Collectorschakeling	.36		
B x B - de stroomlawine	.37		
Emittervolger as "vertraagd licht"	.38		
Drempel met gevoel	.38		
Compensatie door identieke transistoren	.38		
9. Met z'n tweetje geen probleem: het schakelen			
van transistoren	.39		
Stabiele dubbelzinnigheid: de statische flip-flop	.39		
De flip-flop als vrijgezel	.39		
Een in plaats van twee: dynamische flip-flop	.40		
Insider-info 10	.41		
Puls gedeeld door twee	.41		
Dynamiek van een andere soort: de			
monostabiele multivibrator	.41		
Eigen dynamiek: de astabiele multivibrator	.43		
Voor het oog en het oor	.43		
Drempels met sprong: de Schmitt-trigger	.44		
10. De transistor als versterker	.45		
Versterker voor wisselspanning	.45		
Gedeelde batterijspanning	.45		
Insider-info 11	.45		
De bromtest van opa opnieuw tot leven gewekt	.45		
Werkpunt en negatieve terugkoppeling	.46		
Klopsignalen	.46		
Geleidelijke overgangen	.46		
Tegenspraak	.47		
Een weerstand minder	.48		
Insider-info 12	.48		
11. Complementaire schakelingen	.48		
Complementaire RS flip-flop (thyristor-structuur)	.48		
Elektronische overstroombescherming	.49		
PUT-metronoom - een schakeling die "knak" zegt	.49		
Complementair knipperlicht	.50		
Monostabiel in complementair	.51		
pnp-Darlington	.53		
12. Transistorlogica	.53		
13. Van spanning naar vermogen: de AMP TBA 820	.55		
Versterkt alles wat je kunt horen	.55		
Gewenste tonen	.56		
'n Uitstapje naar het rijk van de hoge frequenties	.57		
Het geheim van de detector	.57		
14. Een transistor van een andere soort:			
de MOSFET	.58		
De bron achter de poort	.58		
Dubbel gesperd is beter	.58		
Plus-min-swing aan de poort	.59		
Ieder het zijne	.60		
MOS-logica	.61		
Geleidelijke overgangen	.62		
Een vleugje vochtigheid	.63		
Insider-info 13	.63		
15. Meer dan alleen maar een rol draad	.63		
Praktische schoolwijsheid	.64		
Een ideaal paar	.64		
Verliesgevende zaak	.65		
De oplossing van Colpitts	.66		
16. Kleine radio's - zelf gebouwd	.66		
De ontarde trillingskring	.66		
Een goede antenne is de beste versterker	.66		
Actieve antenne	.67		
Insider-info 14	.68		
Audion: transistor maakt diode overbodig	.69		
Goede reflexen	.70		
Bijna een zender: ontvanger met positieve			
terugkoppeling	.71		
Bipolair en unipolair: gelijke monniken, gelijke			
kappen...	.72		
De "glazen" AMP	.74		
17. De praktijk van de AMP-schakeling	.75		
Klinken en knipperen	.75		
Geïntegreerde Schmitt	.76		
Monoflop en flip-flop - geen flop met de AMP!	.76		
AMP van binnen	.77		
Stromen in de spiegel	.78		
18. Constructieve verschillen	.79		
Niveaumeter voor ladingen	.80		
Gevoelige relatie	.80		
Effecten van de sterkte	.81		
19. Bruggen van de elektronika	.82		
Geluid opgewekt door koude	.82		
Brug met verlichting	.83		
Meten is weten	.84		
20. NE 555: een veelzijdig talent	.85		
Het roemrijke vijftal	.85		
De 555 als trigger: springt over alle drempels	.85		
Flip en flop in de 555	.86		
Maat en geluid	.87		
Allerlei soorten geloei	.92		
Tijd speelt een rol: monoflop met de 555	.94		
Tips voor het gebruik van de sensor	.96		
Praktische trucjes met de 555 als trigger	.98		
Alarmsignalen uit de timer	.100		
Psychische belasting	.101		
21. Opto-elektronika - een eerste kennismaking	.102		
Halfgeleiders onder elkaar	.102		
Who is who?	.102		
De lichtlamp van Schmitt	.104		
Licht-ontsteker	.105		
Een schitterend vibrato	.105		
De 555 in een nieuw licht	.106		
De 555 als actieve kant van de balans	.108		
Een AMP met infrarood-cel	.109		
Aan en uit met infrarood	.109		
22. Draden voor licht	.110		
De gulden snede	.110		
Kracht door licht	.111		
23. Even ontspannen: de speeltuin(1)	.113		
Nostalgie tussen de rails	.113		
Volle bak!	.114		
24. De operationele versterker' basis voor onze			
operatie	.116		
Voorbeeld: de waterpas	.116		
Comparator-praktijk: de integrator	.118		
Geïntegreerde tijd	.119		
Een herrie-integrator	.121		
Amplitude-geometrie	.121		
Stapje voor stapje - telkens een trede hoger	.122		
Sinus - de zachte overgangen	.123		
25. Versterking op maat	.124		
Met de veer op de kogel	.124		
Een inverterende ingang met twee taken	.124		
Delen van de macht	.124		
De praktijk roept	.124		
Het lawaai op het spoor	.126		
26. De schakelcentrale van de operationele			
versterker	.127		
OP(A) Schmitt	.127		
Handbediende astabiele multivibrator	.128		
Test je conditie!	.129		
Overgang en ondergang	.129		
27. Meten is weten	.132		
Stroomlijnen	.132		
Maat-staven	.133		
Eigenverbruik niet gewenst.	.134		
De operationele versterker als redder in			
de nood	.134		
Versterking met een compromis	.135		
De operationele versterker als ohm-meter	.137		
Een thermometer voor milieu-engeltjes	.138		
Wie het kleine niet eert	.139		
Een hygrometer met operationele versterker	.141		
Blikken (af-)wisselen	.142		
Van analoog naar digitaal	.144		
28. On chip: deel en tel op!	.146		
Een paar persoonlijke gegevens	.146		
Een tijd-rekker	.148		
Digital sound	.149		
Een verkeersregelaar	.150		
Bij de vierde heb je beet!	.151		
Telefoon-schakelpost	.152		
Een vuurwerk van tonen	.153		
29. De speeltuin(2)	.154		
Van Star Pieps tot Star Wars	.154		
Geluid dat zweeft in de ruimte	.155		
Uit één twee maken	.157		
Operationele versterker-logica	.158		
Geluid in kleur	.162		
Een zelfgemaakte sleutelhanger die je altijd			
terugvindt	.163		
Alarm - maar dan wel exclusief	.165		
30. Zo spoor je fouten op	.166		
Trefwoordenregister	.167		

Het KOSMOS-electronic laboratorium XN 3000

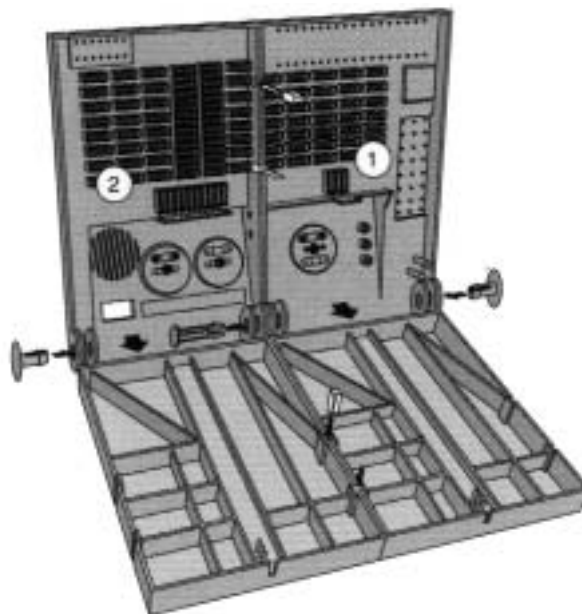
Het electronic laboratorium XN 3000 bestaat uit drie materiaalsets, de zogenaamde electronic pakketten 1 t/m 3, en deze gebruiksaanwijzing van 170 bladzijden met meer dan 300 experimenten. Op bladzijde 2, 3 en 4 vind je een gedetailleerde lijst met de inhoud van elk pakket compleet met foto, artikelnummer, schakelsymbool en opbouwsymbool. De meeste onderdelen zijn in zogenaamde multipacks verpakt of opgestoken, zoals je ook kunt opmaken uit de materiaallijsten. Sommige onderdelen, te weten de spuitstukjes met knoppen, vind je binnen in de panelen. Je doet er verstandig aan vooraan in het experimenteerboek te beginnen en het dan stap voor stap door te werken. Alleen op die manier leer je alle onderdelen van het laboratorium grondig kennen en kun je alle experimenten met succes uitvoeren. Houd je vooral strikt aan de veiligheidsinstructies op de eerste binnenpagina van het omslag. Wij wensen iedereen die aan het experimenteren gaat veel succes en plezier met het KOSMOS-electronic laboratorium XN 3000!

Gebruiksaanwijzing voor de montage van electronic XN 3000

Het monteren van de panelen

Eerst gaan we de beide panelen in elkaar zetten zoals aangegeven op montagetekening 1. Daarvoor worden de onderstukken (070 407) met twee verbindingsspennen uit zakje 2 (001 006 in multipack 7) aan elkaar vastgemaakt en de bovenstukken - paneel 1 (070 207) van achter gezien aan de rechter kant en paneel 2 (070 307) aan de linker kant - met de scharnieren in de onderstukken geschoven. Vervolgens wordt zowel van links als van rechts een dop van het spuitstukje 1 (004 012) in de scharnieren van het onderstuk en het bovenstuk gestoken. In het midden worden de twee paneelhelften verbonden door middel van de scharnierbout van spuitstukje 2 (004 022) die gewoon van links of rechts in de scharnieren wordt gestoken. Tenslotte worden de beide bovenste gedeelten met de twee overblijvende verbindingsspennen aan elkaar vastgemaakt en vormen dan een geheel. Binnenin ons experimenteerpaneel hebben we nu genoeg plaats om onderdelen die we niet nodig hebben veilig op

te bergen. De gaatjesroosters aan de linkerkant en de bovenkant van paneel 1 kunnen worden gebruikt als een veilige "parkeerplaats" voor weerstanden, condensatoren, modules enz. zolang je die niet nodig hebt. Bij sommige experimenten worden de beide panelen los van elkaar gebruikt (bijv. bij proeven met afstandsbediening door middel van de infrarood-zenddiode en de fototransistor). In zo'n geval worden de verbindingsspennen weer uit de onderste en bovenste gedeelten verwijderd en de scharnierbout in het midden weggehaald. In plaats daarvan worden

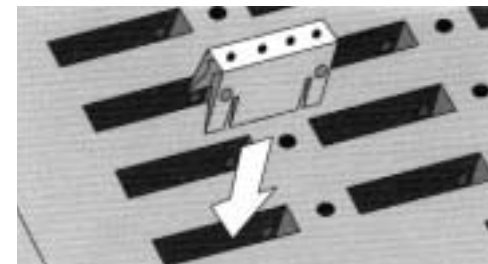


Montagetekening 1. Het monteren van het experimenteerpaneel.

dan de twee overblijvende doppen in het scharnier gestoken, één in elk paneel. Op die manier krijg je twee afzonderlijke volledig operationele experimenteerpanelen.

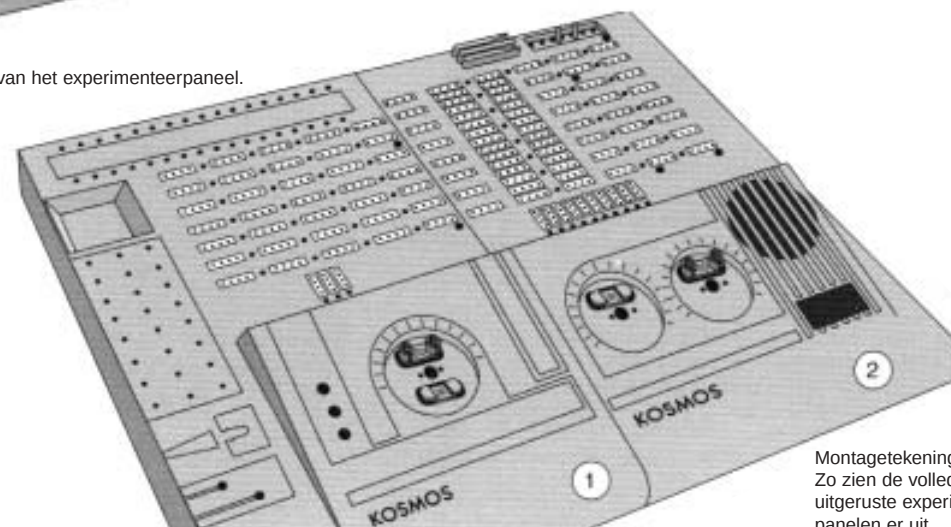
De klemveren

De klemveren (000 612) van multipack 6,7 en pakket 3 worden in de panelen gestoken, zoals aangegeven op montage-tekening 2.



Montagetekening 2. Steek de klemveren zover in de uitsparingen tot ze vast klikken.

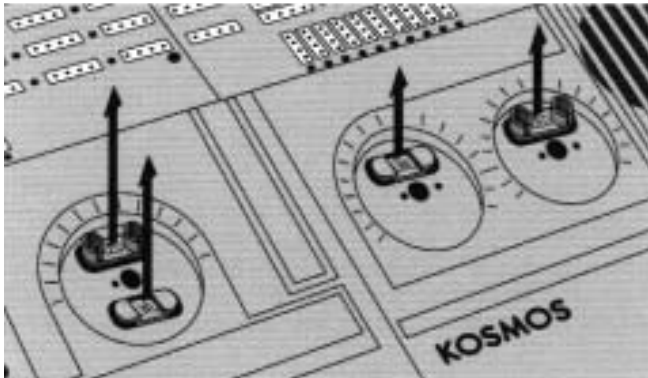
In deze klemveren moeten de onderdelen, modules en draadbruggen, worden gestoken; zij zorgen ervoor dat alle onderdelen stevig op hun plaats blijven en brengen de elektrische verbinding tussen de afzonderlijke delen tot stand.



Montagetekening 3. Zo zien de volledig uitgeruste experimenteerpanelen er uit.

De instelbare condensator en de potentiometers

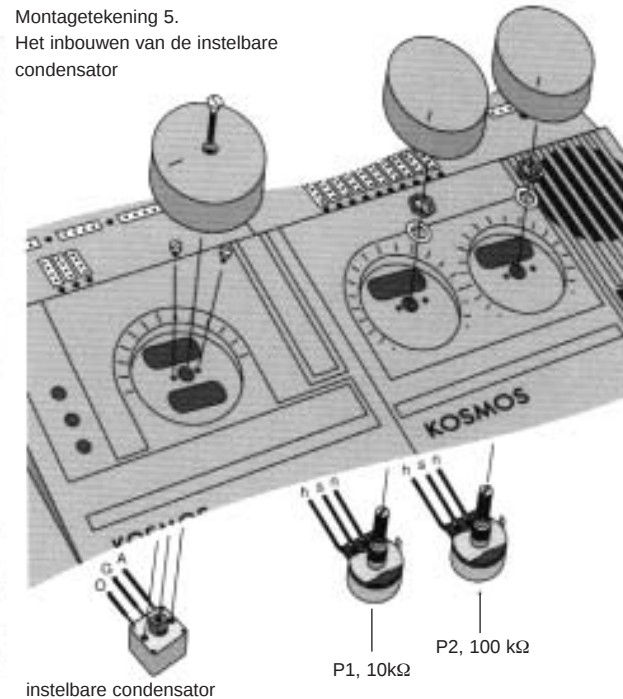
Voordat we de instelbare condensator en de potmeters monteren, moeten we de houders "LGG" en "LED" uit paneel 1 en 2 verwijderen en zorgvuldig opbergen omdat we ze later nodig hebben voor de opto-elektronische proeven.



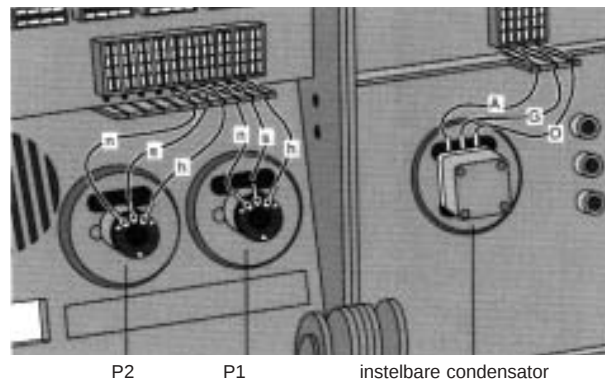
Montagetekening 4. Haal de kunststof onderdelen "LGG" en "LED" voorzichtig uit de panelen door ze te verdraaien. Knip de bramen af.

Nu gaan we de instelbare condensator (000143) van multipack 4 in paneel 1 inbouwen, en de potentiometers (001 004 en 001011) van multipack 5 en electronic pakket 3 in paneel 2. Daarbij moeten de aansluitingen van de instelbare condensator en de potentiometers in de richting van de klemveren wijzen zoals op montagetekening 5 is aangegeven. De instelbare condensator wordt met de twee kleine cilinderkopschroefjes uit zakje 1 (000 148) van multipack 6 op paneel 1 bevestigd. De as van de instelbare condensator wordt helemaal naar links gedraaid, vervolgens wordt de knop van spuitstukje 1 met het gaatje in het midden daarop geplaatst, waarbij het markeringsstreepje naar links wijst, en met de lange schroef met verzonken kop uit zakje 1 vastgeschroefd. De 10 kilo-ohm potentiometer P1 (001 004) bevestigen we met de opgeschroefde zeskantmoer op paneel 1 aan de linker kant. Dan wordt de as van de potmeter naar links gedraaid tot aan de aanslag en de knop van spuitstukje 2 (004 022) daar zodanig opgezet, dat het markeringsstreepje van de knop en het markeringspunt op de schaalverdeling op het paneel boven elkaar staan. Op dezelfde manier wordt ook potentiometer P2 gemonteerd. De aansluitingen van de instelbare condensator O, G en A (herkenbaar aan de achterkant) worden door de gaatjes aan de voorkant van de klemveren A, B en C van paneel 1 getrokken en in de klemveren gestoken. De aansluitdraden worden binnen in het paneel in de spleten van het kamvormige tussenschot gedrukt en op die manier bevestigd. De aansluitingen van de potmeters (h, s en n) worden door de gaatjes aan de voorkant van de klemveren D, E en F (P1) resp. G, H en I (P2) getrokken

Montagetekening 5.
Het inbouwen van de instelbare condensator



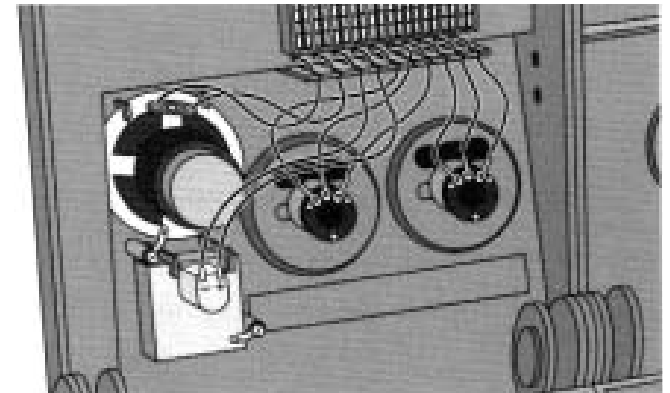
en in de klemveren gestoken. De aansluitdraden binnen in het paneel worden ook weer in de spleten van het kamvormige tussenschot gedrukt en zijn op die manier bevestigd.



Montagetekening 6. Inbouw voltooid: potmeters en instelbare condensator.

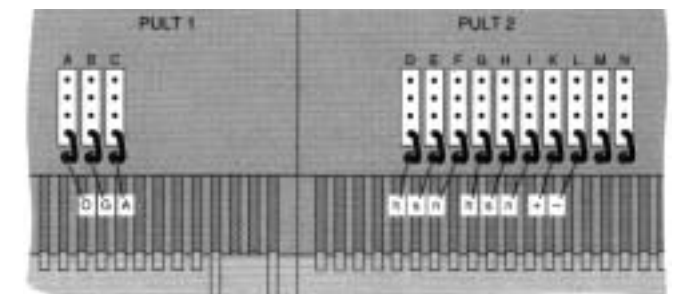
De luidspreker en het meetinstrument

Helemaal rechts aan de rand, onder de sleuven van paneel 2, wordt nu de luidspreker (001 003) van multipack 5 gemonteerd. Deze wordt onder de beide kunststof clips geschoven en met een montageschroef en een oog uit zakje 2 bevestigd. Door het vastschroeven van de montageschroef wordt het gebogen oog tegen de rand van de luidspreker aan gedrukt, waardoor de luidspreker niet meer kan verschuiven. De aansluitingen worden door de gaatjes aan de voorkant van de klemveren M en N getrokken, waarbij de aansluitdraden worden bevestigd door ze in de kamvormige spleten te drukken. Ook het meetinstrument (001 010) van pakket 3 wordt op deze eenvoudige maar doeltreffende manier gemonteerd (vgl. montagetekening 7).



Montagetekening 7. Het meetinstrument en de luidspreker worden ingebouwd.

Nu controleren we nog eens of alle draden in de juiste klemveren steken.

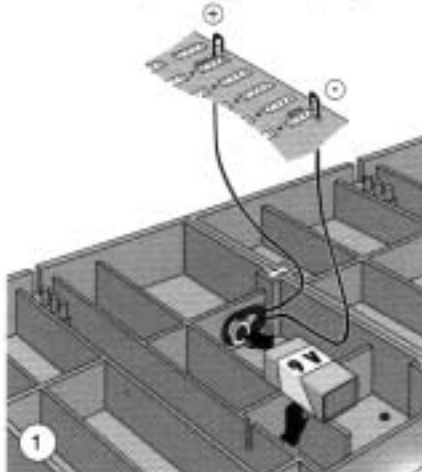


instelbare condensator pot-
meter 1 pot-
meter 2 meet-
instru-
ment luid-
spreker

Montagetekening 8. Controleren kan geen kwaad!

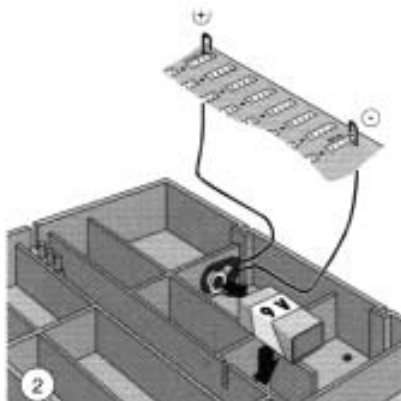
De stroomvoorziening

Nu wordt het tijd om de batterij aan te sluiten. Daarvoor heeft u alleen maar de batterijklem (042 106) van multipack 6 in het daarvoor bestemd vak (paneel 1) te leggen en de aansluitingen ervan door de gaatjes bij klemveer 404 (rode plus-aansluiting) en 804 (zwarte of blauwe min-aansluiting) te trekken en vervolgens in deze klemveren te steken (montagetekening 9).



Montagetekening 9. Let vooral goed op de juiste polariteit: plus (rood) 404, min (zwart of blauw) 804.

Op dezelfde manier wordt de tweede batterijklem van pakket 3 (paneel 2) gemonteerd, waarbij in dit geval de plus-aansluiting in klemveer 110 en de min-aansluiting in klemveer 810 moet worden gestoken (montagetekening 10).



Montagetekening 10. Let ook hier weer goed op de juiste polariteit: plus (rood) 110, min (zwart of blauw) 810.

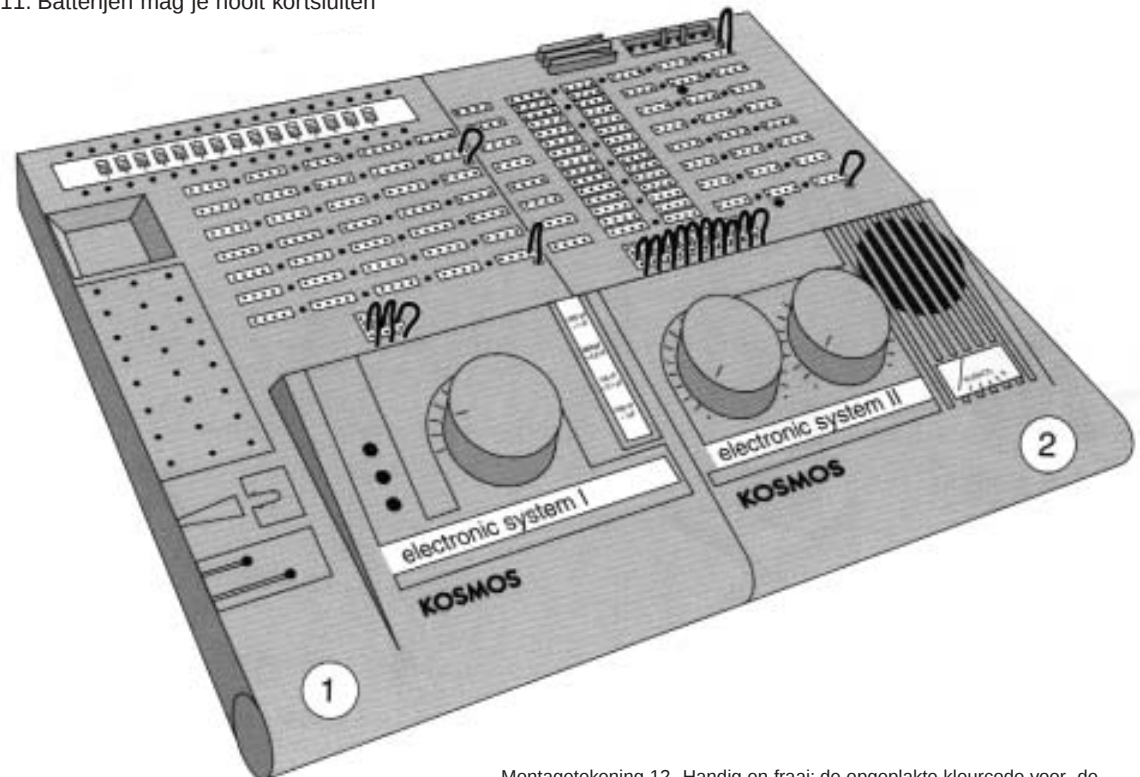
**Haal geen gevaarlijke experimenten uit met batterijen!
Het kortsluiten van batterijen kan een ontploffing veroorzaken!**



Montagetekening 11. Batterijen mag je nooit kortsluiten

Voor de meeste proeven, in het bijzonder tot we gaan werken met de operationele versterker 324 (001 016) van pakket 3, maken we alleen gebruik van de batterijaansluiting in paneel 2.

Uit de (in dit instructieboek) ingevoegde kleurenpagina knippen we nu met een schaar de strook met de weerstanden, de kaartjes met de opschriften "electronic system I" en "electronic system II" en de omreken tabel voor condensatoren en plakken deze met een beetje lijm op de daarvoor bestemde plaatsen op paneel 1 resp. paneel 2 (montagetekening 12).



Montagetekening 12. Handig en fraai: de opgeplakte kleurcode voor de weerstanden en de omreken tabel.

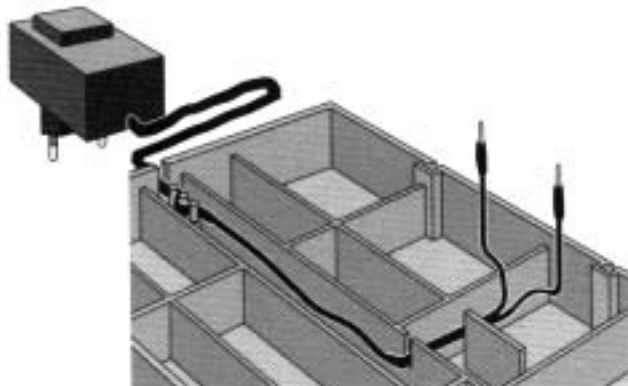
In bijna alle schakelingen wordt een draadbrug als hoofdschakelaar gebruikt. Deze wordt aangeduid met "S", of "S1" en "S2" wanneer gebruik wordt gemaakt van beide batterijaansluitingen. Om een schakeling uit te schakelen hoeft je dan alleen maar deze bruggen eruit te halen. Het is dan niet absoluut noodzakelijk de batterijaansluiting of de batterij te verwijderen als je wilt ophouden met experimenteren.

Als je met de KOSMOS-nettransformator X (617 813) werkt, moet je dezelfde klemveren gebruiken als bij batterijvoeding. Je moet dan wel eerst de batterijklemmen uit de panelen verwijderen.

Let op: sluit nooit batterijen en nettransformator tegelijkertijd aan!!! Dit kan een ontploffing veroorzaken!!!

Neem altijd de veiligheidsinstructies op de eerste binnen-pagina van het omslag in acht!

De aansluitingen van de nettransformatoren worden door de uitsparingen aan de achterkant van de panelen geleid en zodanig om de drie tappen gevlochten dat voor een zekere mate van bescherming tegen trekbelasting is gezorgd. De aansluitingen van de KOSMOS-nettransformator worden door dezelfde gaatjes getrokken als die waardoor de aansluitingen van de batterijklemmen geleid worden en in dezelfde klemveren gestoken (montagetekening 13).

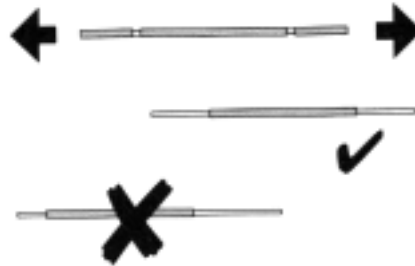


Montagetekening 13. Milieubewust experimenteren: de KOSMOS-nettransformator X i.p.v. batterijen!

Draadbruggen en draden

De lange (000 292) en korte (000 282) stukken draad in de zakjes van multipack 6, 7 en pakket 3 worden tot draadbruggen gebogen. Daarvoor maken we gebruik van de buigvormen in paneel 1. Het

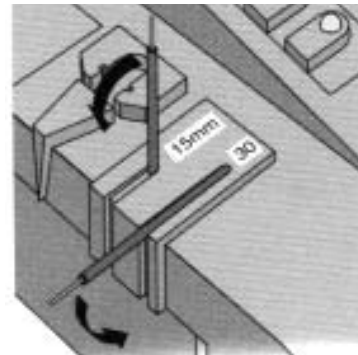
30 mm gat is voor de lange draadbruggen bestemd, en het 15 mm gat voor de korte. Eerst wordt de overbodige isolatie aan de uiteinden van de stukken draad verwijderd en het overblijvende middenstuk gecentreerd.



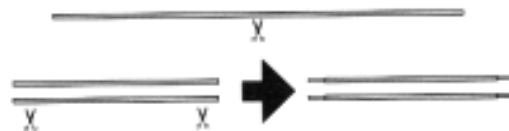
Montagetekening 14. Isolatieresten aftrekken en het middenstuk centreren.

De stukken draad worden loodrecht in de gaatjes gestoken, naar de rand van het paneel toe gebogen en vervolgens zodanig omlaag-gebogen dat er een hoek ontstaat, zoals op montage-tekening 15 staat aangegeven.

Van de lange stukken draad (042 106) van multipack 6, 7 en pakket 3 kun je aansluitdraden maken voor LEDs en de fototransistor. Deze draden heb je nodig voor alle proeven waarbij montage aan de zijkanten van de panelen noodzakelijk is (fotocel enz.). Daarvoor worden 5 stukken draad met een stevige schaar of een echte zijknijptang in het midden doorgeknipt, waarna aan elk uiteinde ongeveer 15 mm van de isolatie wordt verwijderd. Een op die manier geprepareerde, in tweeën gedeelde draad volstaat voor de fototransistor of een LED. In het volgende hoofdstukje komen zij aan de beurt.



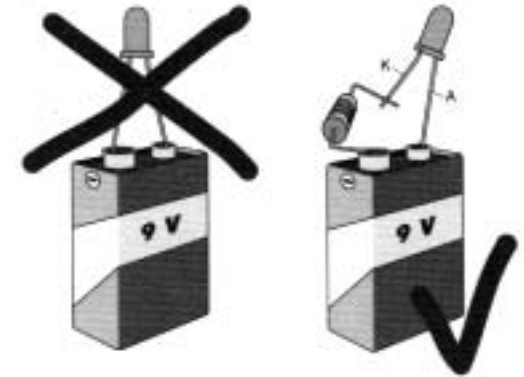
Montagetekening 15. Gemakkelijk te maken: draadbruggen.



Montagetekening 16. De aansluitingen voor LEDs en de fototransistor.

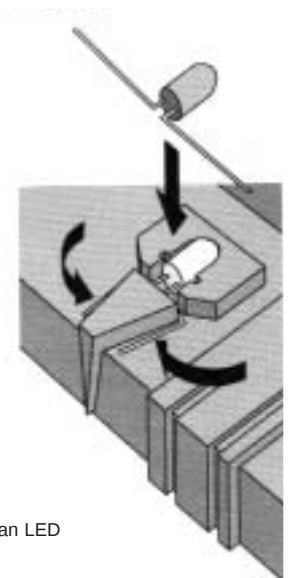
Fototransistor en licht-emitterende diodes

Licht-emitterende diodes zijn zeer gevoelige onderdelen en mogen nooit worden overbelast. Daarom sluiten we de licht-emitterende diodes nooit rechtstreeks aan op een batterij of het licht-net, maar uitsluitend via een voorschakelweerstand!



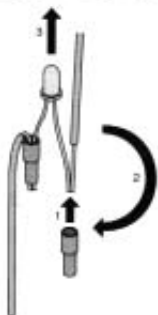
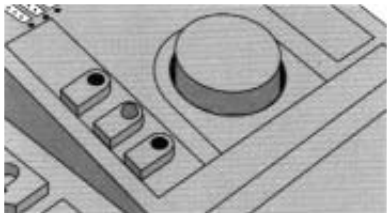
Montagetekening 17. LEDs mag je nooit zonder voorschakelweerstand testen!

Net als de draadbruggen moeten we ook de licht-emitterende diodes (000 145, 002 198, 001 013 en 001 012) en de fototransistor (002 159) voor gebruik geschikt maken voor ons doel door ze op maat te buigen. Ook daarvoor zit er op paneel 1 een handige buigmal. Eerst worden de aansluitingen van de onderdelen in een hoek van 90 GRAD uiteengebogen. Vervolgens worden ze in de buigmal voor LEDs gelegd en worden de aansluitingen weer zo ver naar elkaar toe gebogen als de buigmal toelaat. Wanneer we de aansluitingen nu loslaten, houden zij automatisch de juiste onderlinge afstand van 15 mm aan.



Montagetekening 18. Het op maat buigen van LED en fototransistor

Met de contacthulzen (004 002) kunnen we de LEDs en de fototransistor voorzien van draden. We maken eerst de contacthulzen los van het spuitstukje. Vervolgens steken we telkens een aansluiting van het onderdeel samen met het afgestripte uiteinde van een lange draad in een contacthuls en buigen deze in een scherpe hoek omlaag. Daarna kunnen we het onderdeel indien nodig in een van de drie openingen van paneel 1 steken (montagetekening 19).

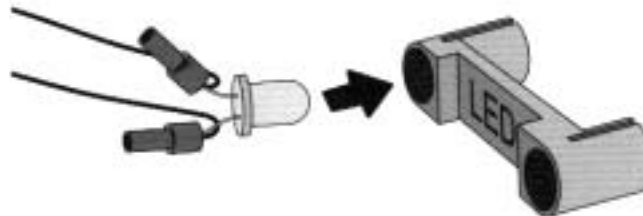


Montagetekening 19.
Opto-elektronische onderdelen met leidingen voor de inbouw in paneel 1.

De draden worden dan in plaats van het onderdeel in de daarvoor bestemde klemveren van de opbouw gestoken. Ze moeten dan van onderop door de daarvoor bestemde gaatjes naast de klemveren worden getrokken en ingestoken, net zo als we dat met de potmeters, de instelbare condensator enz. hebben gedaan.

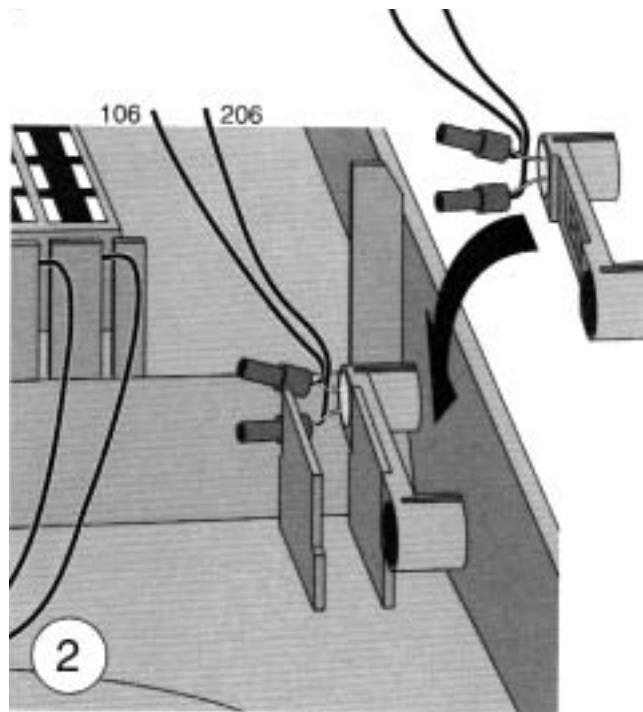
LED-houders

Bij alle proeven, waarvoor montage van de opto-elektronische onderdelen aan de zijkant is vereist, gebruiken we de LED-houders om deze onderdelen te bevestigen. We nemen een LED-houder, die we bij het begin van de montage van de panelen uit paneel 1 of 2 hebben verwijderd, en de van draden voorziene fototransistor (TF) in de hand en steken deze in de opening aan de kant waar geen spleet zit. De doorsnede aan de buitenkant is niet bij alle licht-emitterende diodes even groot; daarom is de opening net groot genoeg om ook de grootste licht-emitterende diodes nog te kunnen insteken. Licht-emitterende diodes met kleinere af-metingen moeten eventueel met een stukje papier worden vastgeklemd (montagetekening 20).



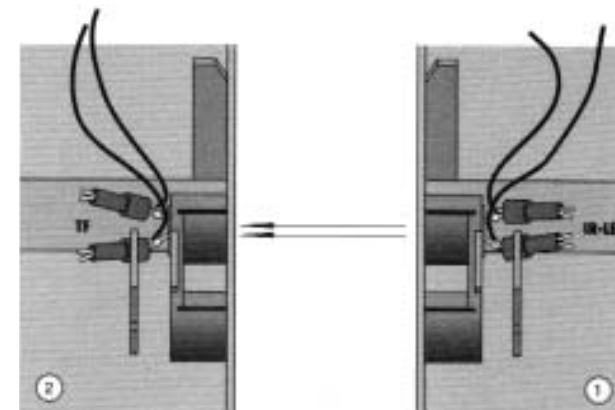
Montagetekening 20. De LED-houder wordt uitgerust met de fototransistor.

De LED-houder met fototransistor wordt binnen in paneel 2 in de uitsparing tussen de gaten in de zijkanten van de behuizing en het direct daarvoor staande eerste kunststof tussenschot gedrukt.



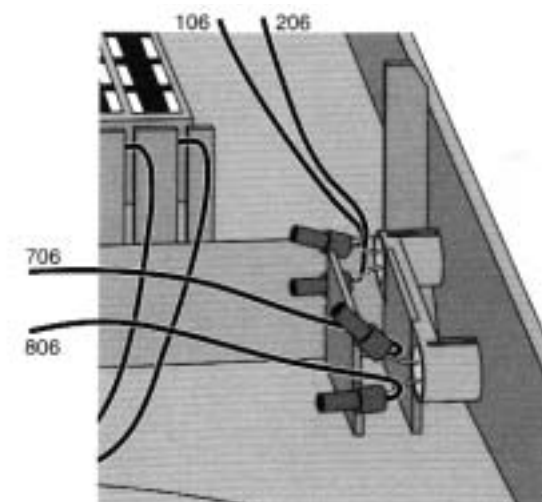
Montagetekening 21. Montage van de fototransistor.

Op dezelfde manier wordt de infrarood-zenddiode (IR-LED) in paneel 1 gemonteerd (montagetekening 22).



Montagetekening 22. Montage van de infrarood-zenddiode (IR-LED).

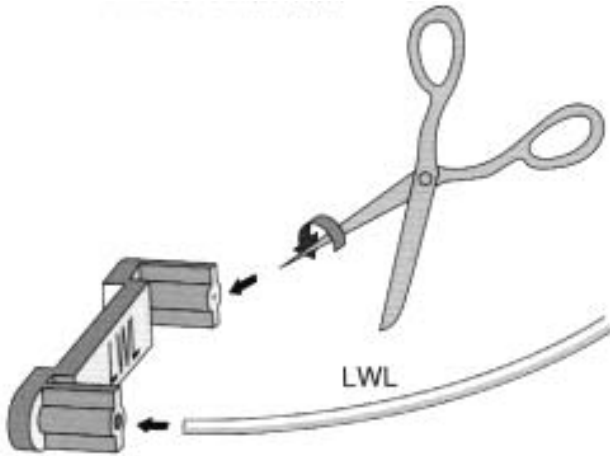
Bij alle proeven met een dergelijk fotocelprocédé, d.w.z. met gescheiden zender en ontvanger, wordt deze manier van monteren toegepast. Voor de proef reflex-fotocel worden de beide bouwdelen in paneel 2 gemonteerd, en wel naast elkaar in dezelfde LED-houder. Montagetekening 23 laat deze opstelling zien. De cijfers op de aansluitingen verwijzen naar de overeenkomstige klemveren en zijn ook terug te vinden op de montagetekening voor deze proef.



Montagetekening 23. Fototransistor (TF) en IR-LED naast elkaar gemonteerd.

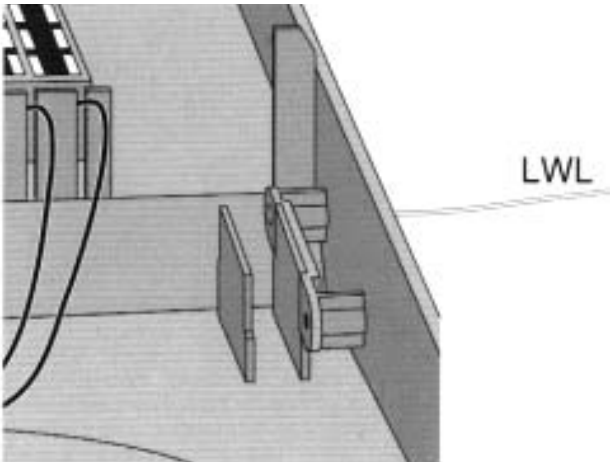
De LGG-houder

De lichtgolfgeleider LGG (000 676) wordt samen met de LGG-houder gebruikt. Eerst moeten we de kleine gaatjes van de LGG houder met een scherp voorwerp (pas op dat je je niet bezeert!) een beetje breder maken, zodat de LGG er wel in past, maar er niet van zelf uit kan vallen.

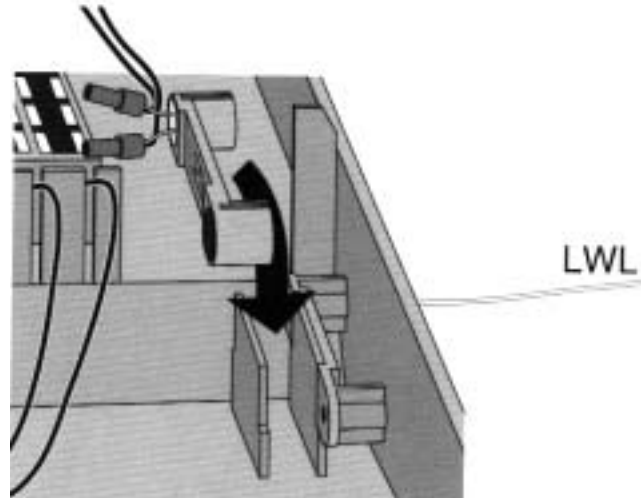


Montagetekening 24. De LGG-houder wordt aangepast.

Nadat we de houder geschikt hebben gemaakt voor de LGG, plaatsen we hem tussen het eerste kunststof tussenschot en de wand van paneel 2. Daarna kan de LGG van de buitenkant af in de houder worden geschoven. Hij mag aan de binnenkant niet uitsteken.

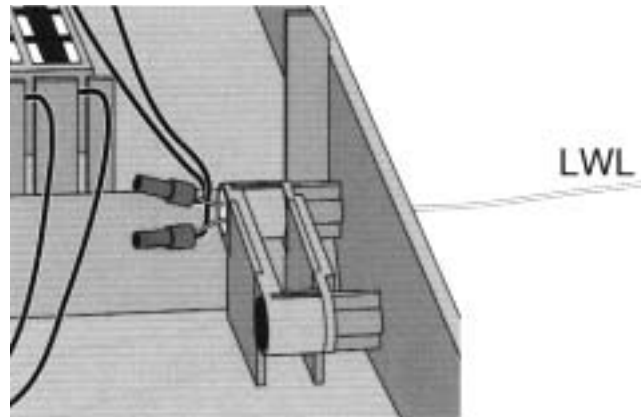


Montagetekening 25. De LGG wordt naar binnen geschoven.



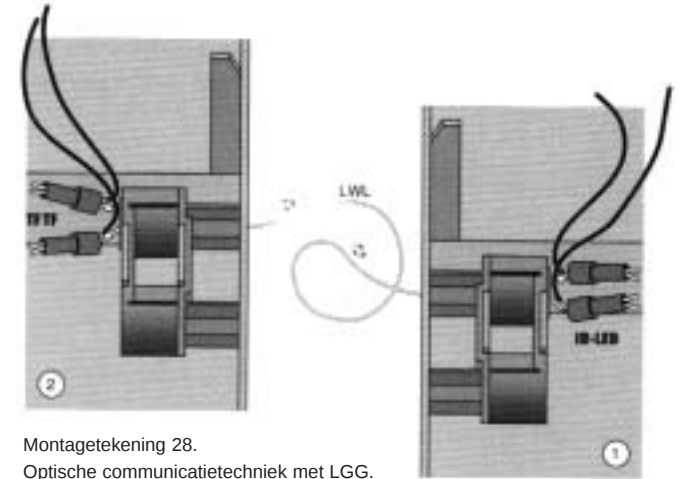
Montagetekening 26. De LED-houder met onderdeel tussen de beide tussenschotten plaatsen.

Nu wordt de LED-houder met de fototransistor of de IR-LED tussen het eerste en het tweede kunststof tussenschot geplaatst. Montagetekening 27 geeft een indruk van het uiteindelijke resultaat. De optische koppeling is tot stand gebracht.



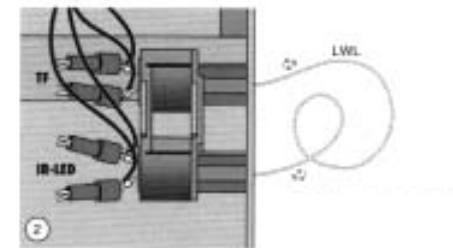
Montagetekening 27. Zo worden de beide houders achter elkaar geschakeld.

Op montagetekening 28 zien we een typische toepassingsmogelijkheid voor deze manier van monteren: aan de linkerkant bevindt zich in paneel 2 als ontvanger de fototransistor (TF), aan de rechterkant in paneel 1 als zender de IR-LED. Daartussen als overdrachtsmedium, ook in niet-rechte lijn, de LGG.



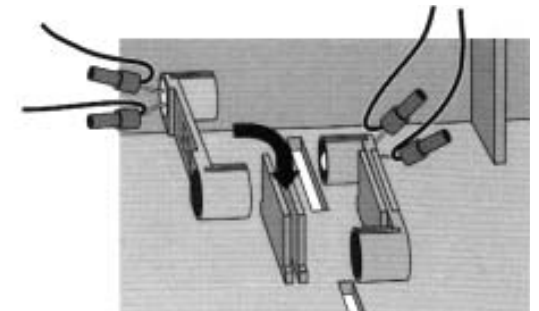
Montagetekening 28.
Optische communicatietechniek met LGG.

Natuurlijk kun je de LGG-proeven ook uitvoeren met de zender en de ontvanger in één paneel.



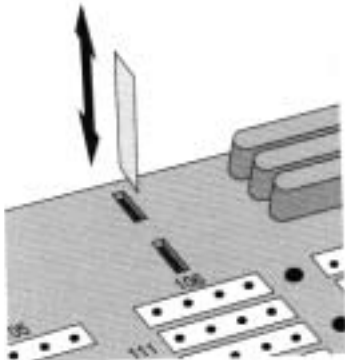
Montagetekening 29.
Zender en ontvanger onder één dak.

Voor fotocel- en overdrachtsproeven in een behuizing kan gebruik worden gemaakt van de beide kunststof tussenschotten onder de twee spleten achter klemveer 106 van paneel 2.



Montagetekening 30
In het paneel is de storende werking van licht van buitenaf minder groot

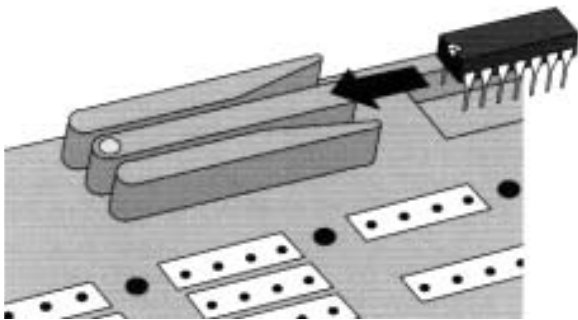
Door deze twee spleten kun je deze minifotocel onderbreken zonder dat je daarvoor het paneel hoeft te openen. Je schuift dan gewoon een stukje papier in de spleet.



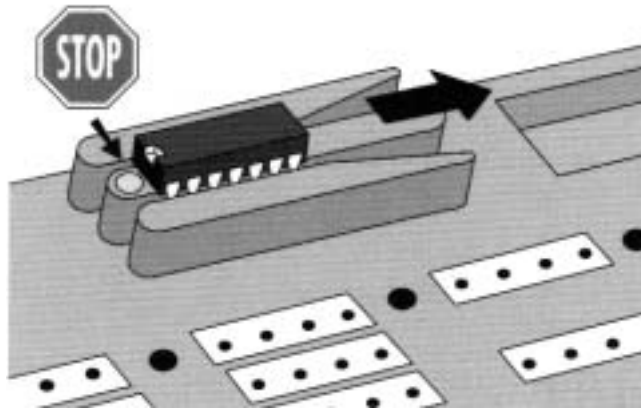
Montagetekening 31.
Onderbreking van buitenaf
is mogelijk.

IC-former en -ejector

Deze experimenteerdoos bevat twee ICs, een viervoudige operationele versterker 324 (001 016) en een teller 4024 (001 017) die na elkaar in de schakelingen op de IC-sokkelmodule (001 015) worden geplaatst. Om montage en demontage te vergemakkelijken, bevinden zich rechts boven op paneel 2 twee heel nuttige hulpmiddelen, de former en de ejector. Voordat we met de geïntegreerde schakelingen, kortweg ICs, kunnen gaan werken, moeten we ze prepareren. Gewoonlijk wijzen de pootjes van de geleverde ICs niet loodrecht omlaag, maar zijn een beetje naar buiten gebogen. Dat maakt het moeilijk om ze netjes en zonder de pootjes te verbuigen in de IC-sokkelmodule te steken. Om dit te bereiken, zetten we de IC op de IC-former en schuiven hem langzaam naar voren tot aan het markeringssteken STOP.



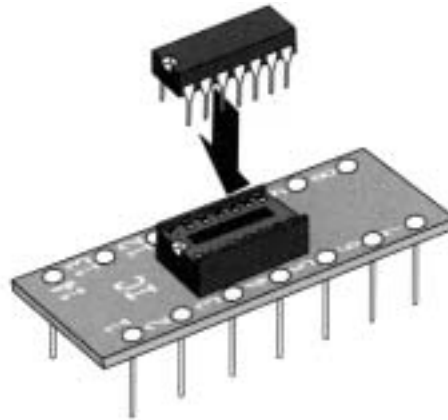
Montagetekening 32.
De aansluitingen van de ICs leveren nog wel eens problemen op.



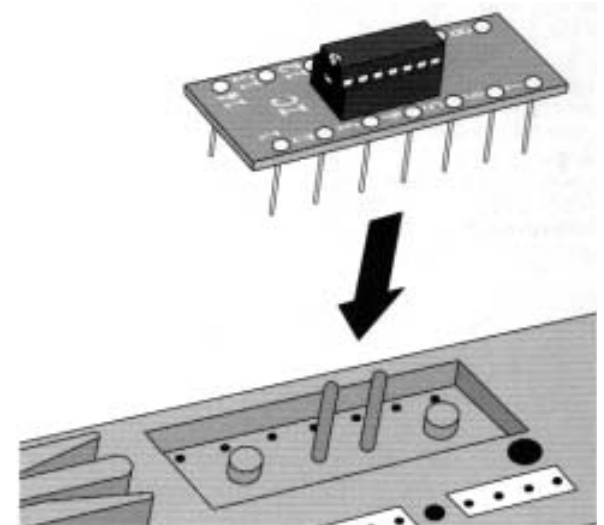
Montagetekening 33. STOP. Tot hier en niet verder!

Nu weer voorzichtig terugschuiven en vervolgens in de sokkelmodule steken. We moeten er wel goed op letten dat de inkeping die zich aan een van de korte zijden van de IC bevindt, bij het insteken aan dezelfde kant zit als de inkeping in de sokkel van de module. **Anders is de IC verkeerd gepoold en heb je kans dat hij stuk gaat!**

Ook het wisselen van ICs is problematisch. Daarvoor dienen de beide tappin van de ejector op paneel 2.

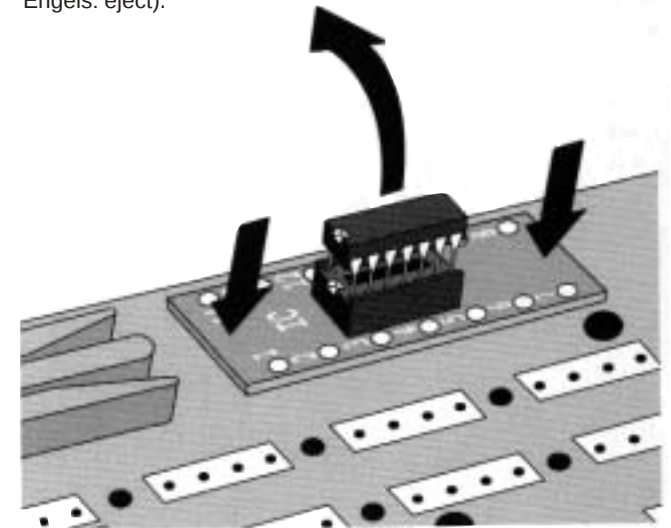


Montagetekening 34. Steek hem in de sokkel,
maar let op dat je het goed doet!



Montagetekening 35. Ook voor het wisselen is er een hulpmiddel, de ejector

De sokkelmodule wordt met de gaten aan de onderkant van de printplaat boven op de tappin gezet en vervolgens wordt de printplaat omlaaggedrukt door voorzichtig en gelijkmatig op de vrije vlakken van de sokkelmodule te duwen. Op die manier wordt de IC door de beide tappin uit de voet gedrukt (in het Engels: eject).



Montagetekening 36. Dankzij de ejector komt onze IC onbeschadigd
uit de sokkel.

Het eerste experiment

Voordat we echt gaan beginnen, eerst nog even een experiment als voorproefje. Hierin komen we iets meer te weten over de tekeningen en begrippen die in het experimenteelgedeelte worden gebruikt.

Het waarschuwingsknipperlicht met klikgeluid, dat kan worden omgebouwd tot een toonfrequentiegenerator.

Voor het eerste experiment leggen we de volgende onderdelen gereed, bij voorkeur in het gatenrooster aan de linkerkant en de bovenkant van paneel 1:

Van multipack 1:

470 Ω weerstand, kleurcode: geel-violet bruin.

15 k Ω weerstand, kleurcode: bruin-groen oranje.

100 k Ω weerstand, kleurcode: bruin-zwart geel.

elco 100 μ F.

Bovendien voor het ombouwen tot de toonfrequentiegenerator:

33 k Ω weerstand, kleurcode: oranje oranje-oranje.

En van multipack 2:

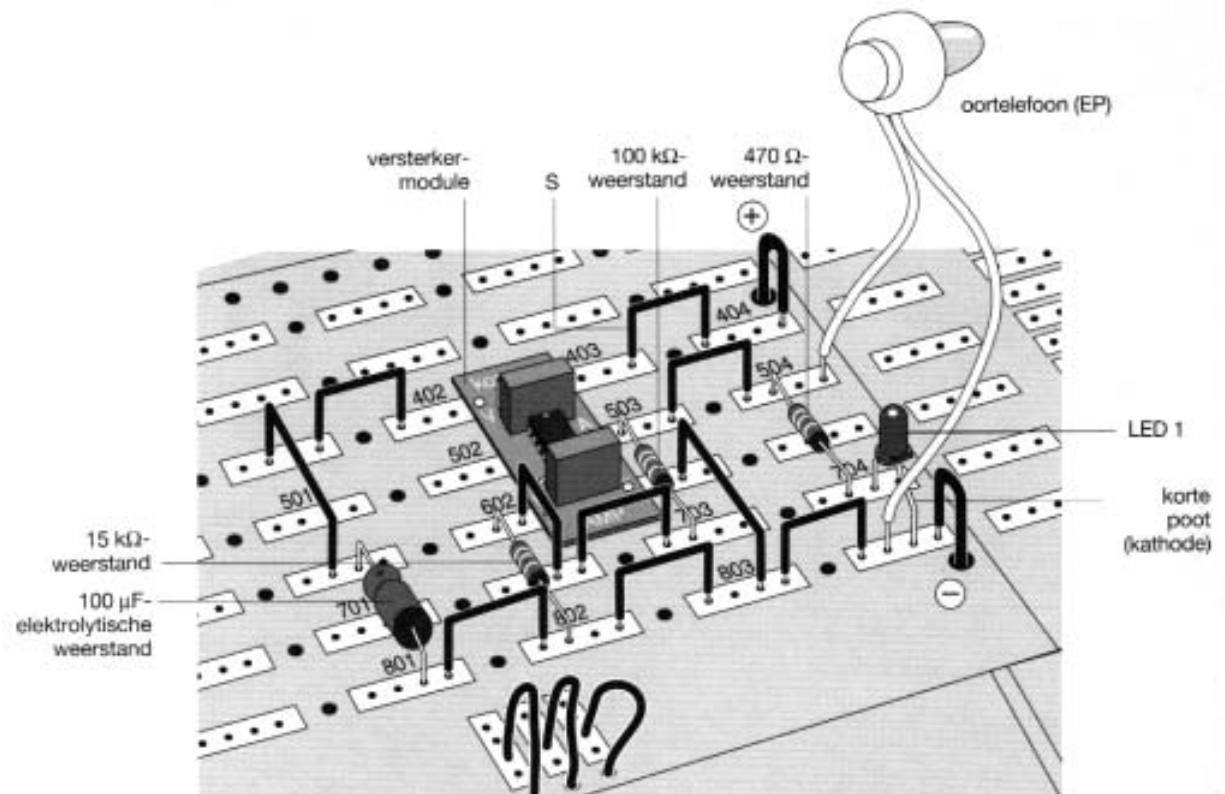
condensator 100 μ F oftewel 0,1 μ F (vgl. omreken tabel op paneel 1).

Van multipack 5 hebben we de versterkermodule (AMP, 043036), de rode licht-emitterende diode (LED, 000 145) en de oortelefoon (EP, 042 056, Multipack 4) nodig. Bovendien nog draadbruggen: acht korte en twee lange.

We rusten nu het experimenteerpaneel uit zoals aangegeven op montagetekening 37. In het algemeen kun je daarbij het beste als volgt te werk gaan:

- 1.) Eerst de modules opsteken (in dit geval de versterkermodule).
- 2.) Dan de wat plattere onderdelen zoals weerstanden, condensatoren en diodes.
- 3.) Nu de korte draadbruggen, vervolgens de lange.
- 4.) Dan komen de licht-emitterende diodes (LED) aan de beurt en/of de fototransistor (TF). Bij inbouw in paneel 1 de pootjes van deze onderdelen insteken.
Let op dat je altijd aan de juiste polariteit aansluit:
korte poot = kathode (K)
bij de fototransistor korte poot = collector (C).
- 5.) Indien nodig, daarna de lange einden draad insteken.
- 6.) Tenslotte de schakelaarbruggen "S" resp. "S1" en "S2".
Als iets niet werkt, kijk dan in het hoofdstuk "Opsporen van fouten" achter in het boek en volg de aanwijzingen op die daar worden gegeven.

De bedienings- en meldingselementen (potmeters, meetinstrument, luidspreker en instelbare condensator) hebben bij alle experimenten een vaste plaats in de klemveren.



Montagetekening 37. Zo wordt het waarschuwingsknipperlicht opgebouwd.

Al bestaat dit knipperlicht uit niet meer dan een half dozijn onderdelen, toch is het een technisch hoogstandje: de licht emitterende diode (LED) licht de hele tijd op en dooft dan weer en blijft uren, dagen-, weken- en maandenlang knipperen zonder dat er iemand aan te pas komt en zonder dat er op mechanische wijze een verbinding tot stand wordt gebracht. Onze licht-emitterende diode knippert ongeveer twee keer per seconde, dat betekent, dat ze 172.800 keer per dag wordt in- en uitgeschakeld. Als je zou proberen een dergelijk knipperend vermogen uit een gewone lichtschakelaar te halen - we gaan dan even uit van een levensduur van 1 miljoen schakelingen - dan zou die nog geen week meegaan. De kern van het waarschuwingsknipperlicht is de versterkermodule. Waarom voor een knipperlichtschakeling een versterker wordt gebruikt en hoe het geheel in zijn werk gaat, wordt later in het experimenteelgedeelte van het boek verklaard.

Voorlopig willen we alleen het volgende verklappen: de eigenlijke versterker is het kleine zwarte kastje boven op de module.

Hij bestaat van binnen niet uit een aantal één voor één aan elkaar gesoldeerde onderdelen, maar is veeleer een geïntegreerde schakeling (in het Engels: Integrated Circuit = IC), waarbij de onderdelen volgens een speciaal, uiterst gecompliceerd procédé zijn verenigd op een minuscule halfgeleiderplaatje (chip) met een oppervlakte van slechts enkele vierkante millimeters: 17 transistoren, 6 weerstanden en 4 diodes.

Het kan ook langzamer

In een handomdraai kunnen we het knipperen vertragen: we vervangen de weerstand R2 van 100 k Ω door de weerstand van 33 k Ω . Als we nu ook nog via de oortelefoon naar het klikken luisteren, is het net of we een echt autoknipperlicht hebben gemaakt!

Van klikken naar piepen

Nu zullen we de elco C1 van 100 μ F eens vervangen door een condensator van 100 nF. En wat blijkt? In de oortelefoon horen we een piepend geluid. Van ons waarschuwingsknipperlicht hebben we een toonfrequentiegenerator gemaakt!

Het kan nog hoger

We vervangen de weerstand van 33 k Ω weer door de weerstand van 100 k Ω en krijgen dan een nog hogere pieptoon te horen.

Snelle oren, langzame ogen

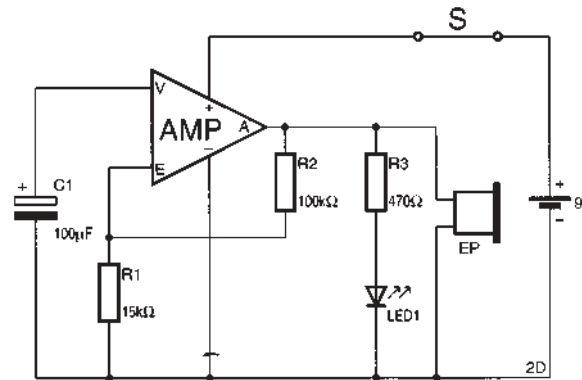
In beide experimenten konden we de snelle overgang van "aan" naar "uit", een paar duizend keer per seconde, in de licht-emitterende diode niet meer registreren. Alleen de lichtintensiteit is schijnbaar minder geworden. Ongeveer vanaf 20 keer aan-uit schakelen per seconde kunnen onze ogen het tempo niet meer bijhouden. Dit in tegenstelling tot onze oren, die dan pas goed beginnen te registreren.

Schakelschema en opbouwschema:

De twee plaatjes van een schakeling

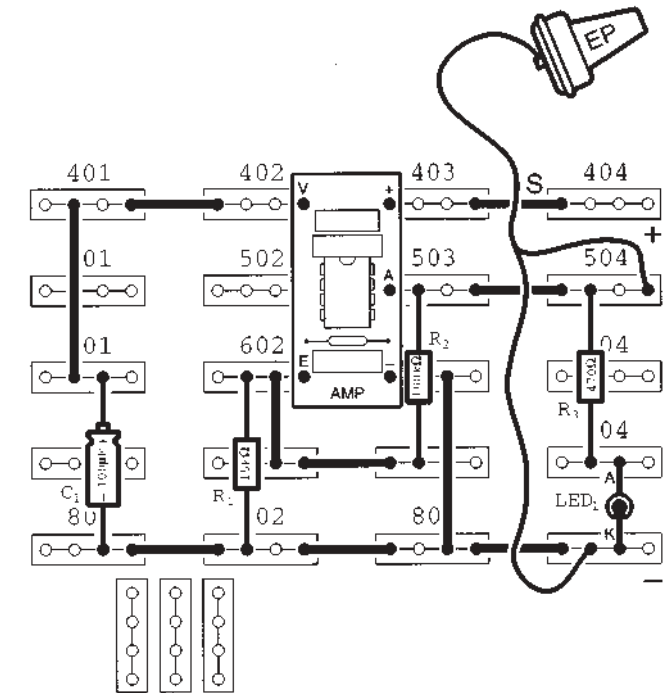
In ons experimenteerboek geven we bij elke schakeling twee verschillende afbeeldingen, namelijk het schakelschema en het opbouwschema. Het opbouwschema is bedoeld om de opbouw te vergemakkelijken; het laat ons zien hoe de onderdelen op de montageplaat van de panelen zijn gerangschikt en hoe de draden moeten lopen. Het schakelschema daarentegen laat op vereenvoudigde wijze door middel van schakelsymbolen zien, welke onderdelen aaneengeschaakeld zijn zonder dat daarbij rekening wordt gehouden met de werkelijke vorm en de exacte positie van die onderdelen. Het is bedoeld om op een overzichtelijke wijze de functie van een schakeling te verduidelijken en vormt het uitgangspunt van elk schakelingsidee. Schakelschema's worden in de vakliteratuur ook wel stroomkringschema's genoemd. Montagetekening 38 laat het schakelschema van ons elektronisch bestuurd knipperlicht zien.

De versterkermodule is voor het gemak alleen met een driehoekje aangegeven, ofschoon er op het printplaatje nog enkele condensatoren en een weerstand zitten die voor het functioneren van de versterker noodzakelijk zijn. We beschouwen de complete module als versterkereenheid en omdat versterkers in de elektronica altijd door een driehoekje worden gesymboliseerd, doen wij dat hier ook zo. In de lijst op pagina 5 hebben we alle in dit boek gebruikte symbolen voor onderdelen, de zogenaamde schakelsymbolen, op een rijtje gezet.



Montagetekening 38. Het schakelschema van het waarschuwingsknipperlicht.

Zoals je op montagetekening 39 kunt zien, is het opbouwschema een vereenvoudigde tweedimensionele variant op de uitgebreidere driedimensionele afbeelding zoals weergegeven op montage-tekening 37.

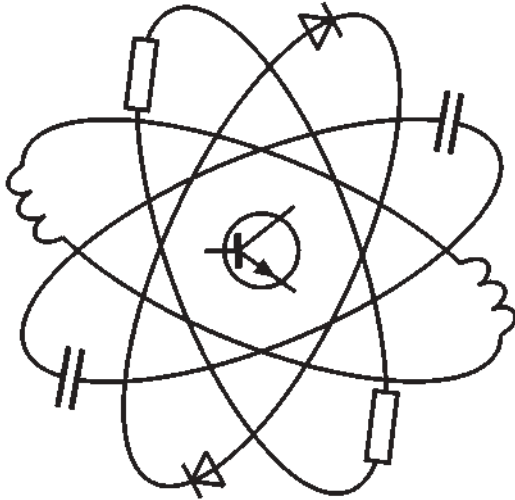


Montagetekening 39. Opbouw voor de schakeling "waarschuwingsknipperlicht" volgens montagetekening 38.

Dit schema bevat alleen de voor de correcte opbouw absoluut noodzakelijke gegevens, namelijk de genummerde klemveren alsmede de onderdelen, draadbruggen en draden.

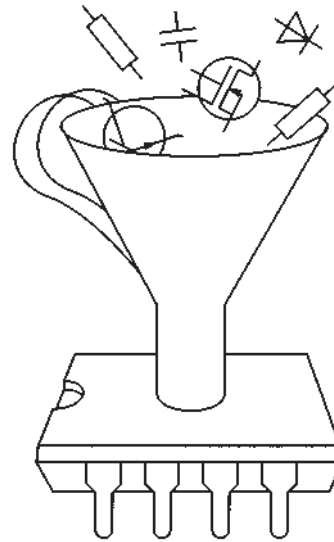
De kosmos van de elektronika

De elektronika is een wereld op zich. De belangrijkste bestanddelen ervan zijn de elektrische en elektronische onderdelen. Tegenwoordig zijn veel van die onderdelen samengevoegd tot grotere eenheden - tot geïntegreerde schakelingen op minuscule siliciumschijfjes, de zogenaamde chips.



Figuur 1. In de KOSMOS van de ELEKTRONIKA draait alles om halfgeleiders...

Kennis van de onderdelen en hun functies is de alfa en de omega, als je probeert te begrijpen hoe al die verschillende resultaten tot stand komen waarmee de moderne elektronika ons het leven gemakkelijker, rijker en leefbaarder maakt - van de zakrekenmachine, de radio of de pacemaker in onze directe omgeving tot de televisie- en communicatiesatellieten in het heelal. Niemand haalt het in zijn hoofd om van de vierde verdieping naar beneden te springen, als hij de straat op wil. En op dezelfde manier waarop wij gebruik maken van de trap, stap voor stap en trede voor trede, gaan wij ons in de elektronika inwerken en haar haar geheimen één voor één ontlocken. En tenslotte zullen we verbaasd vaststellen dat alles heel logisch in zijn werk gaat, ook wanneer we - zoals in het volgende hoofdstuk - in het schemerdonker een "elektronische geestenbezwinging" gaan uitvoeren.



Figuur 2. De Neurenbergse trechter van de micro-elektronika.

1. Elektronische geestenbezwinging

Binnenkort schrijven we de 21e eeuw. Veel grote en kleine raadsels van onze wereld zijn opgelost. Het is tegenwoordig niet gemakkelijk om nog in geesten te geloven. Maar uitgerekend die willen we in ons eerste experiment met een knipoogje gaan oproepen.

1 Het "spookexperiment" wordt opgebouwd volgens het schakelschema van figuur 4. Het bijbehorende opbouwschema is weergegeven in figuur 5. In klemveer 606 steken we een lang stuk draad loodrecht zoals een antenne. Maar let op: **buig het bovenste uiteinde omlaag zodat de punt niet in je oog kan prikken!**

Op een dag als de lucht niet al te vochtig is vormen we vervolgens met duim en wijsvinger een O rond de "antenne" zonder die aan te raken, en schuifelen een paar keer stevig met onze schoenen met rubber- of leren zolen over het tapijt. Dan zul je direct een spookachtig piepend of krakend geluid horen.

2 Niet iedereen heeft de juiste schoenen met rubber- of leren zolen. Dan biedt een kunststof liniaal uitkomst. Wrijf er een paar keer stevig met een wollen doek over en houd hem vlak bij de antenne. De spoken laten van zich horen.

3 Je kunt nu de gekste dingen gaan uitproberen. Je kunt met je hand of de liniaal dichterbij de antenne komen of er wat verder van weg gaan, je kunt de spoken met een hand

,Insider-info 1

Figuur 4 is een typisch schakelschema van de elektronika. Het wordt ook wel stroomkringschema genoemd of kortweg schakeling. Zo'n afbeelding laat zien hoe de afzonderlijke onderdelen, de bouw-elementen, elektrisch met elkaar worden verbonden. Ze zijn slechts schematisch als schakelsymbolen weergegeven (vgl. het lijstje op pagina 5). In tegenstelling tot het opbouwschema (figuur 5). Daar zijn de onderdelen net zo getekend als ze er in werkelijkheid uitzien. Zodat ook beginners meteen begrijpen wat er bedoeld is.

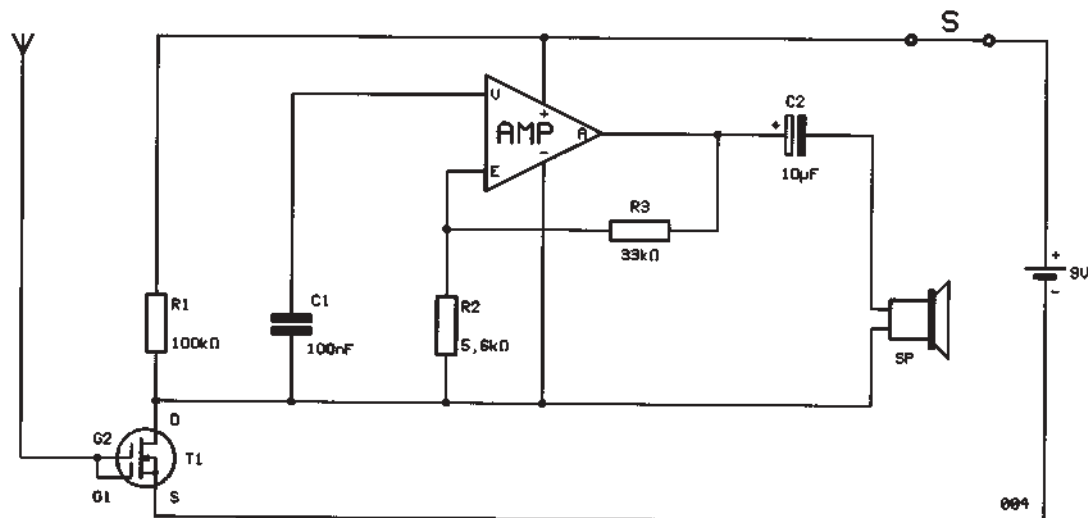
Meestal speelt zich in de schakling alles af tussen de bedrijfsspanning U_B en massa. Dat is een "verzameldraad" die naar de min-pool van de batterij loopt. Hierop hebben de spanningswaarden betrekking. De benaming ervan doet denken aan de robuuste stalen chassis van oude radio's of ook wel aan het metalen raamwerk en het motorblok van auto's.

beweging het zwijgen opleggen of ze opnieuw tekeer laten gaan. Bedenk maar een spelletje....



Figuur 3. Je kunt wel zien waar dit spook vandaan komt!

4 Wie niet naar ze wil luisteren, kan de spoken zichtbaar maken. Daarvoor bouwen we - opnieuw voorzien van de antenne - de proef op zoals aangegeven in figuur 7.



Figuur 4. Spiritus electronicus: het spook dat velden hoorbaar maakt.

Op z'n laatst bij het experiment met de liniaal zal menigeen een licht zijn opgegaan. Zou dit spook soms statische elektriciteit heten?

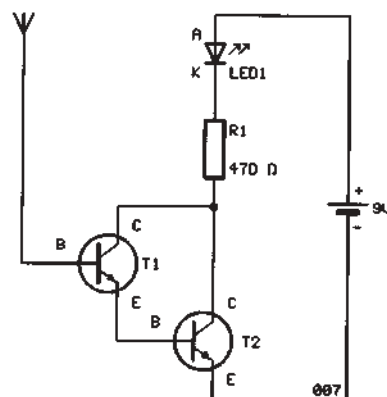
5 Om dit te controleren draaien we de waterkraan open, maar slechts zover dat er een dun straaltje uitloopt. Opnieuw wrijven we met een wollen doek over de liniaal en houden deze daarna vlak bij de waterstraal (figuur 9). Het spook dat eerder invloed uitoefende op onze elektronika buigt nu de waterstraal - de spot drijvend met alle wetten van de zwaartekracht - in zijwaartse richting af.



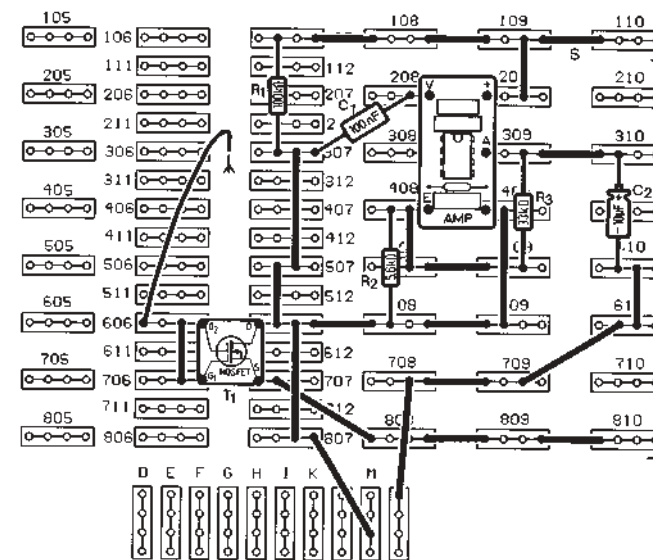
Figuur 6. Wie naarstig wrijvend werkzaam is, wekt heel wat spanning op!

Door het wrijven werden uit de wollen doek elektronen gekrabbd die vervolgens massaal op het oppervlak van de liniaal gingen zitten, gereed om de sprong door de lucht naar andere voorwerpen te wagen, of anders door hun aanwezigheid alleen al elektrisch invloed uit te oefenen. De vakman zegt dat bij een opeenhoping van ladingdragers (dat zijn bijv. elektronen) elektrische veldkrachten werkzaam zijn. En dat is precies waarvan wij ons in onze experimenten konden overtuigen.

6 Dat elektronen inderdaad kunnen springen, zal ook uit andere waarnemingen blijken. Iedereen heeft vast al

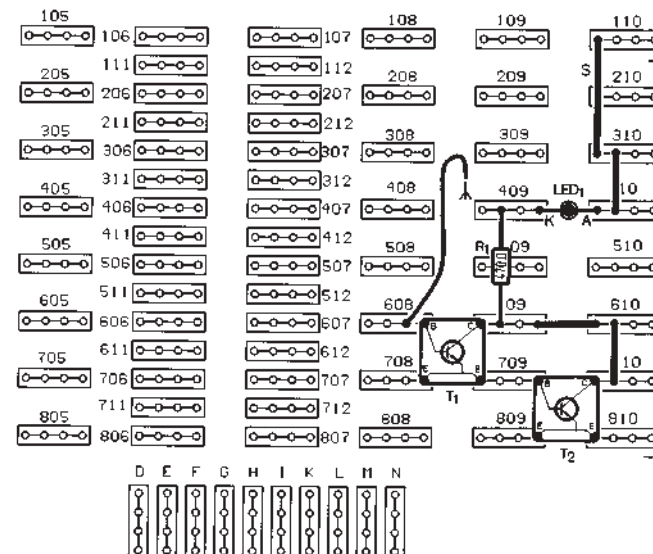


Figuur 7. Spookachtige verschijnselen: lichtsignalen uit de andere wereld.



Figuur 5. Het opbouwschema bij figuur 4.

eens gemerkt dat het knettert als je je haar kamt met een kunststof kam; misschien heb je daarbij in het donker zelfs vonken zien springen.

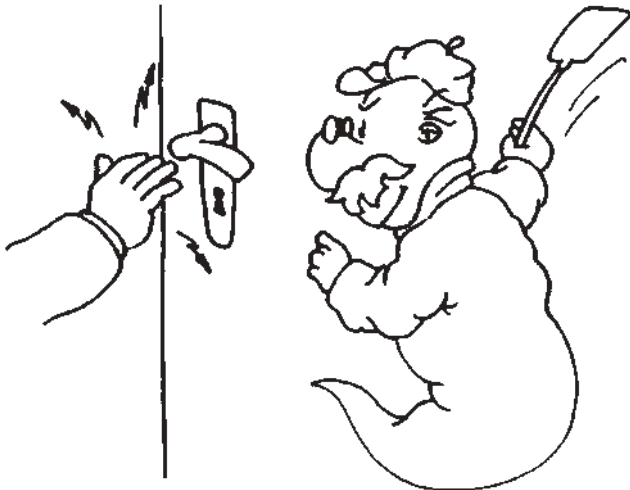


Figuur 8. Het opbouwschema bij figuur 7.



Figuur 9. Wichelroede: elektronen trekken water aan.

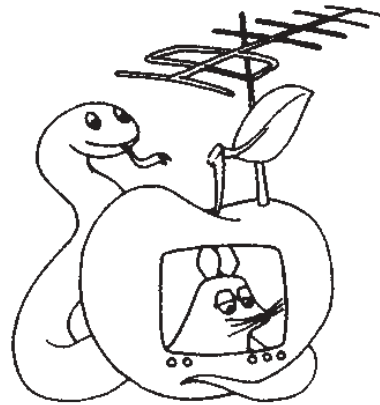
Buitengewoon onaangenaam is het soms, als je in een kamer met kunststof vloerbedekking de deurklink of een ander voorwerp van metaal aanraakt. Dan springt er een vonk over en krijg je een elektrische schok van jewelste!



Figuur 10. Het spook deelt alleen maar uit wat het door opladen heeft gekregen

2. Boven-natuurlijke elektriciteit

De effecten van de elektriciteit die we zojuist aan den lijve hebben ondervonden zijn natuurlijk niets bovennatuurlijks. Of toch - namelijk in zoverre, dat onze natuurlijke vijf zintuigen er niet op berekend zijn om elektriciteit oftewel elektrische stroom direct waar te nemen. Per slot van rekening is de mens ooit ontworpen om zijn leven door te brengen in het paradijs, zonder techniek. Maar dat is, zoals je weet, verkeerd afgelopen.



Figuur 11. Als onze zintuiglijke waarneming het laat afweten...

Elektrische stroom is een gerichte beweging van elektrische ladingdragers. De kleinste daarvan zijn de elektronen. Daarover straks meer. Bij onze eerste experimenten hebben we een opeenhoping van elektronen en daardoor zogenaamde elektrische velden opgewekt. Al gaan in een elektrisch veld onze haren duidelijk overeind staan, toch zal niemand op het dwaze idee komen om te zeggen dat onze haren dus het zintuig zijn waarmee we elektriciteit waarnemen. Het is veeleer de aantrekkende resp. afstotende werking die wij registreren. We kunnen ook andere effecten uitproberen.

7 We pakken onze batterij van 9 volt en raken met onze tong even de beide aansluitingen aan. Dat kriebelt en geeft een zure smaak. Elektriciteit is dus zuur? Nee, de zure smaak ontstaat door de werking van de elektrolyse, de scheikundige ontleding van vloeistoffen door middel van elektrische stroom.

8 We verbinden een weerstand van 150 Ω (kleuren-code: bruin-groen-bruin) met de aansluitklemmen van de batterij.



Figuur 12. Het zijn niet allen spoken, die roken!

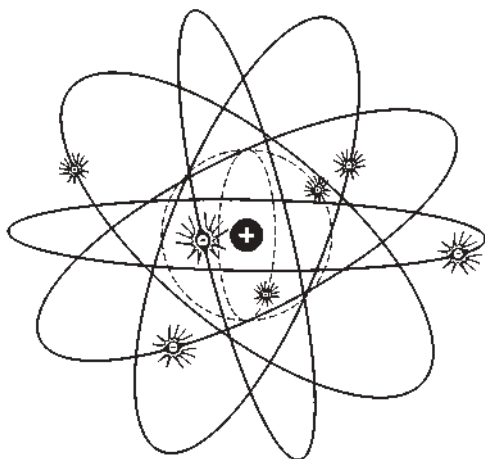
Let op! Na een poosje wordt de weerstand heet; de verbinding onmiddellijk verbreken! In de verhitting van een onderdeel hebben we dus nog een effect van elektrische stroom leren kennen. De kleine "spiraal" (spiraalgloeidraad) in gloeilampen bijvoorbeeld wordt zo heet (2000 tot 3000 $^{\circ}\text{C}$) dat hij helder begint te gloeien en licht uit- straalt.

9 We houden de aansluitpennen van de oortelefoon even tegen de beide batterijklemmen. Er klinkt duidelijk een knetterend geluid als je contact maakt en nog eens als je het contact verbreekt. Elektrische stroom produceert dus ook geluiden. Daar kun je jezelf van overtuigen, telkens als het onweert. Dan kun je trouwens op niet minder dan drie manieren elektriciteit waarnemen: als het weerlicht, ontstaat er een verblindend licht, een onbeschrijflijk grote hitte en een oorverdovend lawaai.

3. Spanning en stroom

Zoals bekend waren de oude Grieken al gefascineerd door de geheimzinnige krachten die zij opmerkten als ze over barnsteen wreven. Van het Griekse woord voor barnsteen (elektron) is ons woord elektriciteit afgeleid. Het is verbazingwekkend wat voor hoge spanningen je kunt opwekken door met een wollen doek over een geschikte isolatiestof te wrijven. En de leek begrijpt er totaal niets van, hoe het kan dat dergelijke experimenten geen gevaar opleveren voor de mens. Per slot van rekening kan een ongelukkig contact met het lichtnet van 220 volt een dodelijke afloop hebben, terwijl van de 100.000volt (!) op de kunststof kam hoogstens

je haren voor een poosje overeind gaan staan. Waar het op aan komt is, zoals meestal in het leven, wat "erachter" zit. Op de kleine kam kan weliswaar een hoge spanning ontstaan, maar er kan zich niet veel energie ophopen, ook al vliegen de vonken eraf. Na zo'n ontlading is er nauwelijks nog spanning voorradig - die is "ineen-gestort". Achter het stopcontact van 220 volt zit echter een complete krachtcentrale. Zij houdt de spanning "bikkelhard", vult zoveel stroom bij als de zekeringen aankunnen, brengt zodoende in het lichaam gevaarlijke elektrolyse-processen op gang en veroorzaakt hartfibrillatie of zelfs hartstilstand. Wat elektriciteit gevaarlijk maakt - maar ons ook in staat stelt om er nuttige dingen mee te doen - wordt door minstens twee eigenschappen bepaald: de elektrische spanning en de elektrische stroom. Over deze twee grootheden gaan we het in de volgende twee hoofdstukken hebben.



Figuur 13. Eenvoudig atoommodel: stikstofatoom met vijf elektronen op de buitenste schil.

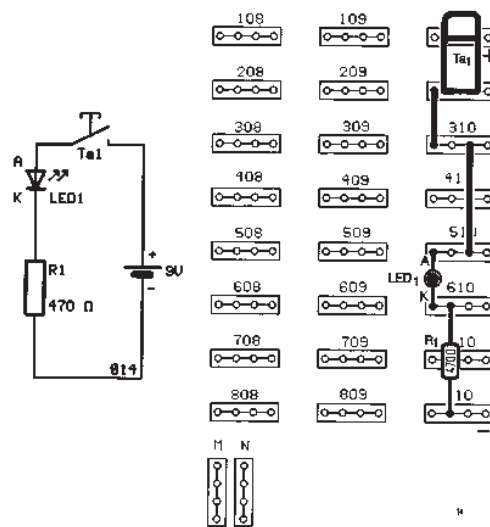
Maar eerst nog even dit voor een goed begrip: onweer is een uitzonderlijk geval. "Normaliter" wordt onze stroom in geregelde banen geleid: in draden, meestal van koper of stroken folie. Als metaal is koper een goede geleider. Metalen bestaan uit kristal-roosters. De atomen liggen netjes gerangschikt naast, boven en onder elkaar. Rond hun kernen draaien in verschillende banen de elektronen (figuur 13). De buitenste nemen het niet zo nauw met hun "trouw" aan hun atoomkern en verhuizen naar de dichtstbijzijnde of ook wel naar een wat verderop wonende atoom-buurman. In de geleiders vindt dus een beweging van elektronen plaats. En een gerichte beweging van elektronen noemt men elektrische stroom. De stuwende kracht daarvoor is de elektrische spanning. Met die stuwende kracht schiet je echter niet veel op als alle elektronen "trouw" zijn, d.w.z. als ze stevig

verankerd zijn in hun atoomverband en zodoende onbeweeglijk blijven. Stoffen met zulke eigenschappen noemt men isolatoren of niet-geleiders. Onze kunststof lineaal is er zo een. Door wrijving lukt het weliswaar zijn elektronen naar de oppervlakte te brengen, maar zij kunnen zich in het niet-geleidend materiaal niet bewegen ("afvloeien"). Als het gedrang van de elektronen aan de oppervlakte al te groot wordt, volgt er een ontlading via de lucht: elektronen als acrobaten. Naast geleiders en niet-geleiders zijn er nog de zogenaamde halfgeleiders. Dat zijn materialen die pas geleidende eigenschappen krijgen als er een zorgvuldig gedoseerd aantal atomen van een andere stof aan wordt "toegevoegd". Dit "toevoegen" heet in de vaktaal doperen en gebeurt door verhitting in een tamelijk ingewikkeld proces. Maar daarover later meer.

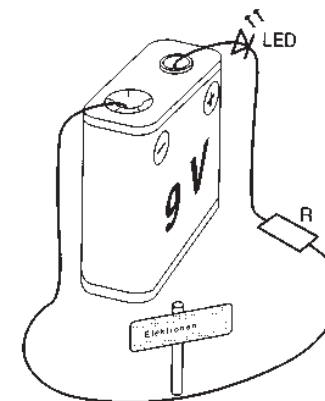
De lange tocht van de elektronen

Elektronen vloeien nooit zomaar "ergens naar toe". Het is daarom moeilijk een passende vergelijking te vinden, bijvoorbeeld de vergelijking met water. Die is hoogstens van toepassing bij een gesloten kringloop (koelwater met pomp b.v.). We spreken terecht van de stroomkring. Alleen wanneer die gesloten is, kan de stroom erin vloeien.

10 We bouwen de stroomkring op zoals aangegeven in figuur 14 en houden de licht-emitterende diode in het oog. Zolang Ta1 openstaat blijft de diode donker. Door op Ta1 te drukken wordt de kring gesloten. Nu geeft de diode licht.

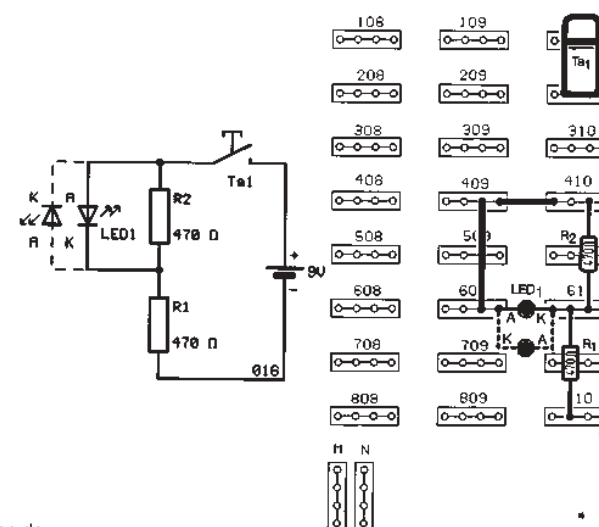


Figuur 14. Stroomstarter: pas door een druk op de toets wordt de kring gesloten.



Figuur 15. Chaos in het rondgaande (stroom)verkeer: diodes als spookrijders.

Als je een stroomkring, bestaande uit een spanningsbron en een "consument", sluit, oefent de spanning "druk" uit op de elektronen. Deze geven toe aan die druk en zetten zich in beweging. Door middel van haar polariteit bepaalt de batterij de richting van de beweging. Omdat elektronen negatieve ladingdragers zijn, gaan ze van min naar plus. Ook al werd plus vroeger als overschot gedefinieerd. De diodenpijljes getuigen van deze misvatting. We omschrijven die beschaamd met het begrip technische stroomrichting. De elektronen vloeien precies in de tegenovergestelde richting - de natuurkundige stroomrichting.

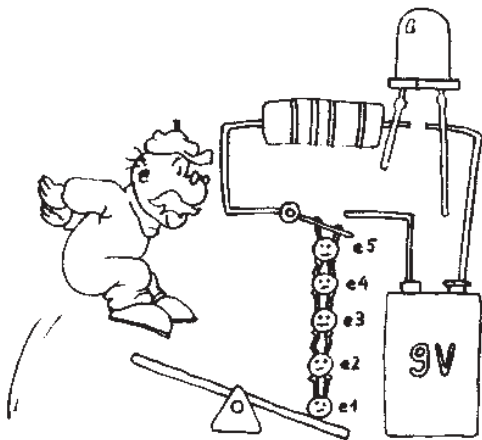


Figuur 16. Zo geeft LED 1 licht. Maar andersom?

11 We breiden onze stroomkring van figuur 14 uit met een tweede weerstand (figuur 16). De licht-emitterende diode straalt nu niet meer zo'n helder licht uit. Vervolgens sluiten we de diode andersom aan. Nu blijft ze helemaal donker. Voor diodes is de stroomrichting dus van belang.

12 We monteren de licht-emitterende diode weer zó dat ze licht geeft. Nu draaien we de onderste weerstand $R1$ om. De schakeling werkt precies zo als daarnet. Voor weerstanden maakt het dus niet uit, hoe de stroom er doorheen gaat.

13 Nu maken we een klein uitstapje naar het trappenhuis en drukken op de lichtschakelaar. Direct gaat overal het licht aan. Zijn de elektronen zo snel?



Figuur 17. De laatste knipt het licht aan!

Insider-info 2

Hoe traag elektronen zich bewegen in een koperen geleider laat het volgende voorbeeld zien. Stel, door een koperen draad met een diameter van 0,5 mm en een lengte van 60,4 mm vloeit een stroom van 1 A, dat zijn $6,25 \times 10^{18}$ elektronen per seconde. In de koperen draad met de gekozen afmetingen staan ongeveer 10^{21} vrije elektronen voor de stroom ter beschikking. De snelheid waarmee de elektronen zich in de geleider voortbewegen (de driftsnelheid) berekent men door de stroomsterkte (uitgedrukt in elektronen per seconde) te vermenigvuldigen met de lengte van de geleider en te delen door het aantal vrije elektronen. Als je wilt, mag je het uitrekenen. Voor wie te lui is om dat te doen, is hier de uitkomst: 0,378 mm per seconde. Om een indruk te geven van deze extreem lage snelheid: een elektron dat vanuit een batterij door een draad

van 10 m lengte op weg gaat naar een gloeilamp, heeft 26.455 seconden - dat is een kleine 7,5 uur oftewel bijna een normale werkdag - nodig om, na zijn weg door de draad afgelegd te hebben, eindelijk zijn bijdrage te leveren aan het schijnsel in de gloeilamp.

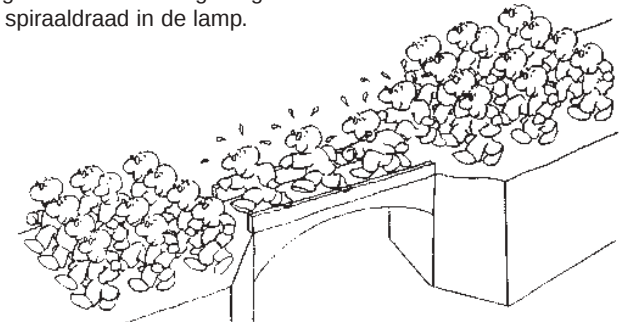
De elektromagnetische golven van radio en televisie planten zich voort met de snelheid van het licht: 300.000 km per seconde. Zijn onze elektronen in de stroomkring ook zo snel? Het afzonderlijke elektron hoeft zich niet zo te haasten. Als de spanning druk uitoefent, geeft het die druk door aan zijn buurman. Alleen die elektronen die op dat moment toevallig in de spiraalgloeidraad van de lamp zitten, moeten dan "mee aanpakken". En wel praktisch op hetzelfde ogenblik waarop wij de stroomkring in het trappenhuis gesloten hebben. Wie in het achterste uiteinde van een tube tandpasta knijpt, boekt aan de voorkant soms ook onverwacht snel resultaat - dat is de massa die vlak achter de dop reageert op de druk aan het uiteinde van de tube. Hoe groter de opening, des te meer massa komt naar buiten. Hoe groter de doorsnede van een geleider, des te meer elektronen kunnen tegelijkertijd met gemak naast elkaar bewegen, terwijl ze aan de druk van de spanning toegeven. Als op een bepaalde plaats de ruimte wat krap wordt, moet gewoon het tempo worden opgevoerd, want de stroom in de stroomkring is overal even groot. Halve doorsnede op een bepaalde plaats betekent dan dubbele driftsnelheid.

Insider-info 3

Technici houden zelden rekening met vrije elektronen. De lengte en de diameter van geleiders kan men echter gemakkelijk vaststellen. Daarbij geldt: hoe groter de diameter en hoe korter het stuk geleider, des te geringer is zijn weerstand en des te beter geleidt het. De verschillende metalen geleiden echter niet allemaal even goed. Als bij de projectie van een lange-afstandsleiding uit overwegingen van kosten of gewicht wordt gekozen voor aluminium in plaats van koper, moet men daarvoor een diameter aanhouden die bijna 1,7 keer zo groot is als voor koper. Aan elk materiaal wordt een zogenaamde soortelijke weerstand toegekend. Hij wordt meestal aangegeven voor 20 °C, omdat deze grootheid afhankelijk is van de temperatuur. Voor koper bedraagt deze weerstand gesymboliseerd door de Griekse letter rho, $0,0175 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Zilver is met een waarde van 0,0163 slechts een fractie beter, maar duurder. Aluminium scoort 0,0294 en ijzer haalt $0,13 \Omega^2/\text{m}$.

Als je rho vermenigvuldigt met het quotiënt van lengte (in m) en doorsnede (in mm^2) kun je voor elk stuk draad de weerstand bepalen. Een voorbeeld: de schakeldraad in de experimenteerdooos heeft een diameter van 0,5 mm. Dat deze draad geen concurrentie vormt voor de weerstanden laat de volgende berekening zien. Bij een lengte van 10 cm resultaat dit voor RCu in een minieme weerstand van $0,0175 \times 0,1/0,25^2 \times \pi = 0,008,92 \Omega = 8,92\text{m}\Omega$.

Hetzelfde probleem hebben de deelnemers aan een massale sportmanifestatie die in gesloten formatie bij de finish moeten aankomen. Onderweg moeten ze echter een smalle brug passeren. Dan is het zaak hard te hollen, als ze daarna weer aansluiting willen krijgen bij hun voorman. De stroomsterkte blijft gelijk, maar de brug wordt sterker belast dan het overige gedeelte van de weg. Al zal ze wel niet gaan gloeien zoals de spiraal draad in de lamp.



Figuur 18. Overal gelijke stroomsterkte. Wrijving op het smalle weggedeelte, maar de karavaan trekt (in gesloten formatie) verder.

Je kunt het aantal deelnemers per seconde vaststellen door te tellen en gebruik te maken van een stopwatch - op een willekeurige plaats langs de weg. Voor de elektrische stroomsterkte werd de eenheid ampère (A) gedefinieerd. Als symbool gebruikt men de letter I . Om in een geleider een stroom van 1 A te laten vloeien moeten zich elke seconde door elk gedeelte van die geleider 6,25 triljoen elektronen bewegen. Op de massa komt het aan. Met 16 A zijn veel huishoudens ingedekt. Daarmee kun je aan het lichtnet met 220 volt heel behoorlijk uit de voeten. Polshorloges met digitale tijdaanwijzing door middel van vloeibare kristallen zijn heel wat bescheidener. Niet meer dan pak-weg een honderd-duizendste ampère hoeft hun knooppcel van 1,5 volt te leveren om ervoor te zorgen dat wij altijd "bij de tijd" zijn. Als "10 μA " (tien microampère) is deze waarde natuurlijk gemakkelijker te lezen. Het is sinds geruime tijd gebruikelijk om het hanteren van natuurkundige grootheden te vereenvoudigen door de toepassing van voorvoegsels voor elk duizendvoud. De volgende tabel geeft een overzicht van deze voorvoegsels.

factor	macht van 10	voorvoegsel	symbool
1.000.000 (miljoen)	10^6	mega	M
1.000 (duizend)	10^3	kilo	k
0,001 (duizendste)	10^{-3}	mili	m
0,000.001 (miljoenste)	10^{-6}	micro	μ
0,000.000.001 (miljardste)	10^{-9}	nano	n
0,000.000.000.001 (biljoenste)	10^{-12}	pico	p

Symbolen van natuurkundige grootheden worden schuin (cursief schrift) en afkortingen van maateenheden rechtop (normaal schrift) geschreven. Op die manier kun je de betekenis van letters in berekeningen direct herkennen. In de volgende tabel zijn de lettersymbolen opgesomd die voor ons van belang zijn.

Natuurkundige grootheid	symbool	eenheid	afkorting
tijd	t	seconde	s
frequentie	f	hertz	Hz
spanning	U	volt	V
stroomsterkte	I	ampère	A
weerstand	R	ohm	Ω

In afwijking hiervan zijn in onze schakelschema's en opbouw schema's de aanduidingen en indicaties om technische redenen op verschillende manieren weergegeven. Zo geldt bijvoorbeeld: $R1 = R1 = R_1$; $C1 = C1 = C_1$ enz.

De kracht die elektronen vooruitduwt

Elke beweging vereist een kracht. Zelfs vallen kunnen we alleen maar omdat de zwaartekracht bestaat. De kracht die elektronen vooruitduwt wordt spanning genoemd - verkort aangeduid met het symbool U , gemeten in volt (V)

Insider-info 4

Bliksemschichten en vonken uit de kam hebben één ding gemeen: ze banen zich met geweld een weg door een niet-geleider, namelijk de lucht. Opeenhopingen van elektronen wekken elektrische velden op. Hun veldsterkte wordt berekend aan de hand van de formule $E = U / d$. U is de spanning tussen de

opeenhoping en het voorwerp waar de vonk tijdens een onweer naar toe springt (afstand: d). Bij pieken ontstaat een gedrang van veldsterketlijnen. Hoge veldsterkten leiden tot splijting van de neutrale elektronen, zodat geladen ionen ontstaan, en hup, daar springen de elektronen in de taxi die hen naar hun tegenpool brengt. Vvrrroemm. Bedenk wel: wanneer twee metalen voorwerpen tegenover elkaar staan met een afstand van 0,01 mm, veroorzaakt die spanning van een batterij van 9 volt al een veldsterkte van 900 V/mm tussen die twee voorwerpen!! Bij moderne transistoren en geïntegreerde schakelcircuits worden doorgaans nog kleinere afstanden op de chip aangehouden. Zodoende leidt een kleine spanning al tot een gevaarlijk hoge veldsterkte.

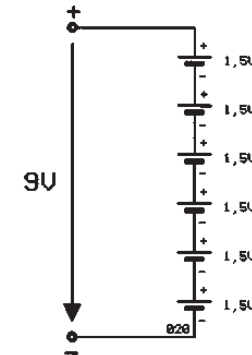
Spanning wordt door middel van generatoren in de krachtcentrale opgewekt of door scheikundige werking in batterijen. Als het niet gelijk 100.000 V zijn, die weleens via de lucht gecompenseerd kunnen worden, dan blijven de elektronen daarbij netjes opgesloten in een draad. Een batterij kan dus, zuiver "elektrisch" beschouwd, niet "leeglopen". Daar is een volgens de regels gesloten stroomkring voor nodig.

14

We bouwen weer een stroomkring op volgens de aanwijzingen in figuur 14. Vergeet de druktoets niet! Zolang deze open blijft staan, gebeurt er niets. De aanliggende spanning wordt pas effectief als we op Ta1 drukken: de licht-emitterende diode laat zien dat er nu stroom vloeit. Voor de levering van energie aan de huishoudens hebben de Europese landen gekozen voor 220 V (op het ogenblik is men bezig met de overschakeling op 230 V). Alle apparaten en machines met netvoeding zijn daarop afgestemd. Buiten dit energienet gaat het er veel vrijer toe. Je moet dus wel oppassen: welke spanning moeten de batterijen voor je walkman hebben, wat is het juiste voltage voor je zak-rekenmachientje? Ooit werd door het gebruik van het galvanisch element van zink en koolstof de onderste grens vastgesteld op 1,5 V. De loodaccumulatoren van onze auto's bestaan uit zes cellen van 2 V, aaneengeschakeld tot 12 V. Moderne lithium-batterijen leveren ongeveer 3 V per cel. De experimenten die wij met onze bouwdoos uit- voeren zijn berekend op een nominale spanning van 9 V. Die halen we uit een batterij. Daarin zijn zes elementen



Figuur 19. Een energieblok van 9 V, door de deskundige geopend en gefotografeerd: zes platte cellen in serie.



Figuur 20. Zo zien technici een batterij van 9 V.

van 1,5 V in serie geschakeld. Dat wil zeggen, dat de plus-pool van het eerste element tegen de min-pool van het volgende element aan ligt enz. (figuur 19). Door deze serieschakeling worden de afzonderlijke spanningen opgeteld (figuur 20).

Batterijen zijn verbruiksartikelen. Als ze leeg zijn ruimen we ze milieuvriendelijk op - door ze bij de verkoper van batterijen in de verzamelbak te deponeren.



Figuur 21. De milieugeengel waarschuwt ook tegen onzorgvuldige omgang met lege batterijen.

Stopcontacten ("wandcontactdozen") worden niet weggegooid. Krachtcentrales wekken steeds weer nieuwe energie op. 220 V kan zonder gevaar worden omgezet in 9 V. Bijvoorbeeld door middel van de KOSMOS-nettransformatorX - precies geschikt voor iedereen die niet meer van de elektronika kan afblijven...

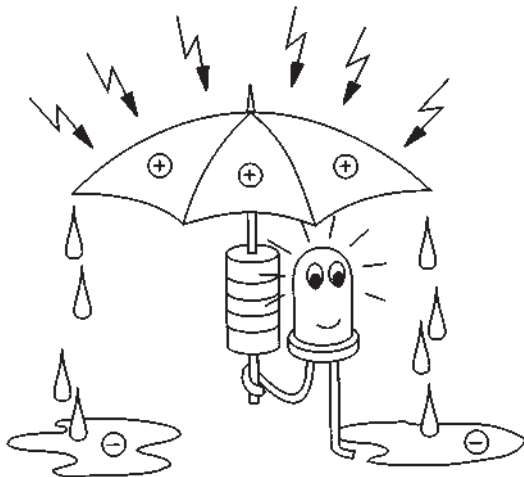
Prestatiemaatschappij

Wij zijn dus allemaal "stroomverbruikers". Intussen weten we, dat de stroom van de elektronen niet kan vloeien zonder spanning. De prestaties van de stroom - van het licht uit de gloeilamp tot de krachttoer van de motor van de wasautomaat - zijn het gevolg van de saamhorigheid van stroom en spanning. Niet zoals bij de vonken schietende kam: veel spanning, maar nauwelijks stroom. Waar het op aankomt, is het vermogen - het produkt van spanning en stroom, dus $P = U \times I$. Er kunnen evenwel pas prestaties worden geleverd als het *vermogen* gedurende een bepaalde tijd actief is.

En dat karweitje knapt de elektro-energie voor ons op. Onvermoeibaar, zolang als we willen (en het kunnen betalen). Daarom is een onweer ongeschikt als energieleverancier: het levert weliswaar veel spanning en tijdens de ontlading in de bliksem ook hoge stroom, maar slechts voor een fractie van een seconde.

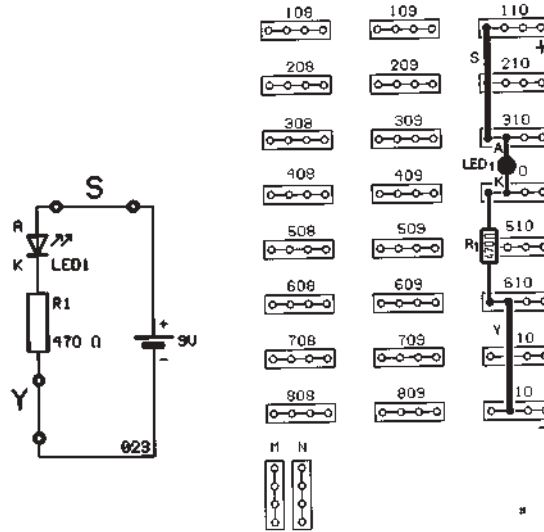
4. Weerstand ter voorkoming van catastrofes

Na al die droge theoretische kost gaan we weer over tot de praktijk. Experimenten staan op het menu. Onze "proefkonijnen" zijn die kleine gekleurde worstjes die weerstanden worden genoemd. Zij worden in schakelschema's en formules aangeduid met het symbool R . Hun eenheid is het ohm (symbool: Ω). Een weerstand met een waarde van 150Ω hadden we eerder voor verwarmingsdoeleinden gebruikt in experiment 8. Dat was al een demonstratie van vermogen: elektrisch vermogen werd (door de wrijving van de elektronen in de weerstand) omgezet in warmte. Een ander doel waarvoor weerstanden worden gebruikt leren we in de volgende experimenten kennen: ze zijn onontbeerlijk voor de beveiliging van licht-emitterende diodes. Wat er zo bijzonder is aan de structuur van een diode dat ze niet zonder bescherming mag worden blootgesteld aan een spanning, wordt in hoofdstuk 7 nader verklaard. Maar wat we nu al kunnen verklappen, is het volgende: een licht-emitterende diode (of kortweg LED) heeft om licht te kunnen uitstralen maar een paar milliampere nodig en bovendien een spanning van minder dan 2 V. Een batterij met $U = 9 \text{ V}$ heeft dus 7 V meer dan bevorderlijk is voor de licht-emitterende diode. Wat doen we met de rest?



Figuur 22. Beveiliging: in plaats van de doodsteek voor de licht-emitterende diode een spanningsval over de weerstand.

15 We bouwen de stroomkring op zoals aangegeven in figuur 23. De waarde van de weerstand bedraagt 470Ω (geel-paars-bruin). Aan de licht-emitterende diode ligt niet meer dan 2 V (dat zou je met een voltmeter kunnen meten). weerstand heeft als een spanningsdief 7 V ingepikt.



Figuur 23. Verandering in een eenvoudige stroomkring: de waarden zijn beslissend, de volgorde doet er niet toe.

De spanning die over de licht-emitterende diode "staat" wordt LED-spanning genoemd. Zoveel spanning heeft ze namelijk nodig om de stroom aan het vloeien te krijgen. Als je ze echter rechtstreeks op de batterij aansluit, loop je de kans dat ze het niet overleeft! **Gebruik licht-emitterende diodes daarom altijd samen met een beveiligingsweerstand!**

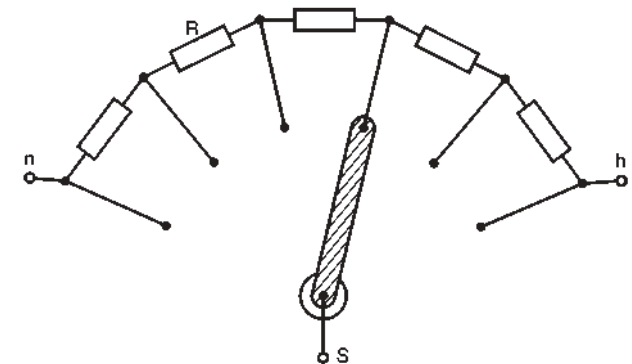
16 We verwisselen de volgorde van licht-emitterende diode en weerstand en stellen vast: de volgorde in de stroomkring speelt geen rol. Het is echter wel van belang, dat de licht-emitterende diode in de "vloeirichting" van de stroom wordt gepoold: het langste pootje is de pluskant (anode). Het pijltjes-symbool wijst in de richting van de afgeplatte kant (kathode). Daarover later meer. Houd je altijd precies aan de opbouw-schema's!

17 We nemen weerstanden met hogere waarden voor onze schakeling en letten op wat er gebeurt (bijv. $1 \text{ k}\Omega$: bruin-zwart-rood, $5,6 \text{ k}\Omega$: groen-blauw-rood, $10 \text{ k}\Omega$: bruin-zwart-oranje, $15 \text{ k}\Omega$: bruin-groen-oranje, $33 \text{ k}\Omega$: oranje-oranje-oranje).

18 We monteren opnieuw de weerstand van 470Ω , maar trekken dit keer de lange draadbrug Y eruit en vervangen die door de tweede weerstand van 470Ω . We stellen vast: hoe hoger de weerstand is in de stroomkring, des te zwakker is het licht dat de licht-emitterende diode uitstraalt. Voordat we ons gaan bezighouden met de wetmatigheden van deze werking, eerst even iets over een kleine slordigheid in het taalgebruik. Eigenlijk heeft het woord weerstand in de elektronica twee be-tekenissen. Enerzijds wordt het gebruikt om een eigenschap van een geleidend materiaal ten opzichte van de elektrische stroom aan te geven: het materiaal biedt een zekere weerstand tegen de elektrische stroom die in een getalswaarde uitgedrukt en als zodanig in berekeningen toegepast kan worden. Aan de andere kant is het de benaming voor elektrische bouwelementen van de meest uiteenlopende vorm.

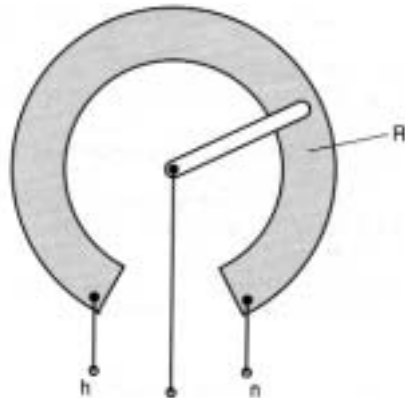
Laat honderd bloemen bloeien!

Met weerstanden hebben we in de elektronica voortdurend te maken. En stellig het meest met die "gekleurde worstjes" waar we het al over gehad hebben: een laagje koolstof of metaal, op keramiek gebrand en beschermd met een laagje lak. Zolang ze in de schakeling niet bruin worden of zelfs gaan roken, zijn ze correct aangebracht. Als er echter met een grotere stroomsterkte en spanning (vermogen!) wordt gewerkt, is er meer oppervlakte en warmtevast materiaal nodig. In dat geval is weerstandsdraad, die op keramische buisjes wordt gewikkeld en eventueel van een deklaag wordt voorzien, een geschikt middel. Deze weerstanden hebben het graag warm zonder dat ze bezwijken. Met behulp van weerstanden kun je spanningen "delen"; uit 9 V kun je dus bijvoorbeeld $2 \times 4,5 \text{ V}$ halen. Met een aantal weerstanden in serie geschakeld en een aftak-schakelaar die contact maakt met de verbindingpunten, krijg je dan een spanningsdeler die je (meer of minder nauwkeurig) kunt instellen (figuur 24).



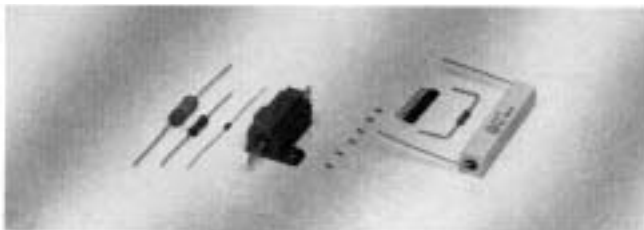
Figuur 24. Spanningsdeler met vaste weerstanden: hiermee kun je alleen trapsgewijs omschakelen.

Je kunt echter beter in de winkel een kant-en-klaar-product kopen waarmee je elke tussenliggende waarde kunt instellen. Zo'n onderdeel heet een potentiometer. De technicus die graag iets kort en krachtig onder woorden brengt, spreekt van een potmeter. Ook die heb je in allerlei types, met een koollaag (figuur 25) of met draad, met een as voor een draairegelaar of met een spleet voor de schroevendraaier. Of in de vorm van een schuif-regelaar zoals je ze in de discotheek aantreft. Wat ze allemaal gemeen hebben is de looper. Daarom hebben potmeters (minstens) drie aansluitingen.



Figuur 25. Spanningsdeling door middel van de potentiometer: elke tussenliggende waarde is instelbaar.

Figuur 26 laat een kleine verzameling vaste en instelbare weerstanden zien die in de praktijk worden gebruikt.

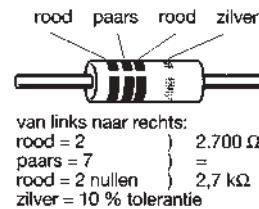


Figuur 26. Een grote verscheidenheid onder een vlag: voor (vrijwel) elk geval een weerstand.

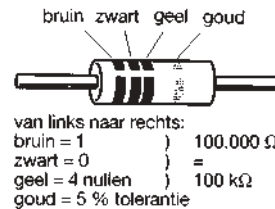
Kleuren in zicht

De op het bouwonderdeel aangegeven weerstandswaarde geeft uitsluitsel over de eigenschappen ervan. Bij grotere types vaak door middel van een getal, bij de overige in de vorm van gekleurde ringen. Die kun je namelijk altijd zien ongeacht de positie van het onderdeel in de schakeling. En om het de fabrikanten niet te

moeilijk te maken bestaat er een zekere "tolerantie" met betrekking tot de nominale waarde. De werkelijke waarde mag wel enkele procenten afwijken van de op het onderdeel aangegeven waarde, al naar gelang het assortiment. De toegestane tolerantie is trouwens ook aangegeven in de vorm van een gekleurde ring. In figuur 27 en 28 vind je enkele voorbeelden, terwijl de in figuur 29 weergegeven tabel een handig hulpmiddel is om je deze belangrijke code in te prenten. Het is tenslotte niet handig als je die telkens moet gaan opzoeken.



Figuur 27. Zo wordt een weerstand "gedecodeerd".



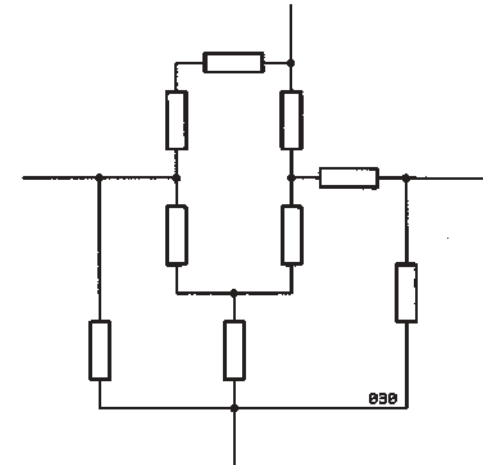
Figuur 28. Dat is duidelijk: dit is een weerstand van 100 kΩ met een tolerantie van 5 %.

kleur	1e ring (1e cijfer)	2e ring (2e cijfer)	3e ring (aantal nullen)	4e ring (tolerantie)
zwart	0	0	-	
bruin	1	1	0	±1%
rood	2	2	00	±2%
oranje	3	3	000	
geel	4	4	0 000	
groen	5	5	00 000	
blauw	6	6	000 000	
paars	7	7		
grijs	8	8		
wit	9	9		
goud			x 0,1	±5%
zilver			x 0,01	±10%
zonder ring				±20%

Figuur 29. Kleurdiode

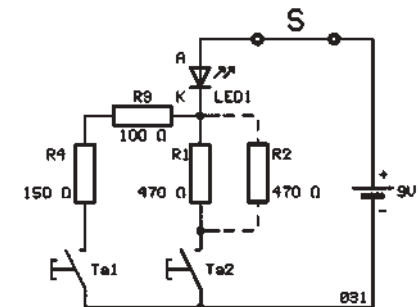
Serie en parallel

Met slechts een paar weerstanden kun je heel wat waarden samenstellen. Hoe dat in z'n werk gaat, zullen we eens even onderzoeken.



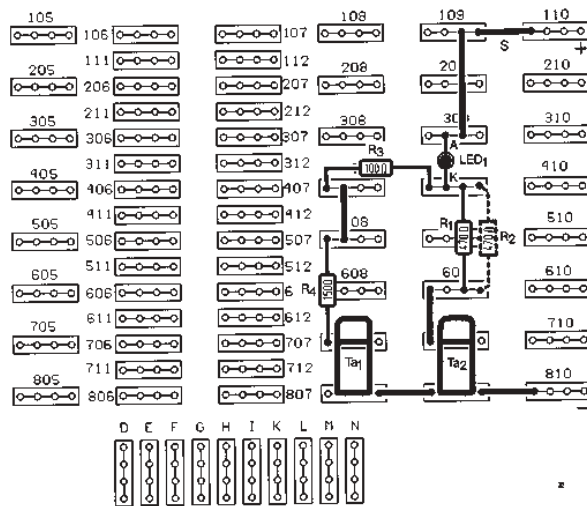
Figuur 30. Netwerken van weerstanden: knopen en mazen - Kirchhoff & Ohm proberen je in verwarring te brengen.

19 We bereiden een vergelijking voor zoals aangegeven in figuur 31, maar voorlopig nog zonder R_2 . Nu drukken we op Ta_1 en "onthouden" de lichtsterkte van de licht-emitterende diode. Vervolgens drukken we op Ta_2 . De diode zal nu aanzienlijk minder licht geven.



Figuur 31. $R_3 + R_4 \approx R_1 || R_2$ (spreek uit: "parallel"): proef met combinatie van weerstanden in serie en parallel.

20 Nu monteren we R_2 parallel aan R_1 en herhalen de proef. De diode geeft nu in beide gevallen ongeveer evenveel licht.



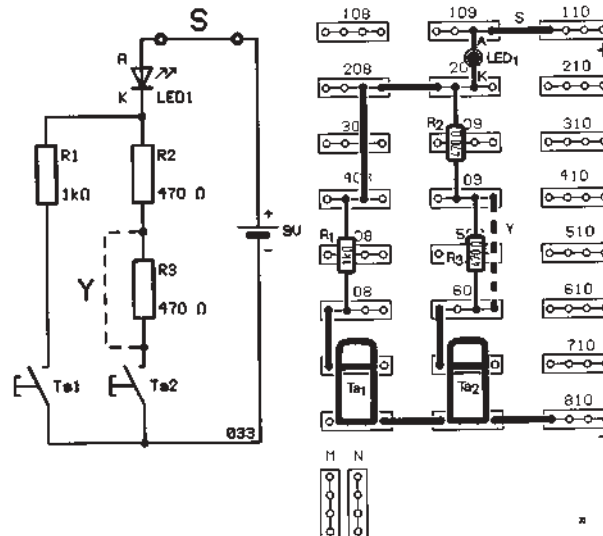
Figuur 32. Het opbouwschema bij figuur 31.

We stellen vast: de parallelschakeling van twee weerstanden van $470\ \Omega$ levert ongeveer hetzelfde resultaat op als een serieschakeling van $100\ \Omega$ en $150\ \Omega$. Dat is nog een beetje onoverzichtelijk.

21 We gaan daarom het experiment opzetten zoals aangegeven in figuur 33. Eerst wordt R_3 overbrugd. Door afwisselend op Ta_1 en Ta_2 te drukken kunnen we de lichtintensiteit van de licht-emitterende diode vergelijken. De intensiteit zal bij Ta_2 groter zijn dan bij Ta_1 .

22 We verwijderen brug Y en herhalen de proef.

We stellen vast: de serieschakeling van twee weerstanden van $470\ \Omega$ levert ongeveer hetzelfde resultaat op als een weerstand van $1\ k\Omega$. Evaluatie: in figuur 31 levert de serieschakeling $R_3 + R_4 = 100\ \Omega + 150\ \Omega$ een totale waarde op van $250\ \Omega$. Dat is bijna hetzelfde resultaat als bij de parallelschakeling van R_1 en R_2 (elk $470\ \Omega$). Het resultaat van deze parallelschakeling bedraagt $235\ \Omega$. De verklaring van dit "mysterie": bij serieschakeling neemt de totale weerstand toe, bij parallelschakeling wordt hij kleiner. De (rekenkundige) reciproke (d.i. de omgekeerde waarde) van een weerstand wordt geleidingsvermogen genoemd. Bij een parallelschakeling wordt het geleidingsvermogen opgeteld. Dat wordt eenvoudig als volgt berekend: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$. Als er maar twee weerstanden zijn, kun je ook schrijven $R = (R_1 \times R_2)/(R_1 + R_2)$. Gebruik bij je berekeningen wel altijd dezelfde machten van tien, of liefst "zuivere" maateenheden: bij voorkeur $1 \times 10^3\ \Omega$ i.p.v. $1\ k\Omega$.



Figuur 33. Met brug zorgt Ta_2 voor een grotere lichtintensiteit - zonder brug levert Ta_1 hetzelfde resultaat als Ta_2 , immers $R_1 = R_2 + R_3$

Anders zou het resultaat van je berekeningen wel eens een lelijke misrekening kunnen zijn!



Figuur 34. Drie keer een stap in de goede richting...

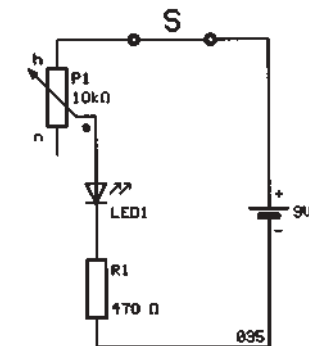
5. Spanning, stroom en weerstand - de wet van Ohm

Mensen stellen wetten op om de samenleving in goede banen te leiden. Dat er in de natuur orde heerst, daarvoor zorgen de natuurwetten. De mens hoefde die "alleen maar" te ontsluiten en in formules vast te leggen. Daarnet waren wij een goed eind op weg om dit voor de elektrische stroomkring te doen. Maar Georg Simon Ohm was ons te vlug af - hij heeft dat al in 1827 gedaan.

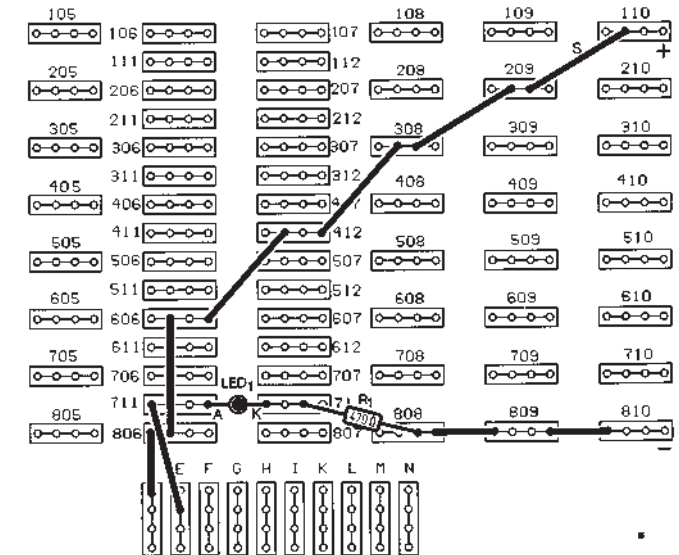
De weg naar Ohm

Vele wegen leiden naar Ohm. Dat zullen we dadelijk zien.

23 Zoals aangegeven in figuur 35 begeven we ons met de potentiometer van $10\ k\Omega$, een weerstand van $470\ \Omega$ (ter voorkoming van catastrofes) en met een licht-emitterende diode op weg naar Ohm. Daarvoor draaien we aan de potmeter.



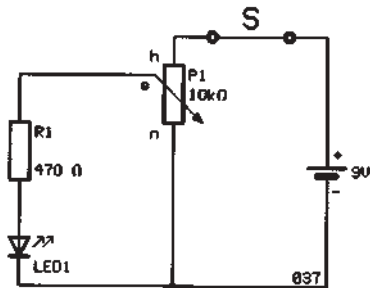
Figuur 35. Potmeter als "elastische" weerstand: hoe meer R , des te minder I .



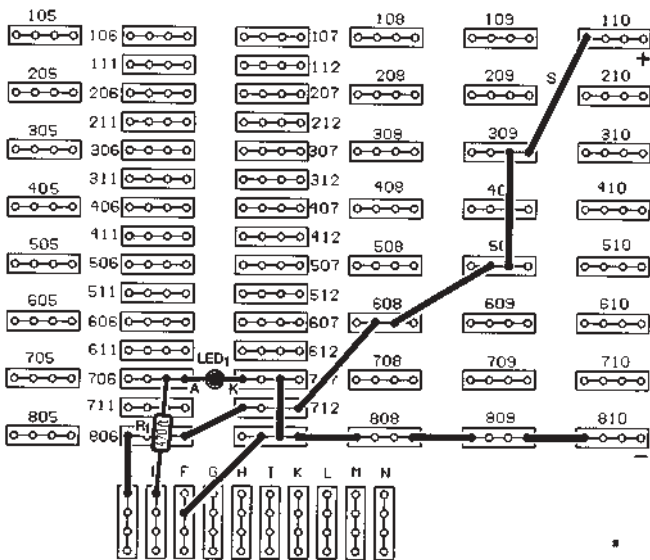
Figuur 36. Het opbouwschema bij figuur 35.

We stellen vast: hoe meer weerstand er tussen looper en vaste aansluiting is geschakeld, des te geringer is de lichtintensiteit van de diode. Omdat onze bedrijfsspanning U_B constant is, betekent dat: hoe meer weerstand, des te minder stroom (die ervoor zorgt dat de diode licht geeft).

24 We promoveren de potmeter tot spanningsdeler door de nog vrije aansluiting te verbinden met de min-pool van de batterij (figuur 37). De looper takt nu in de richting van de min-pool steeds minder spanning van U_B af. Opnieuw wordt de licht-emitterende diode dan steeds donkerder.



Figuur 37. Vrije keuze van O tot U_B : de afgetakte spanning U bepaalt de stroom I

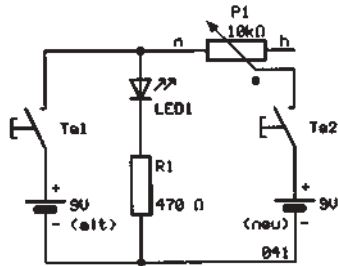


Ongreijbare weerstand

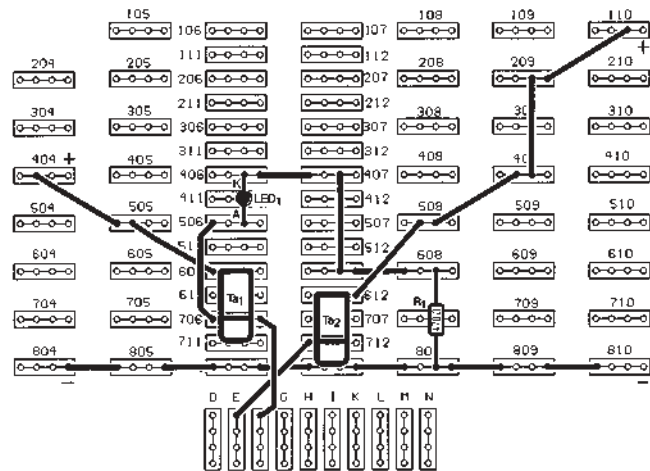
Net als je denkt dat het je nou allemaal duidelijk is, duiken er nieuwe problemen op.

25

We nemen een al wat oudere batterij van 9 V en sluiten deze aan op onze stroomkring met licht-emitterende diode en weerstand van 470 Ω. We letten op de lichtintensiteit van de diode. Dan vervangen we de batterij door een nog niet eerder gebruikte. Of beter: we monteren ze allebei tegelijkertijd zoals aangegeven in figuur 41. De potmeter wordt eerst zo ingesteld dat zijn weerstand niet in de stroomkring ligt (loper tegen de aanslag links in beeld).



Figuur 41. Bij gelijke lichtintensiteit zowel met Ta1 als met Ta2: de ingestelde (deel-)waarde van P1 zit onzichtbaar verborgen in de oude batterij.

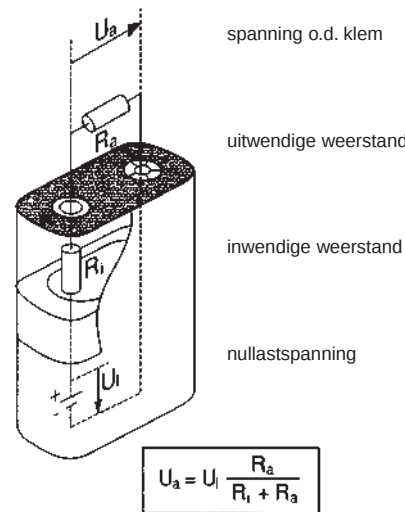


Figuur 42. Het opbouwschema bij figuur 41.

We stellen vast: de licht-emitterende diode geeft met de nog niet eerder gebruikte batterij een wezenlijk helderder licht dan met de oude - ondanks het feit dat op beide batterijen dezelfde spanning staat aangegeven (9 V)!

26

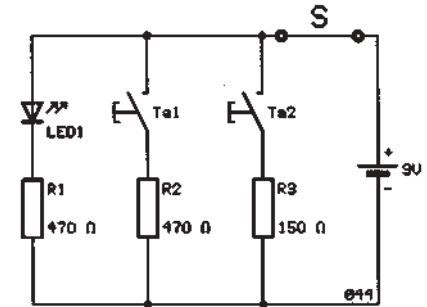
We draaien nu net zo lang aan de potmeter, totdat de licht-emitterende diode met de nog niet eerder gebruikte batterij "op net zo'n laag pitje" licht geeft als met de oude. Conclusie: in de oude batterij moet een of andere weerstand verborgen zitten, waarvan de waarde overeenkomt met die van het ingestelde gedeelte van onze potmeter. Deze onzichtbare weerstand zorgt voor een effectieve stroombegrenzing. Hij blijft ook onzichtbaar als je de batterij openmaakt. Deze weerstand is namelijk slechts het resultaat van de uitgeputte batterij, m.a.w. iets "scheikundigs" - 't is maar om je er een idee van te geven.



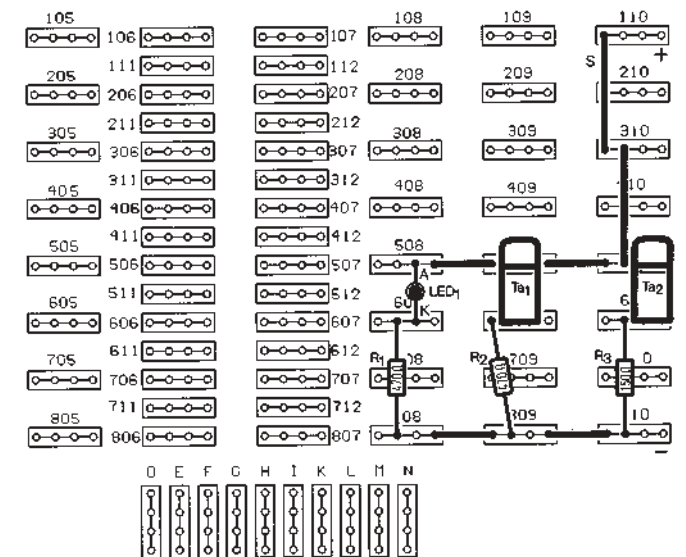
Figuur 43. Insiders houden ook rekening met fantomen!

27

Volgens de aanwijzingen in figuur 44 gaan we nu iets nuttigs bouwen - een testinstallatie voor batterijen van 9 V vrij naar McGyver: met de eenvoudigste technische middelen het beste resultaat behalen! Als nu de licht-emitterende diode amper nog licht geeft, zodra de te testen batterij is aangesloten, kun je deze batterij gevoeglijk bij het chemisch afval deponeren. Ook als de diode wel licht geeft, maar bij het sluiten van Ta1 aanzienlijk donkerder wordt, is het met de batterij afgelopen. De test met Ta2 tenslotte doorstaan alleen nog niet eerder gebruikte batterijen zonder dat de lichtintensiteit al te sterk afneemt.



Figuur 44. Zuinige oplossing à la McGyver voor een testschakeling voor batterijen: als LED1 ook met Ta2 licht geeft, is de batterij nog niet gebruikt. Als ze alleen nog maar bij geopende toetsen licht geeft, gaat de batterij niet lang meer mee



Figuur 45. Het opbouwschema bij figuur 44.

Elke spanningsbron heeft een *inwendige weerstand*. Deze wordt meestal aangeduid met R_i . Bij batterijen neemt hij toe naarmate deze ouder zijn en verder uitgeput raken. In het stopcontact is hij echter klein, heel klein - altijd. Ook met accumulatoren moet je uitkijken. Opgeladen accu's en moderne alkali-mangaan-batterijen hebben eveneens een heel kleine R_i . **Let op: hoe kleiner R_i , des te groter een eventuele kortsluitstroom!** Het is niet voor niets dat we bij onze schakelingen gebruik maken van de kleine batterij van 9 V.

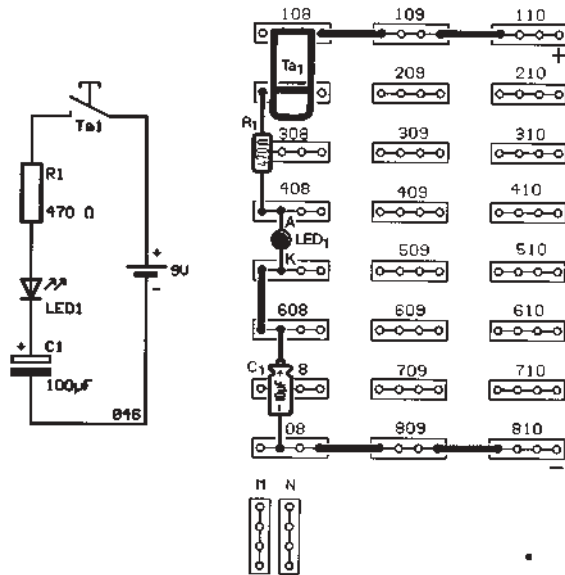
6. Condensator: een opslagplaats voor elektronen

Spanning, stroom, weerstand - in de stroomkring funktioneerde tenslotte alles zoals het hoort. Duidelijkheid dankzij Ohm. Maar al gauw gebeuren er weer rare dingen. Dat is te wijten aan een nieuw onderdeel in de stroomkring - een condensator.

Stroom in kleine hoeveelheden

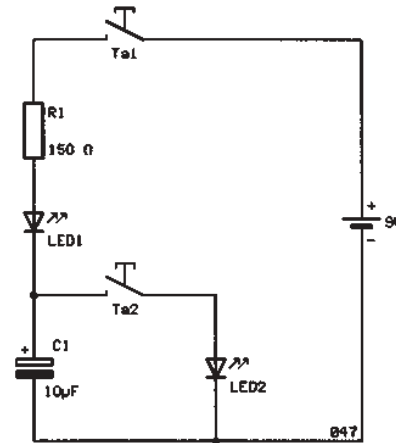
Het woord condensator zou je kunnen vertalen met "ophoper". Wat wordt erin opgehoopt?

28 In de stroomkring voegen we een condensator in zoals aangegeven in figuur 46 en drukken op de toets. Wat doet de licht-emitterende diode? Hoewel we netjes op de toets blijven drukken, licht de diode maar heel eventjes op. En ook opnieuw op de toets drukken helpt niet. Zou hier soms weer een spook een spaak in het wiel gestoken hebben?

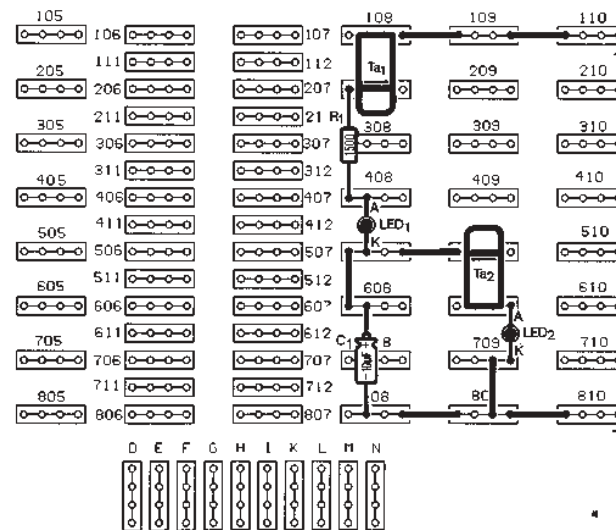


Figuur 46. Stroom raakt in het stop: LED1 gaat slechts even licht geven bij de eerste druk op de toets.

29 Door de schakeling uit te breiden zoals aangegeven in figuur 47 komen we al een stapje dicht bij de oplossing. We drukken nog een keer op Ta1. Het is mogelijk dat de diode dan weer even oplicht, maar noodzakelijk is dat niet. Ta1 blijft nu open staan. In plaats daarvan drukken we vervolgens op Ta2. Hoe reageert de licht-emitterende diode LED2 hierop? We stellen vast: in de stroomkring, bestaande uit C1, Ta2 en



Figuur 47. Uitweg via Ta2: de condensator C1 geeft zijn lading af aan LED2 en kan via Ta1 weer worden opgeladen.



Figuur 48. Het opbouwschema bij figuur 47.

LED2, staat de batterij "buitenspel". Toch licht LED2 even op als je op Ta2 drukt. Dat spelletje kun je zelfs zo vaak herhalen als je wilt: als je op Ta1 drukt, licht LED1 even op; druk je vervolgens op Ta2 dan geeft LED2 een ogenblik lang licht enz. Via Ta1 "pompen" we met behulp van de batterij blijkbaar elektronen in de condensator - om precies te zijn vanuit de min-pool. Deze elektronen hopen zich op en vullen als het ware een "emmer". Wat vanuit de andere aansluiting van de condensator terugvloeit

naar de (plus-pool van de) batterij, zijn elektronen die uit de condensator naar buiten worden gedrukt. Zodra de emmer vol is, wordt deze afvloeiing onderbroken. De condensator funktioneer nu dus tijdelijk als batterij met een spanning(sval) van ongeveer 7 V. Dat is het verschil tussen de batterijspanning en de LED-spanning (minder dan 2 V, vergelijk hoofdstuk 4). De condensator is dus een klein reservoir, al is er maar weinig energie in opgeslagen. Daarom komt LED1 ook zonder beveiligingsweerstand niet in gevaar. Als je op Ta2 drukt, wordt C1 ontladen tot aan de LED-spanning. Dan straalt de LED ook geen licht meer uit. C1 kan echter te allen tijde via Ta1 opnieuw worden opgeladen.

vlakken op afstand gehouden

Een condensator bestaat in het eenvoudigste geval uit twee metalen platen die op een bepaalde afstand tegenover elkaar worden geplaatst en geen geleidende verbinding met elkaar hebben; ze zijn dus van elkaar gelsoldeerd. In de praktijk van de techniek wordt echter geen gebruik gemaakt van platen maar van flinterdunne, gemetalliseerde folies, gescheiden door een net zo dunne isolatiefolie. De isolatielaag tussen de condensatorplaten wordt dielectricum genoemd. Hoe groter het oppervlak van de metaalfolie en hoe dunner de isolatielaag, des te groter is de capaciteit van de condensator. Deze wordt aangeduid met het symbool C en uitgedrukt in de eenheid farad, afgekort F. De batterij in de stroomkring transporteert elektronen naar de minpool van de condensator, en wel zoveel als er daar op kunnen. Ze zitten alleen aan de oppervlakte en daarom kan men volstaan met een zeer dunne folie. Om ruimte te besparen worden de stroken trouwens vaak opgerold. Hoe meer druk (spanning) er op de condensator wordt uitgeoefend, des te meer elektronen neemt hij op. De spanning dringt via het elektrisch veld door de tussenliggende isolator heen en komt dan op de andere metaalstrook. Daarvandaan slaan net zoveel elektronen op de vlucht in de richting van de plus-pool als er aan de min-pool aankomen. Het geval van het elektrisch veld heeft veel weg van de situatie "wolk tegen kerktoren" tijdens een onweer. Alleen zou in dit geval door de klap de condensator worden vernietigd. Daarom staat - al dan niet gecodeerd - op de condensator de maximaal toelaatbare spanning aangegeven.

Insider-info 6

Het elektrisch veld werkt ook in het vacuüm. Het niets volstaat dus als isolator tussen de condensatorplaten. Met lucht gaat het ook. De capaciteit wordt berekend met de formule $C = \epsilon_0 \cdot S/d$. Hierbij is S de oppervlakte (maar één kant berekenen!) en d geeft de afstand aan. Om de eenheid farad te verkrijgen heb je voor de condensator in het vacuüm nog de elektrische veldconstante ϵ_0 (de Griekse kleine letter epsilon)

nodig. Die bedraagt $8,859 \times 10^{-14} \text{ As/Vcm}$. Farad werd gedefinieerd als de capaciteit waarbij een stroom van 1 A in 1 s tot een spanningsverandering van 1 V over de condensator leidt. De ampèreseconde is de maat voor de lading, symbool Q. Voorbeeld: de afstand tussen twee veercontacten op ons experimenteerpaneel bedraagt in veel gevallen niet meer dan ongeveer 0,25 cm. Hun gezamenlijk oppervlak bedraagt ongeveer $1,7 \text{ cm}^2$. Zodoende zou de capaciteit van een dergelijk paar veercontracten in het vacuüm (en praktisch ook in de lucht) $C = 8,859 \times 10^{-14} \times 1,7/0,25 = 0,6 \times 10^{-12} \text{ F} = 0,6 \text{ pF}$ bedragen. Vanwege de kunsstof stijgt de capaciteit tot ongeveer 2 pF. Want effectiever dan vacuüm of lucht zijn vaste isolatoren. Hoeveel de capaciteit bij dergelijke stoffen stijgt vertelt ons de *relative diëlektrische constante* ϵ_r . Dit is een zuivere getalswaarde, die bij gebruikelijke isolatoren (papier, glas, keramiek, mica) ergens tussen 3 en 6 ligt. Aanzienlijk gunstiger is aluminiumoxyde. Dit ontstaat in elco's zoals we ze ook bij onze proeven gebruiken. De prijs voor het kleine formaat: een lekstroom die de lading min of meer snel doet "ontsnappen".

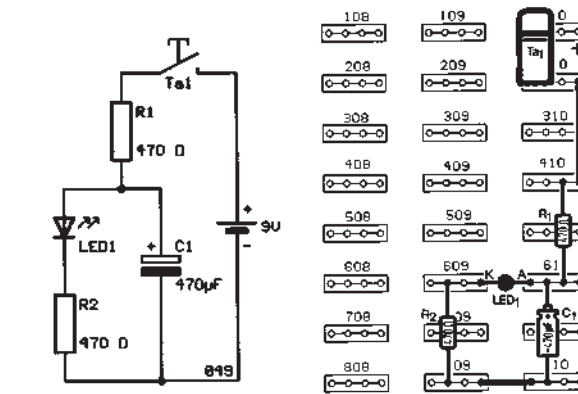
Geleidelijke overgangen

De grootste condensator in onze experimenteerdoos heeft een waarde van $470 \mu\text{F}$ (microfarad), dat is $0,47 \text{ mF}$ (millifarad) of $0,00047 \text{ F}$ (vgl. de tabel op pagina 6). Dat is voor de miniscule elektronen al een behoorlijk grote "emmer". Bij 9 V kan hij heel wat elektronen aan. Zo'n grote capaciteit hebben alleen elektrolytische condensatoren oftewel *elco's* (vgl. insider-info 6). Als we deze aansluiten, moeten we op de juiste polariteit letten, zoals die is aangegeven in het schema. De plus-kant wordt aangegeven door een groef rond de hele behuizing. De min-pool bevindt zich op de behuizing. Bij het rechtop staande type van $470 \mu\text{F}$ is de plusdraad langer dan de mindraad. De behuizingen zijn ook voorzien van een opschrift.

30 We bouwen het experiment op zoals aangegeven in figuur 49, maar laten de condensator voorlopig nog even weg. Als we op de toets drukken, reageert LED1 zoals bekend: ze blijft licht geven tot we de toets loslaten. Nu nemen we ook C1 op in de schakeling. Wat gebeurt er nu als we op Ta1 drukken? We stellen vast: de licht-emitterende diode heeft nu niet meer zoveel haast en zal slechts geleidelijk een helderder licht geven. Ook als we de toets loslaten, reageert ze niet meteen - ze gloeit nog een poosje na.

31 We verhogen de weerstandswaarde van R1 en R2 tot $1 \text{ k}\Omega$ resp. $1,5 \text{ k}\Omega$. Wat verandert er?

We merken op: weliswaar het licht van LED1 is nu iets minder fel,



Figuur 49. Zonder C1: een doodgewone stroomkring. Met C1 gebeurt alles met een beetje vertraging.

maar ze bereikt haar grootste lichtintensiteit nu nog later. En ze blijft ook langer nagloeien.

32 We vervangen C1 door een exemplaar van $100 \mu\text{F}$ en maken weer gebruik van de weerstanden van figuur 49. We drukken op de toets en zien: de overgangstijden zijn aanzienlijk korter dan zoëven.

Als we alles wat we uit deze experimenten te weten zijn gekomen, op een rijtje zetten, dan blijkt het volgende:

- de serieschakeling van R en C vertraagt het inschakelen van de licht-emitterende diode;
- het ontladen van de condensator duurt langer naarmate de waarde van de ontlaadingsweerstand toeneemt;
- hoe hoger de weerstandswaarde, des te kleiner is de laad- en ontlaadstroom;
- een hogere condensatorwaarde leidt net als een hogere weerstandswaarde tot een verlenging van de laad- en ontlaadtijd.

Insider-info 7

Het produkt van R en C van een schakeling voor het op- en ontladen van een condensator wordt tijdconstante genoemd. Het symbool daarvoor is de Griekse kleine letter tau (τ). Tijdens het opladen wordt het spanningsverschil tussen de batterij en de condensator steeds kleiner. Deze spanning staat over R en leidt dus volgens Ohm tot een steeds kleiner wordende stroom. Andersom wordt bij het ontladen de condensatorspanning steeds zwakker. Deze spanning staat over de ontlaadingsweerstand. Dus ook in dit geval wordt de stroom steeds zwakker.

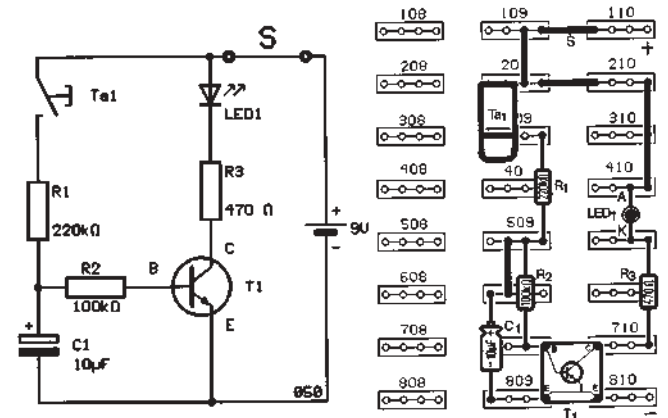
De laad- en ontlaadspanning aan de condensator verloopt dus volgens een exponentiële functie. Na verloop van de tijd T is C opgeladen tot 63,2% van de beschikbare spanning. Tijdens het ontladen daalt de condensatorspanning in dezelfde tijd tot 36,8% van de beginwaarde. Tijd-elementen bestaande uit R en C vormen belangrijke basisschakelingen van de elektronika.

Vlakken gekoppeld

Ook condensatoren kun je combineren. Bij parallelschakelingen wordt de beschikbare oppervlakte en dus ook de capaciteit groter. Je telt ze gewoon op: $C_{\text{tot}} = C_1 + C_2 + \dots$ Een parallelschakeling van $10 \mu\text{F}$ en $100 \mu\text{F}$ levert dus $C_{\text{tot}} = 110 \mu\text{F}$ op. Bij de serieschakeling ligt de zaak anders: de schakeling wordt weliswaar in z'n geheel opgeladen tot de beschikbare spanning, maar de condensatoren moeten het totaal onder elkaar verdelen. Het resultaat: $1/C_{\text{tot}} = 1/C_1 + 1/C_2 + \dots$ Een serieschakeling van $100 \mu\text{F}$ en $470 \mu\text{F}$ levert dus nog maar ongeveer $82 \mu\text{F}$ op.

Tijdmultiplicator

Wie, net als wij met onze experimenteerdoos, over de juiste middelen beschikt, kan de zaken groter aanpakken. Daarvoor nemen we nu - net als bij de geestenbezwering - een (nog)



onbekend onderdeel ter hand.

Figuur 50. Werkverdeling: hoge weerstandswaarden leiden tot grote vertragingen, dankzij de transistor ook dan een helder licht.

33

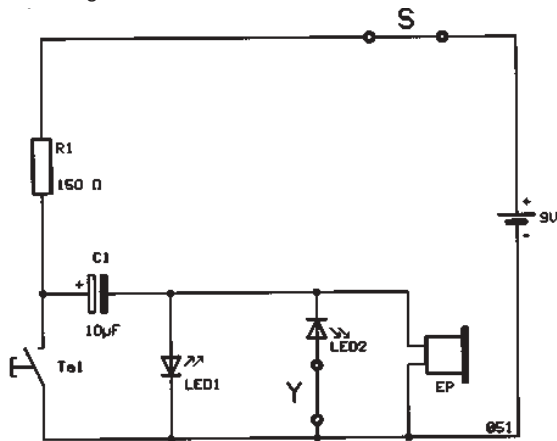
In plaats van de licht-emitterende diode plaatsen we de basis-emitterovergang van een transistor in de ont-ladingskring van de condensator. Bovendien gebruiken we veel hogere weerstandswaarden (figuur 50).

De stroom die naar de transistor vloeit wordt daarin een paar honderd keer versterkt (later vertellen we meer over de functie van transistoren). Hij hoeft dan ook niet groot te zijn om de licht-emitterende diode een net zo helder licht te laten geven als daarnet. De diode bevindt zich in de collector-emitterkring, dus daar waar de versterkte stroom vloeit. We hebben gezien dat de condensatorlading bij zwakke stromen veel langer meegaat dan bij sterke. Daarom straalt LED1 in ons experiment pas ongeveer 3 seconden na het inschakelen op volle sterkte licht uit. Na het uitschakelen neemt de lichtintensiteit pas na een aantal seconden duidelijk af.

Wisselende verhoudingen

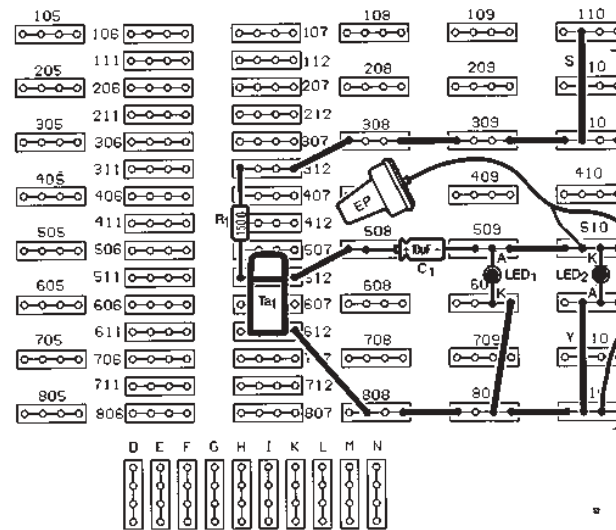
Tot nog toe was het simpel - de stroom vloeit in de richting die de polariteit van de batterij aangeeft. Gelijkstroom dus. Dat er in de stopcontacten van ons lichtnet wisselspanning heerst, weet vast iedereen. Wisselspanning kun je transformeren, dus met een gering verlies op elke gewenste spanningswaarde instellen.

34 We bouwen het experiment op zoals aangegeven in figuur 51. We gebruiken weer een nieuw onderdeel - de oortelefoon. Daarmee kun je naar de stroom "luisteren". De beide licht-emitterende diodes dienen om aan te geven, welke kant het opgaat. Zij zijn antiparallel geschakeld, dus voor tegengestelde stroomrichtingen.



Figuur 51. "Hulpbatterij"-condensator met eigen richting (polariteit) - door een druk op de toets naar wisselstroom.

Diodes, dus ook LEDs, zijn net straten met eenrichtingsverkeer. De pijl geeft de (technische) stroomrichting aan. Het verkeer (de stroom) kan pas in beide richtingen gaan als er naast de straat met eenrichtingsverkeer een tweede is aangelegd voor de tegenovergestelde richting. Daar hebben wij met de tweede LED voor gezorgd.



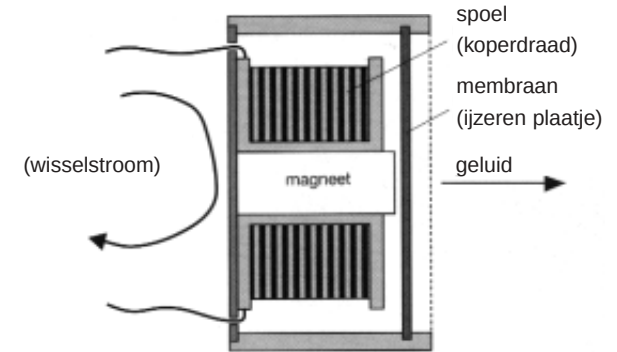
Figuur 52. Het opbouwschema bij figuur 51.

We drukken nu op Ta1, maar slechts even. Anders raakt R1 oververhit en wordt de batterij onnodig belast. Je kunt beter een paar keer even op de toets drukken. We merken op: druk op de toets - LED2 licht even op - laat de toets los - LED1 licht even op. Dat kun je zo vaak herhalen als je wilt. De eerste keer blijft LED2 soms nog donker. In de oortelefoon hoor je iedere keer een knak - nu heb je tegelijkertijd beeld en geluid.

Insider-info 8

Een oortelefoon is een elektromagnetisch-akoestische omzetter. Hij maakt gebruik van de wisselwerking tussen geleiders waar stroom doorheen vloeit en magnetisch veld. Als er door een elektrische geleider stroom vloeit, ontstaat eromheen een cirkelvormig-concentrisch magnetisch veld. De stroomrichting bepaalt de positie van de noord- en zuidpool. In onze oortelefoon is een dergelijke spoel bevestigd op een permanente magneet. De spoel maakt het magnetisch veld sterker of zwakker, al naargelang de stroomrichting. Vóór de magneet bevindt zich een dun plaatje van ijzer dat hierdoor meer of minder sterk wordt aangetrokken. Door deze beweging wordt ook de lucht in beweging gebracht, en dat horen we.

De beide licht-emitterende diodes met tegengestelde polariteit knipperen dus om de beurt. Dat betekent dat er uit C1 een stroom komt die van richting verandert - inderdaad, een *wisselstroom*.



Figuur 53. Koper en ijzer: stroom wordt hoorbaar.

Dit ondanks het feit dat de batterij alleen maar gelijkstroom levert. Die dient echter slechts als laadstroom voor C1. Hij vloeit een poosje nadat we Ta1 hebben losgelaten. Door een druk op de toets verandert de condensator in een batterij die snel zijn lading verliest. Door middel van Ta1 verbinden we de plus-pool van de batterij met de gemeenschappelijke min-draad. De ontladstroom vloeit daarom precies in tegengestelde richting - dus door LED2. Voor de oortelefoon maakt het niet uit in welke richting de stroom vloeit. Hij krijgt in beide gevallen zijn deel van de lading, want over de licht-emitterende diodes staat nog steeds een spanning van ongeveer 2 V. Weliswaar ontbreekt er bij LED2 een beveiligingsweerstand, maar die is niet absoluut noodzakelijk, omdat de condensator van 10 μF slechts een kleine hoeveelheid energie afgeeft.

35 Tip voor meer licht: voor C1 100 μF i.p.v. 10 μF en (i.p.v. de brug Y) 33 Ω vóór LED2; R1 kan worden verhoogd tot 470 μF . "Superlicht" wordt het als je 470 μF en nog eens 150 Ω gebruikt voor R1. Vergeet de beveiligingsweerstand voor LED2 niet!

Het principe van het veranderen van de lading van een condensator wordt in de praktijk ook toegepast voor spanningsvariaties (het maken van verschillende spanningen). Alleen wordt dan gebruik gemaakt van een halfgeleiderschakelaar in plaats van een toets. En natuurlijk van automatische omschakeling.

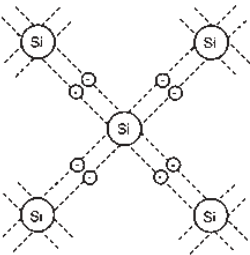
7. Geleider en halfgeleider

We kennen goede elektrische geleiders en maken daar nuttig gebruik van - in de eerste plaats natuurlijk koper. Net zo belangrijk zijn niet-geleiders. Als je die niet had, zou je helemaal geen doelmatig gebruik kunnen maken van elektrische stroom.

Isolatiemateriaal zorgt ervoor dat de stroom in de juiste banen wordt geleid. Maar de natuur houdt van overgangen, tussenvormen. Tot die tussenvormen behoren de materialen die voor de micro-elektronika onontbeerlijk zijn - de halfgeleiders. Silicium is vandaag de dag waarschijnlijk de belangrijkste halfgeleider. Het wordt in elke gewenste hoeveelheid gewonnen uit gewoon zand. In z'n zuiverste vorm en bij kamertemperatuur heeft het in eerste instantie de eigenschappen van een niet-geleider.

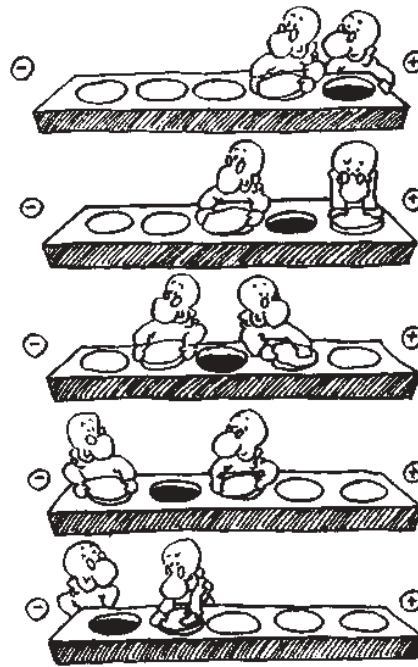
Carpooling in het kristalrooster

Milieubewuste burens hebben besloten om samen te gaan carpoolen. Om de beurt brengt elk een keer de kinderen van hen allemaal met de auto naar school. Iedereen heeft z'n eigen auto, maar elke auto wordt beurtelings door meerdere personen gebruikt. Zo ontstaat een nauwe, tamelijk harmonieuze band. In het kristalrooster van zuiver silicium gebeurt ongeveer hetzelfde. De vier elektronen op de buitenste schil weten precies bij welke atoomkern ze thuishoren. Toch draaien ze elk afwisselend ook nog eens om een naburig atoom. Ze verlaten dit samengesteld verband echter niet (figuur 54). Tenminste niet bij kamertemperatuur.



Figuur 54. Verbindingen van elektronenparen bij silicium: elk atoom is verbonden met vier naburige atomen.

Toevoer van warmte heeft echter een opmerkelijke reactie tot gevolg: door een hogere temperatuur kunnen enkele elektronen ondanks hun gevestigde positie in paniek raken. Ze treden buiten hun verband waardoor er gaten ontstaan. Een op het kristal aangelegde spanning zet de elektronen geordend in beweging - als stroom in de richting van de positieve pool. Hoe hoger de temperatuur, des te groter wordt hun aantal. Precies andersom als bij metalen, waar de elektronen het steeds moeilijker krijgen om te bewegen naarmate de temperatuur stijgt: het geleidingsvermogen neemt af. Bij half-geleiders neemt het geleidingsvermogen dus toe met het stijgen van de temperatuur. Zodra een gat wordt opgevuld door een elektron uit de buurt, veroorzaakt dit weer een nieuw gat. Wanneer een spanning wordt aangelegd, schuift het gat dus op in de richting van de negatieve pool. Zonder spanning is er echter helemaal geen beweging! De kleine rakkers van figuur 55 laten zien hoe het in z'n werk gaat.



Figuur 55. Gaten schuiven (ogenschijnlijk) op naar links, omdat ze ontstaan doordat schijfjes (daadwerkelijk) naar rechts worden verplaatst.

Door het verplaatsen van de "schijfjes" naar rechts schuift het gat dat daardoor ontstaat, op naar links.

We onthouden dus: metalen geleiden slechter naarmate de temperatuur hoger wordt; halfgeleiders gaan met het stijgen van de temperatuur steeds beter geleiden.

Verstoring van de bestaande orde

De ideale regeling van de carpoolers wordt verstoord door een "nieuwkomer" zonder auto. Opeens is er een plaatsje te weinig. Telkens wanneer het kind van de nieuwkomer meerijdt, moet een ander kind een beroep doen op een nieuwe buurman. Omdat er "een auto te weinig" is, ontstaat er een gat in het systeem. En dat veroorzaakt een beweging. Maar ook een overschot leidt tot onrust: als er een auto bijkomt, wordt het aanbod aan beschikbare plaatsen groter dan de vraag. Het overschot ontstaat nu eens op de ene plaats dan weer op een andere. Ook dan komt er beweging in het systeem.

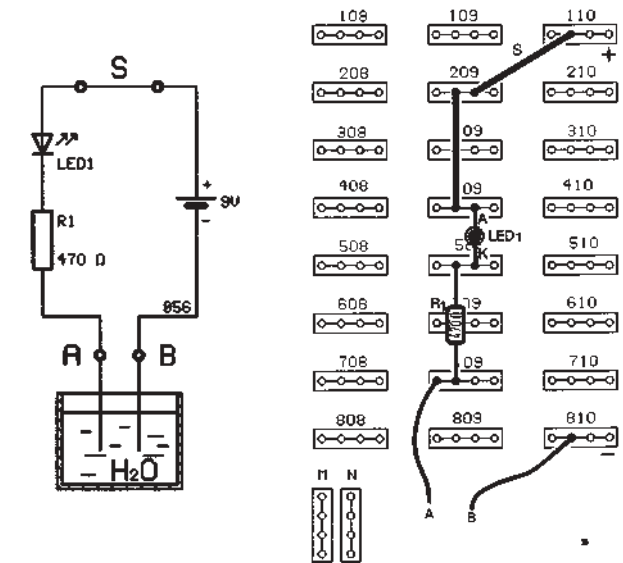
Nuttige consequenties

Zo'n verstoring kan ook z'n nut hebben. Zoals wij een beetje zout

in de soep strooien, strooien de natuurkundigen in ingewikkelde processen onder invloed van warmte vreemde atomen in het zuivere silicium. Ze noemen dat doperen. Deze vreemde atomen zijn niet vierwaardig, maar drie- of vijfwaardig. Driewaardige veroorzaken een "gat", een vrije elektronenplaats. Vijfwaardigen daarentegen maken een elektron vrij dat niemand in de buurt kan gebruiken. Dat betekent dat zowel elektronen als gaten noodgedwongen er op uit moeten trekken. Een materiaal met dergelijke "gebreken" kan zelfs bij normale, "menselijke" temperaturen stroom geleiden, als er spanning wordt aangelegd - ook al geleidt het minder goed dan bijvoorbeeld koper. De vrije elektronen slingeren zich als het ware aan een touw bungelend door het rooster naar de plus-pool van de batterij, de gaten worden aangetrokken door de min-pool, waar voldoende elektronen zitten. Want een gat betekent een tekort aan elektronen. Als zo'n gat op trektocht gaat is er dus in werkelijkheid sprake van elektronen die deze gaten opvullen. Onderweg laten ze echter weer gaten vallen op die plaatsen waar ze vandaan komen. Hoe dat in z'n werk gaat, hebben ons de rakkers in figuur 55 al laten zien.

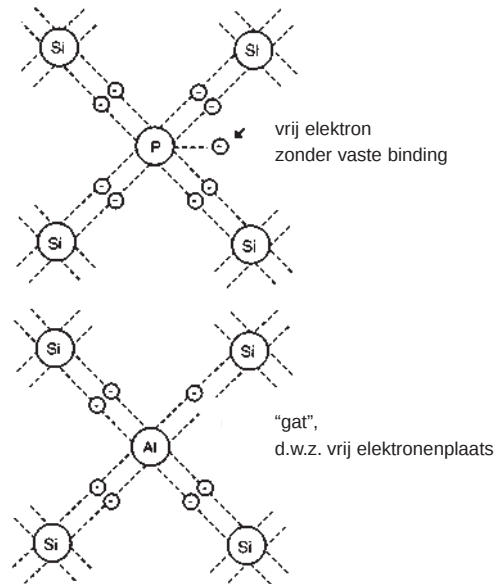
36

We vullen een klein, schoon bakje met gedemineraliseerd water. (Een beetje gesmolten ijs van de wand van de diepvrieskist is ook goed.) Dan hangen we de blanke uiteinden van twee draden zo in het water dat deze elkaar niet raken. We verbinden de beide draden met een proefschakeling zoals aangegeven in figuur 56. We houden de licht-emitterende diode in het oog. Deze blijft in eerste instantie donker.



Figuur 56. Zuiver (gedemineraliseerd) water is een slechte geleider. Laten we er eens wat keukenzout in strooien!

Gedemineraliseerd (of gecondenseerd) water is een slechte geleider. Nu helpen we een handje door een paar korreltjes keukenzout in het water te strooien en stellen vast: de LED geeft licht! Onze conclusie luidt: als je het water met keukenzout "doteert", wordt het geleidingsvermogen ervan aanzienlijk verbeterd. Dit vind zijn oorzaak weliswaar niet in veranderingen van het rooster, maar als illustratie werkt deze proef heel verhelderend. Maar laten we terugkeren naar het silicium. We noemen het p-geleidend wanneer de gaten de overhand hebben, en n-geleidend wanneer de dotering tot een overschot aan elektronen leidt. Zie figuur 57.



Figuur 57. Door de versturende werking van vreemde atomen in het silicium-kristalrooster komen ladingdragers vrij: boven door fosfor (n-overschot), onder door aluminium (p-overschot).

Het wordt interessant als je in een kristal beide toestanden naast elkaar tweeebngt.

Geven en nemen - de pn-overgang

Het hoeft niet altijd tot een confrontatie te komen, als tegenstellingen elkaar ontmoeten. Integendeel. Tussen een p- en een n-geleidende zone ligt een interessant gebied: een pn-overgang. Dat is een soort vrijhandelszone. Zolang er van buitenaf geen druk wordt uitgeoefend, d.w.z. spanning wordt aangelegd. Enkele overtollige elektronen uit de n-zone vestigen zich aan de p-kant. Anders gezegd: ze diffunderen ernaar toe. Dat betekent voor het grensgebied een positieve lading aan de n-kant en een negatieve lading aan de p-kant. Aan de buitenkant merk je er niets van.

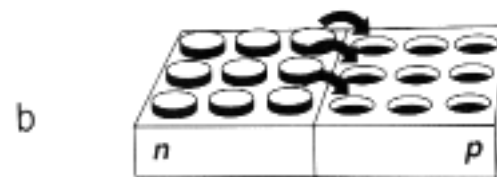
In totaal wordt het aantal vrije ladingdragers in de overgangszone kleiner. Nu leggen we een spanningsbron aan op de p- en de n-kant. Eerst met de min-pool aan p en met de plus-pool aan n. Dat komt overeen met de bestaande interne toestand. Hierdoor wordt het grensvlak breder. Er vloeit geen stroom. Vervolgens polen we de spanningsbron om. Nu wordt het grensvlak overstroomd met ladingdragers. Vanuit de n-kant worden door de negatieve pool van de bron zoveel elektronen aangevoerd als de gaten aan de p-kant willen hebben. Er vloeit een sterke stroom. Op de afbeeldingen in figuur 58 wordt dit nog eens gedemonstreerd aan de hand van het schijfjesmodel.

De straat met eenrichtingsverkeer voor elektronen

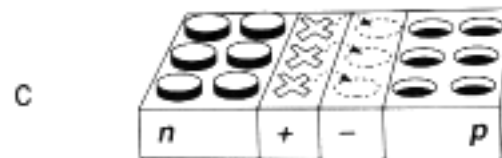
We hebben het al geconstateerd bij de condensatorproeven: diodes geleiden slechts in een richting. We wisten alleen nog niet waarom dat zo was. Nu begrijpen we het: diodes - dat zijn bouwstenen, bestaande uit een combinatie van p- en n-geleidende materialen. Ze geleiden alleen wanneer een spanningsbron met de plus-pool op de p-kant en met de min-pool op de n-kant wordt aangesloten. Bij een omgekeerde polariteit ontstaat er geen beweging. Dat is precies het probleem waarmee het ventje in figuur 59 wordt geconfronteerd: het water duwt tegen de



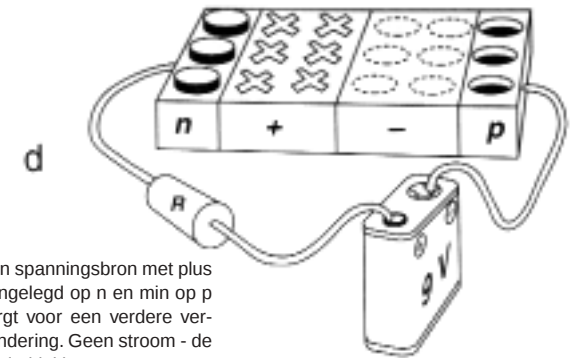
Schijfjesvoorraad van n (overschot) en p (tekort)



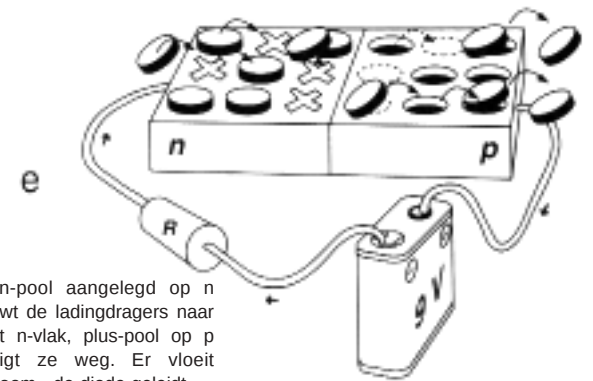
Bij het samenvoegen diffunderen elektronen via het grensvlak naar p.



Bij n ontbreken er nu elektronen, bij p zijn gaten opgevuld - het aantal vrije ladingdragers op het grensvlak is kleiner geworden.



Een spanningsbron met plus aangelegd op n en min op p zorgt voor een verdere vermindering. Geen stroom - de diode blokkeert.

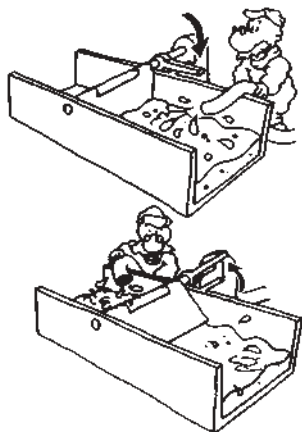


Min-pool aangelegd op n duwt de ladingdragers naar het n-vlak, plus-pool op p zuigt ze weg. Er vloeit stroom - de diode geleidt.

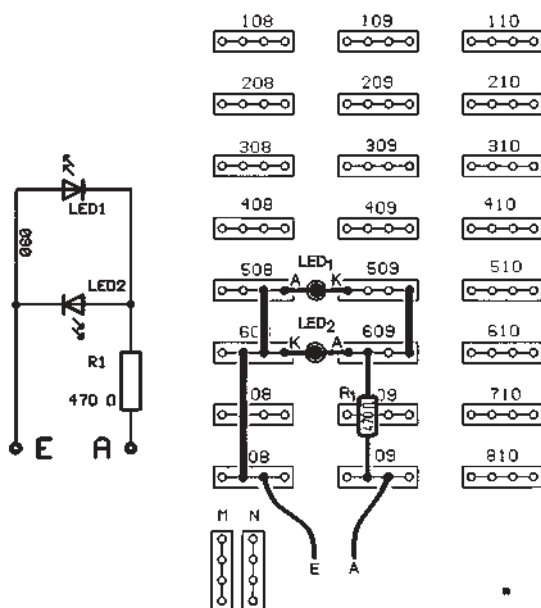
Figuur 58. Schijfjesmodel van een diode van n- en p- materiaal - de situatie hangt af van de van buitenaf aangelegde spanning.

afsluitklep en verspert op die manier voor zichzelf de doorgang. Als je het daarentegen aan de andere kant naar binnen laat lopen, drukt het de klep open en kan het ongehinderd doorstromen.

37 Met behulp van twee licht-emitterende diodes en een weerstand bouwen we de pooltester op zoals aangegeven in figuur 60. Nu wordt voor elke batterij aangegeven aan welke kant zich de plus-pool bevindt: ligt de plus bij E, dan geeft LED1 licht, ligt de plus bij A, dan straalt LED2 licht uit.



Figuur 59. Watermodel van de diode. Gesperde toestand: water in het rechter kanaalgedeelte duwt de sluisdeur dicht. Stroomtoestand: water in het linker kanaalgedeelte opent zelf de deur naar rechts.



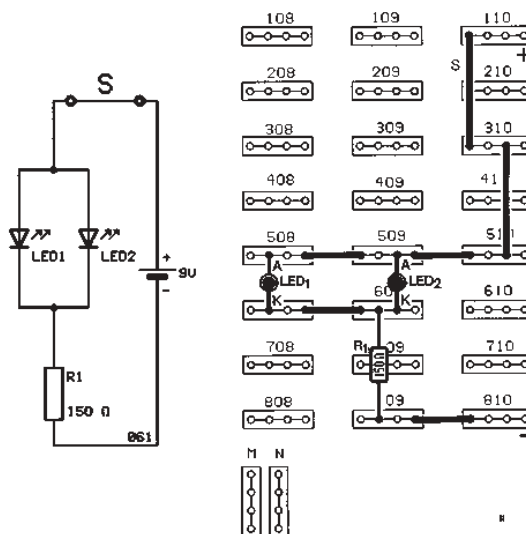
Figuur 60. Polariteitsdetective: plus bij E zorgt ervoor dat LED1 oplicht; ligt de plus-pool bij A dan geeft LED2 licht.

Bonte verscheidenheid

Dat er allerlei soorten licht-emitterende diodes bestaan, kun je al zien aan de kleuren. Die hebben betrekking op het gebruikte

materiaal (groen en geel bij gallium-arsenide, rood bij gallium-arsenide-fosfide). Hoeveel spanning er nodig is om de stroom te laten vloeien, is ook afhankelijk van het materiaal. Immers, alles moet betaald worden. Rode licht-emitterende diodes hebben - al naar gelang het type - 1,5 à 1,7 V nodig, gele en groene tussen 1,8 en ca. 2 V.

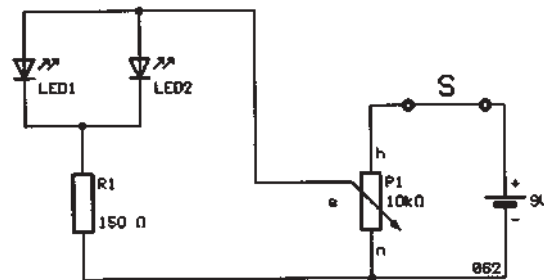
38 We monteren, zoals aangegeven in figuur 61, eerst alleen LED2 (de groene LED) en pas daarna ook de rode. Vol verbazing stellen we vast: de groene LED geeft nauwelijks meer licht, zodra ook de rode is gemonteerd. In plaats daarvan geeft de rode een tamelijk helder licht.



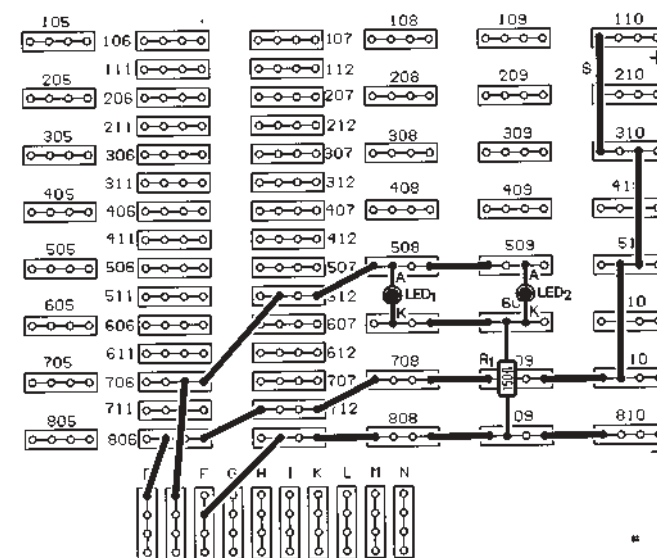
Figuur 61. Rood vóór groen: als je de rode LED parallel schakelt aan de groene wanneer die licht geeft, wordt de lichtintensiteit van de groene minder.

39 We breiden de schakeling van figuur 61 uit met een potmeter (figuur 62). We draaien de potmeter vanuit de onderste aanslag langzaam op. We zien: de rode LED begint al direct na het opdraaien licht te geven, de groene (zwak) pas vlak voor de bovenste aanslag.

40 We voorzien elke LED van een aparte voorschakelweerstand (figuur 64) en herhalen de proef. We stellen vast: omdat elke LED een eigen voorschakelweerstand heeft, gaat ook die welke de meeste spanning nodig heeft, tenslotte helder licht geven. Terwijl de rode LED bij ongeveer 1/3 van het bereik van de draaiknop oplicht, volgt de groene pas bij ongeveer 2/3. Ter vergelijking schakelen we de beide LEDs weer parallel (druk op Ta1): de groene "geeft zich over" aan de rode.



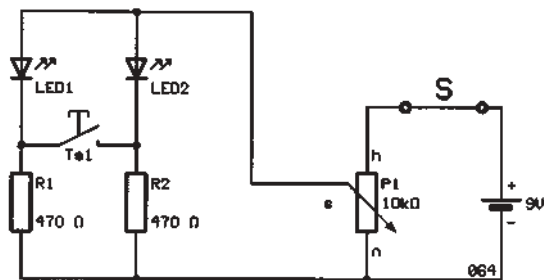
Figuur 62. Het effect van figuur 61 met "vertraagde" spanningstoever: als je P1 langzaam opdraait, licht eerst de rode LED op; pas als je de knop verder opdraait, volgt de groene LED.



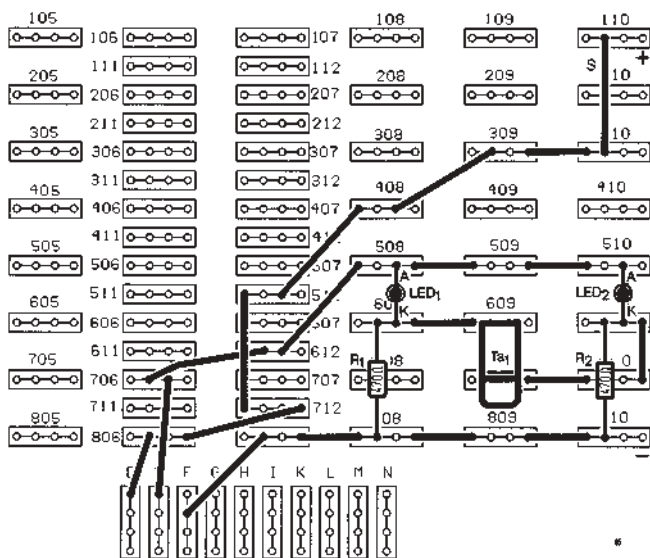
Figuur 63. Het opbouwschema bij figuur 62.

Onze conclusie luidt: licht-emitterende diodes van verschillende kleur hebben verschillende spanning nodig om te bereiken dat de stroom gaat vloeien en de LED licht op. Daarna neemt de lichtintensiteit al bij een geringe verhoging van de spanning sterk toe.

De spanning waarbij een LED oplicht, wordt LED-spanning genoemd. Als je twee LEDs met een verschillende LED-spanning achter een gemeenschappelijke voorschakelweerstand parallel schakelt, geeft praktisch alleen de LED met de lagere spanning licht.



Figuur 64. Afzonderlijk oprukken (van stromen), samen branden! Door een druk op Ta1 keer je terug tot de toestand van figuur 62.



Figuur 65. Het opbouwschema bij figuur 64.

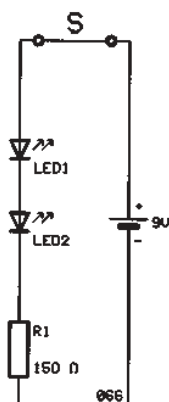
Insider-info 9

Maar nu ter zake. De natuurkundigen hebben modellen ontwikkeld voor halfgeleider-bouwelementen, volgens het principe dat de stroom bij de pn-overgang op gang komt, zodra de ladingdragers van buitenaf voldoende energie hebben gekregen. Daardoor worden ze vanuit stilstand op een "band" getild, waarop ze zich vrij kunnen bewegen. De afstand tussen de stilstand en deze band komt overeen met de drempelspanning. Wanneer deze spanning is bereikt, kunnen heel veel ladingdragers hun bijdrage gaan leveren aan het vloeien van de stroom. Een klein beetje extra spanning volstaat om ze na-genoege allemaal in beweging te zetten: de verzadigingspanning. Daarbij ontstaat echter al zoveel vermogen dat

het bouwelement (dus de licht-emitterende diode bijvoorbeeld) stuk gaat. En dat bij een spanning die niet veel meer bedraagt dan de drempelwaarde. Dat verklaart waarom we een voorschakelweerstand moeten gebruiken.

Niet alleen spanning, maar ook warmte-energie is geschikt om de elektronen in beweging te zetten. Vandaar dat de waarde van de drempelspanning lager wordt naarmate de temperatuur stijgt.

41 We schakelen een rode en een groene licht-emitterende diode in serie en vergelijken de lichtintensiteit (figuur 66). Nu vloeit er door beide diodes dezelfde stroom. Toch is het niet noodzakelijk dat ze allebei even helder licht geven. Alle types en exemplaren verschillen onderling. Daar komt nog bij dat onze ogen minder gevoelig zijn voor rood licht dan voor geel of groen licht.



Figuur 66. Ondanks gelijke stroomsterkte verschillende lichtintensiteit: onze ogen zijn gevoeliger voor groen dan voor rood, "superheldere" rode licht-emitterende diodes compenseren dat indien nodig.

42 We gebruiken de schakeling zoals aangegeven in figuur 66 voortaan als diodentester: in plaats van de groene of rode LED monteert je gewoon een onbekende diode. Als die in orde is en de polariteit klopt, zal ze oplichten.

Hulp van buitenaf

De drempelspanning voor een bepaalde stroom is geen onwrikbare waarde. Verderop, in het hoofdstukje over de transformator, kunnen we dat op doeltreffende wijze demonstreren. We beperken ons hier tot een theoretische proef: in de parallelschakeling van figuur 61 koelen we de rode LED met ijs en verwarmen de groene

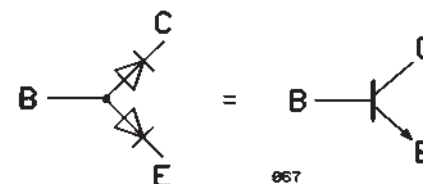
voorzichtig (bijv. met een föhn). Dit zal tot gevolg hebben dat de rode LED zwakker en de groene helderder oplicht. Immers: door het afkoelen is de LED-spanning van de rode LED gestegen, terwijl die van de groene door het verwarmen is gedaald. Bij een hogere temperatuur is er dus minder spanning nodig om de LEDs licht te laten geven. Vaak is dergelijke "hulp" echter niet gewenst.

De derde dimensie

We hebben (licht-emitterende) diodes in serie geschakeld en parallel en antiparallel ten opzichte van elkaar aangesloten. Dat had in alle gevallen interessante effecten tot gevolg. Maar het aanéenschakelen van twee diodes overtreft alles. Al moet dat dan wel op een en dezelfde kristal gebeuren: pn in serie met np. Of np in serie met pn. En dan nog alleen onder bepaalde voorwaarden. Over dat opwindende onderwerp gaan we het in het volgende hoofdstuk hebben.

8. De transistor

Laten we de linker helft van figuur 67 eens bekijken: deze schakeling bestaat uit een combinatie van twee diodes met elk een pn-overgang. Wanneer spanning wordt aangelegd, kan stroom van B naar E vloeien of van B naar C - ook nu weer in de "technische stroomrichting" gezien.

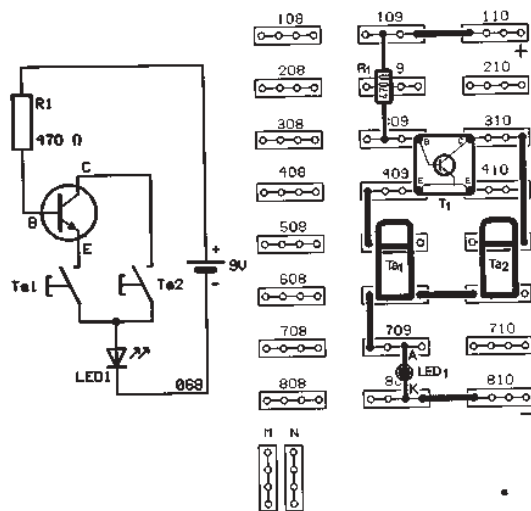


Figuur 67. De npn-transistor: op het eerste gezicht "gewoon" een combinatie van twee diodes (links). Maar het schakelsymbool (naar keuze met een cirkeltje) doet vermoeden dat er iets bijzonders aan de hand is (rechts).

De keuze voor de letters E, B en C is niet toevallig. De beide diodes bevinden zich namelijk op hetzelfde siliciumkristal. De p-zone, die tamelijk klein is, hebben ze gemeenschappelijk. Deze zone wordt de basis genoemd. De onderste aansluiting heet emitter, de bovenste collector. Het geheel vormt een transistor. Deze namen hebben een "historische" achtergrond. Zo'n npn-rangschikking levert verbazingwekkende prestaties. De diodes vormen slechts een deel van de nieuwe waarheid. Vandaar ook het nieuwe schakelsymbool rechts in figuur 67.

43 We bouwen de testschakeling op zoals aangegeven in figuur 68 en testen daarmee de beide npn-transistoren

uit onze experimenteerdoos. Zodoende bevestigen we wat in figuur 67 was aangegeven: tussen B en E zit werkelijk een diode en eveneens tussen B en C.

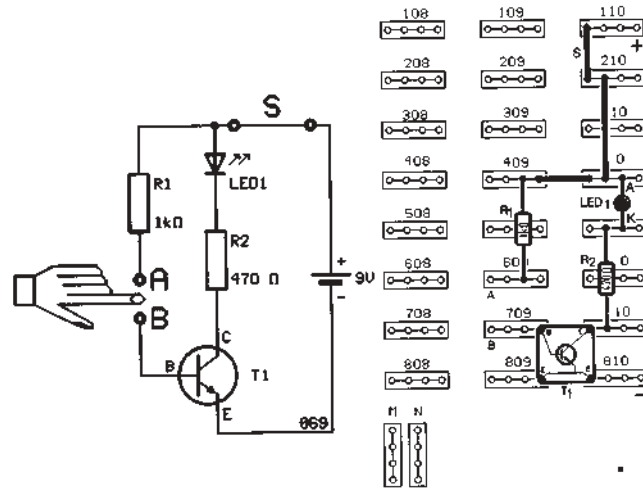


Figuur 68. Een testschakeling voor transistoren: LED1 licht op na een druk op de toets; de richting van de diode in het symbool klopt dus.

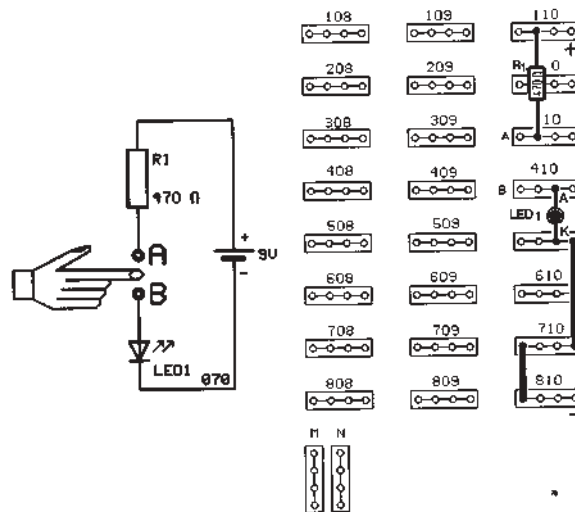
Opmerking: er bestaan ook pnp-transistoren. Dat wil zeggen, dat de diodes omgekeerd zijn gerangschikt, dat de kathodes i.p.v. de anodes met elkaar zijn verbonden.

44 Met behulp van de schakeling zoals aangegeven in figuur 69 zetten we de eerste stap op weg naar de nieuwe dimensie. Wat doet de licht-emitterende diode? Aanvankelijk blijft ze donker - totdat we met onze vinger de klemveren 609 (A) en 709 (B) overbruggen. Dan kun je duidelijk zien dat ze licht geeft. Als je je vinger een beetje (!) vochtig maakt kun je de lichtintensiteit nog vergroten. Onze conclusie luidt: door een beetje stroom (via de grote weerstand van onze huid) naar de basisaansluiting te leiden hebben we een veel sterkere stroom teweeggebracht. Die vloeit tussen de collectoren de emitteraansluiting.

45 Om ons ervan te vergewissen dat dat inderdaad zo is, herhalen we de vingerproef zonder transistor (figuur 70): dan zul je, zelfs als je het topje van je vinger goed nat maakt en de proef in het donker uitvoert, zien dat de diode slechts een flauw schijnsel uitstraalt. Bij een "goede" licht-emitterende diode heb je daarvoor misschien 200 μA , dus 0,2 mA, nodig. Bij de proef met de transistor daarentegen volstaat ongeveer 5 μA "vingerstroom" in de basis om de diode helder te laten oplichten. In de LED-kring vloeit dan bijna 4 mA (voorbeeld).



Figuur 69. De sensortoets maakt het versterkingseffect duidelijk: slechts een zwakke stuurstroom via de grote weerstand van de huid en toch een sterke LED-stroom.

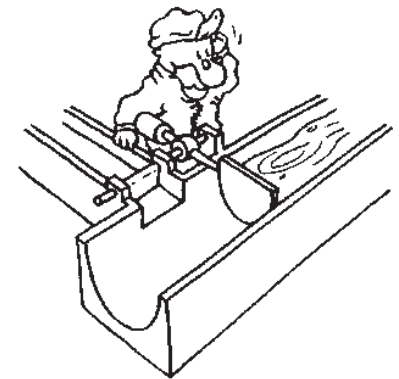


Figuur 70. De proef op de som: LED1 gloeit hoogstens een beetje, als je je vinger goed nat maakt. Hier is geen sprake van versterking!

'n Steuntje bij het nadenken

Het feit dat de beide n-zones op het transistorkristal vlak bij elkaar liggen doet wonderen. Een zwakke stroom leidt tot een aanzienlijk sterkere. De zwakke basisstroom vloeit samen met de sterke collector stroom uit de emitteraansluiting naar buiten.

Klep in het hoofdcircuit gesloten - geen stroom



Een beetje water in de stuurkring (basis) en de stuurklep wordt omhooggeduwd. Daardoor wordt de hoofdklep in het brede kanaal geopend - de zwakke basis- en de veel sterkere collectorstroom vloeien.

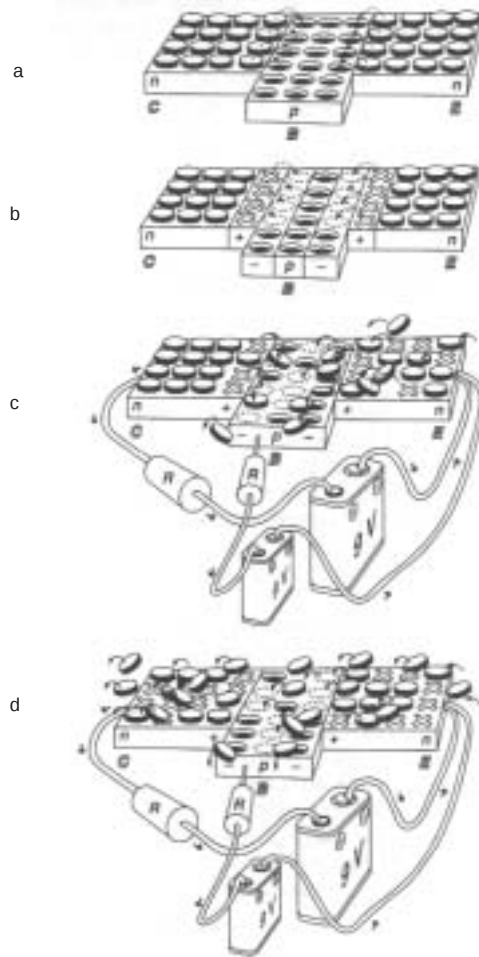


Figuur 71. De transistor als sluis met stuurmechanisme.

Een vergelijking met het watermodel ligt voor de hand (figuur 71): als je een beetje water in het smalle "basis-zijkanaal" laat lopen, wordt daardoor de sluis geopend voor de grote waterstroom in het hoofdkanaal tussen collector en emitter. Hoe meer water in het basiskanaal, des te verder wordt de stuurklep opengezet - je kunt de collectorstroom doseren zoals je wilt!

De plaatjes in figuur 72 werken weer met het schijfjesmodel. Zelfs als er geen spanning is aangelegd, leidt de diffusie tot "verarmingszones" in de grensgebieden. De n-grenslagen nemen positieve, de p-grenslagen negatieve lading op. Spanning aan de basis-emitter-diode in doorlaatrichting leidt ertoe dat de verarmingszone in dit gebied smaller wordt. Het gebied wordt met ladingdragers overspoeld. Aangezien de p-laag heel dun is, dringen elektronen ook door door in de verarmingszone van de

collectorzijde. Daar heerst positieve spanning. Die brengt een in verhouding tot de basisstroom sterke collectorstroom op gang.



Figuur 72. De transistor als schijfjesmodel.

- Schijfjes (elektronen) diffunderen vanuit de beide n-gebieden naar het "gaatjesgeleidende" p-gebied.
- De verarmingszones die zo ontstaan, reiken tot diep in de basis. Resultaat: positieve lading van de n-grenslaag, negatieve lading van de p-grenslaag.
- Tussen basis- en emitteraansluiting wordt een spanning aan gelegd, die de daartussen liggende verarmingszone smaller maakt met ladingdragers overspoelt.

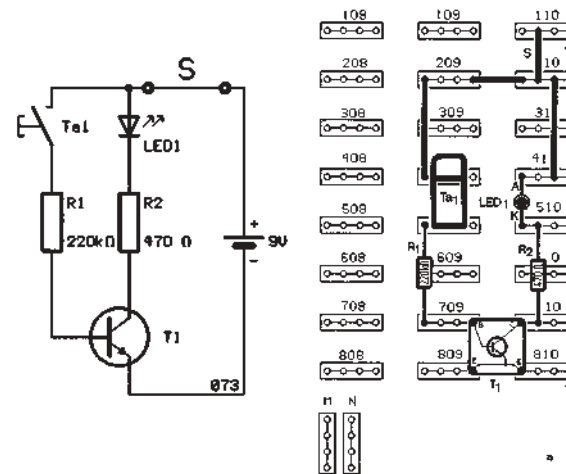
d Aangezien de basislaag heel dun is, dringen er ook elektronen door tot in de collector-verarmingszone. Zodoende zorgt de tussen collector en emitter aangelegde spanning ervoor, dat er een sterke stroom op gang komt.

Emitterschakeling

Het topje van onze vinger is op den duur natuurlijk geen bruikbaar bouwlement. De proef volgens figuur 69 laat echter zien, hoe bepaalde sensoren in apparaten kunnen worden toegepast. Laten we nu de aan wisselingen onderhevige weerstand van onze huid met een waarde van een paar honderd kilo-ohm vervangen door een degelijke vaste weerstand!

46

Zoals aangegeven in figuur 73 monteren we in plaats van het sensortrajec een toets en een weerstand in de schakeling. Per slot van rekening is het trajec B-E een gevoelige diode die behoefte heeft aan een beveiligingsweerstand. We stellen vast: ondanks de hoge weerstandswaarde straalt de licht-emitterende diode een tamelijk helder licht uit wanneer we op de toets drukken.



Figuur 73. Kleine oorzaak (basisstroom) - grote gevolgen (collectorstroom)!

Bij deze proeven zien we altijd twee circuits: de stuurkring aan de kant van de basis en de belastingskring (waar de werking optreedt) aan de kant van de collector. Gemeenschappelijk element van beide is de emitter, de transistor werkt in emitter-schakeling. Of, aangezien de "gevolgen" zich voordoen bij de collector, als collectorvolger.

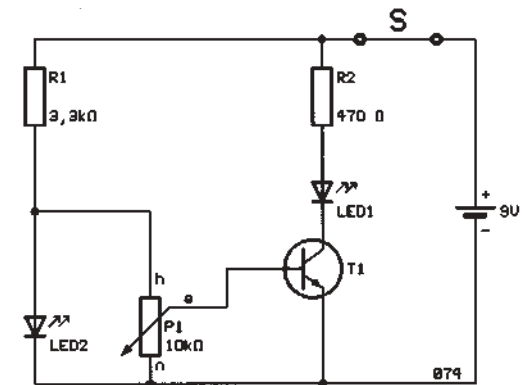
Alweer een drempel

Hoe sterk is in figuur 73 eigenlijk de basisstroom I_B ? Ruwweg berekend volgt die uit $I_B = U_B / R_1$. (U_B is de batterijspanning).

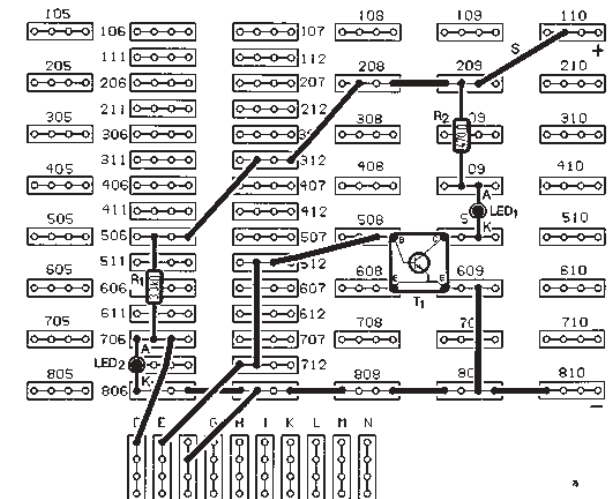
Dat is niet helemaal nauwkeurig, want het trajec B-E heeft als diode eveneens een drempelspanning.

47

We bouwen de testschakeling op zoals aangegeven in figuur 74. Door de truc met de groene LED2 verkrijgen we een relatief stabiele spanning van ongeveer 2 V. Maar dat geldt alleen als we de looper van de potmeter niet verder dan voor 3/4 opdraaien. We beginnen bij de onderste aanslag en houden LED1 in het oog. We zien: ongeveer bij 1/3 van het instelbereik begint LED1 (eerst zwak) licht te geven. Nu moet je heel voorzichtig verder draaien, want de diode gaat al gauw feller oplichten.



Figuur 74. Drempel-effect: de basisstroom en dus ook de collectorstroom, begint bij een bepaalde positie van P1 tamelijk abrupt te vloeien.



Figuur 75. Het opbouwschema bij figuur 74.

Wij leiden hieruit af: de drempelspanning van onze basis-emitterdiode bedraagt iets minder dan 1/3 van de drempelspanning van de (groene) LED2. Met behulp van een voltmeter zou je kunnen vaststellen, dat ze begint op te lichten bij ongeveer 0,55 V. Al vanaf 0,7 V neemt de lichtintensiteit van LED2 nauwelijks nog toe. De transistor heeft dan namelijk zo ongeveer al zijn vrije elektronen op reis gestuurd. We noemen dat verzadiging. Onder deze omstandigheden kun je tussen collector en emitter nog maar een kleine spanning in de orde van grootte van millivolts meten. De transistor is nu "in geleiding".

Versterker of schakelaar?

Zolang de sterkte van de collectorstroom zich aanpast aan de basisstroom en de transistor dus nog niet in verzadiging is, is deze een uitstekende versterker. Zijn stroomversterking B in emitterschakeling bereken je volgens de formule $B = I_C/I_B$. Bij het door ons gebruikte transistortype varieert de waarde van de stroomversterking van 400 tot 800. De stroom in de collectorkring is echter gebonden aan een maximum dat wordt bepaald door U_B en de bouw-elementen in deze kring. Een voorbeeld: $U_B = 9$ V, $U_F = 2$ V (groene of gele licht-emitterende diode). $R = 470 \Omega$. De maximale stroom (transistor-verzadigingsspanning buiten beschouwing gelaten) bedraagt dan:

$I_{\max} = (U_B - U_F)/R \approx 15$ mA. De stroom van 15 mA vereist bij $B = 400$ een basisstroom van ongeveer $40 \mu\text{A}$. Als je de transistor met een veelvoud daarvan voedt, is hij, zoals we hebben gezien, verzadigd, volledig in geleiding. In deze vorm worden transistoren vaak toegepast en met elkaar verbonden. Het zijn beslist geen ideale schakelaars. Daar staat tegenover dat het schakelproces weinig "kracht" vereist. Een zwakke stroom is al voldoende. En die mag zelfs over een grote afstand worden aangevoerd. Transistor-schakelaars kun je dus ook op afstand bedienen.

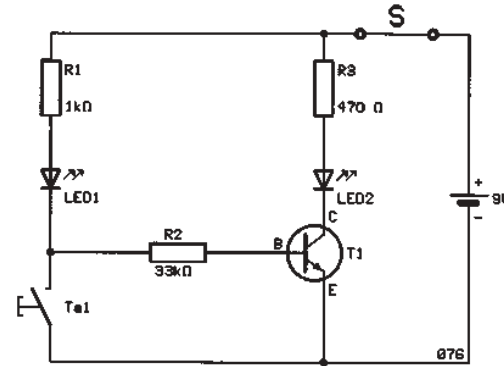
Ja wordt nee

Een emittertrap is eigzinnig. Dat blijkt uit het volgende experiment, waarbij een "echte" en een transistor-schakelaar zijn betrokken.

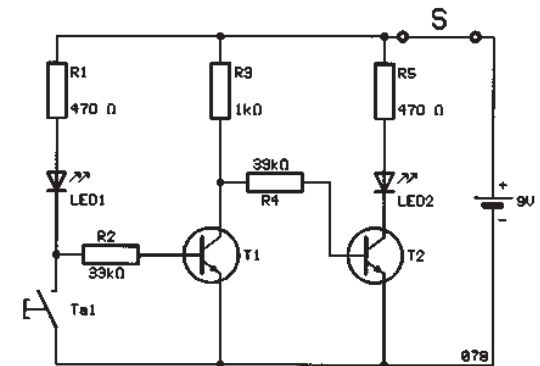
48

Zodra de batterij wordt aangesloten op de schakeling weergegeven in figuur 76 licht LED2 op. Dat betekent: "ja - de transistor is in geleiding." Ta1 staat echter open ("neen - Ta1 is *niet* in geleiding"). Nu drukken we op de toets. LED1 licht op en geeft aan dat Ta1 gesloten is ("ja"). In plaats daarvan geeft LED2 nu geen licht meer: de transistor-schakelaar staat open ("nee"). Onze conclusie luidt: aan de uitgang van een emitter-schakeling gebeurt altijd het omgekeerde van dat wat aan de ingang gebeurt. Latinisten hebben daarvoor de naam *inverter* bedacht. Wat gebeurt er nu, wanneer je op de uitgang van zo'n inverter de ingang van een tweede inverter aansluit?

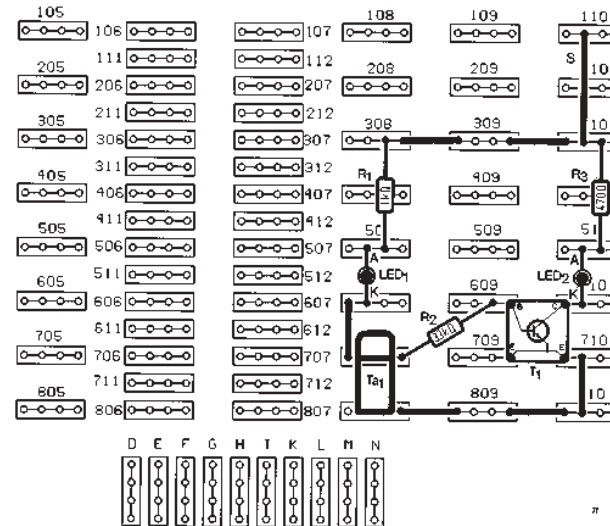
W e



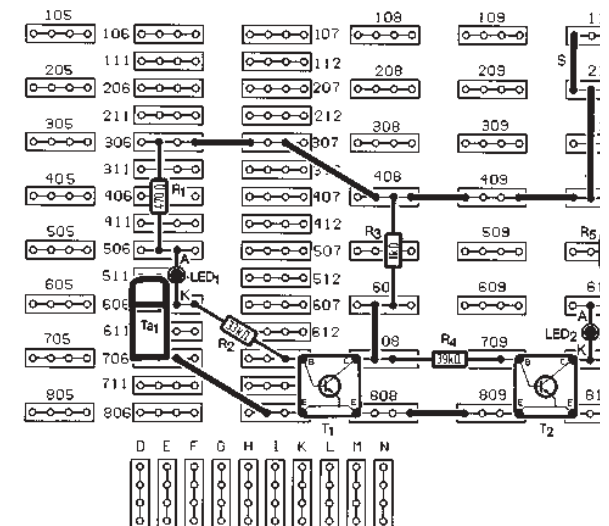
Figuur 76. Emitterschakeling ("collectorvolger") - altijd in de contramine: schakelaar aan de ingang gesloten ("ja") - transistor-hoofdkring gesperd.



Figuur 78. 2 x nee = ja: een druk op de toets en de stroom vloeit door LED 1. Tegelijkertijd vloeit er ook stroom door LED2.



Figuur 77. Het opbouwschema bij figuur 76.



Figuur 79. Het opbouwschema bij figuur 78.

49

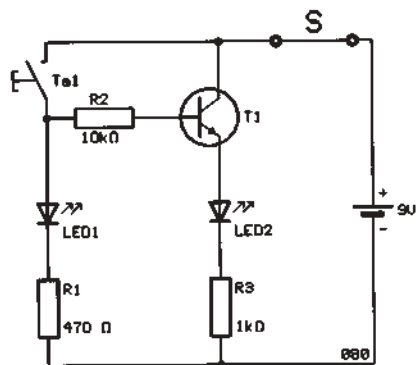
gaan onze inverter veranderen en uitbreiden volgens de aanwijzingen in figuur 78. We stellen vast: LED1 en LED2 blijven donker! Dan drukken we op Ta1 en - de beide licht-emitterende diodes lichten op! Een omslachtige manier om tot uitdrukking te brengen "2 x nee = ja"? In schakelingen die later aan de orde komen zullen we zien, hoe nuttig dit kan zijn.

Collectorschakeling

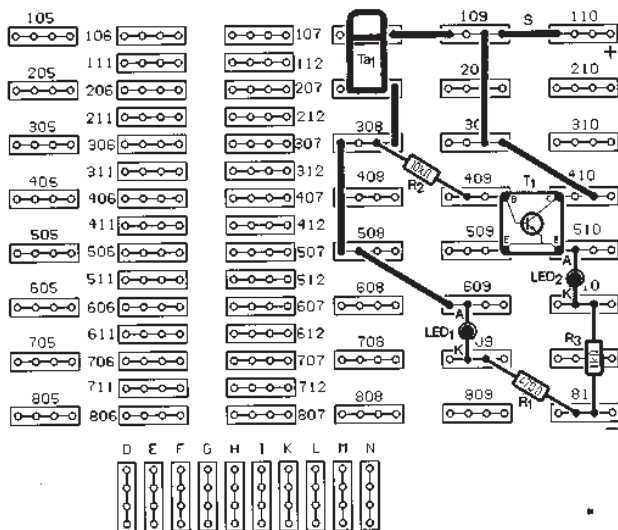
Verhoogd met de zwakke basisstroom komt de collectorstroom aan de emitter weer naar buiten. Dan zullen we onze "last" (LED plus R) dus ook wel hierop kunnen aansluiten!

50

We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 80 en zien: LED2 blijft donker zolang Ta1 openstaat. Hetzelfde geldt voor LED1. Als we op Ta1 drukken, lichten ze allebei op.



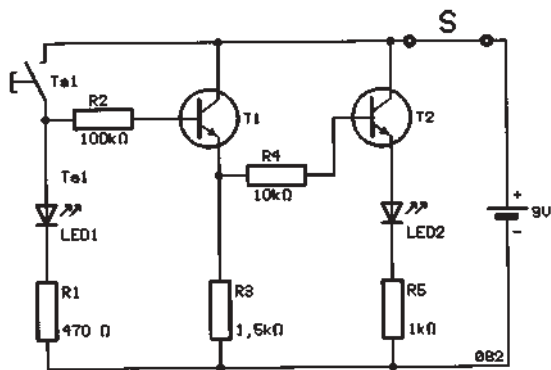
Figuur 80. Collectorschakeling ("emittervolger") - heeft een positieve instelling. Uitgang komt overeen met ingang. Gesloten toets Ta1 (LED1 geeft licht) laat ook LED2 licht geven (transistor doorverbonden).



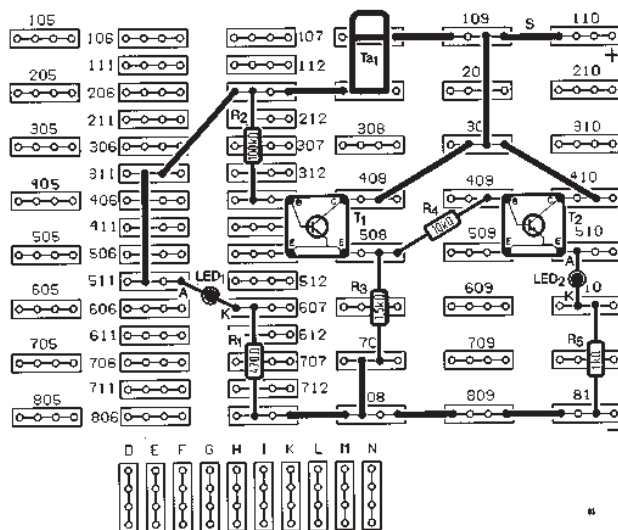
Figuur 81. Het opbouwschema bij figuur 80.

Verklaring: in beide gevallen bevindt de toets zich tussen de basis en de gemeenschappelijke transistoraansluiting voor de in- en uitgangskring. De in figuur 80 weergegeven schakeling, ook wel emittervolger genoemd, antwoordt echter op "ja" aan de ingang ook gehoorzaam met "ja" aan de uitgang.

51 Om dit te bevestigen monteren we ook in deze schakeling een tweede emittervolger achter de eerste (figuur 82). Er verandert niets: ja blijft ja. Beide licht-emitterende diodes lichten op wanneer we op de toets Ta1 drukken.



Figuur 82. 2 x ja = ja. Twee emittervolgers achter elkaar houden vast aan de waarheid.



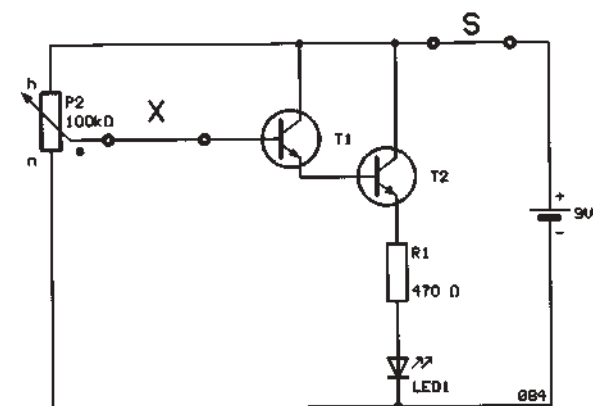
Figuur 83. Het opbouwschema bij figuur 82.

B x B - de stroomlawine

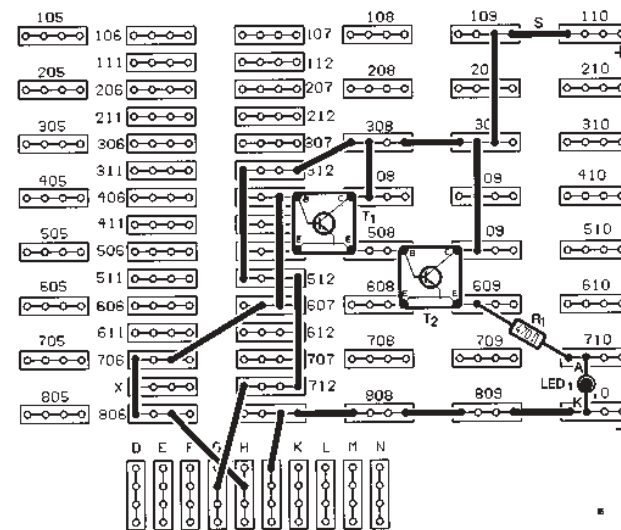
We gaan nog een andere interessante eigenschap van twee achter elkaar geschakelde emittervolgers onder de loep nemen.

52

Daarvoor onderzoeken we de schakeling zoals aangegeven in figuur 84. De looper van de potmeter wordt langzaam van beneden naar boven gedraaid. We houden de licht-emitterende diode in het oog en zien: om de diode helder te laten oplichten, moet de looper tamelijk hoog staan. Heeft de schakeling dus veel stroom nodig? Dat zal de volgende proef uitwijzen.



Figuur 84. Darlington-schakeling - een gevoelige sensor. Heeft weliswaar veel stuurspanning nodig (P2 ver opdraaien), maar weinig stroom. LED1 licht zelfs op als je het droge topje van je vinger gebruikt i.p.v. de brug X.



Figuur 85. Het opbouwschema bij figuur 84.

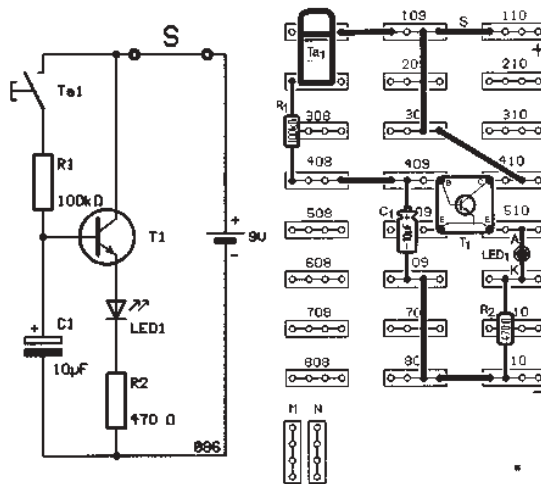
53

We verwijderen de brug X en gebruiken in plaats daarvan onze droge(!) vingertop. Tot onze verbazing stellen we vast: een lichte aanraking van de beide contact-opervlakken volstaat al om de LED helder te laten oplichten! Dat werkt zelfs wanneer we met iedere hand een van de oppervlakten aanraken.

We bekijken de schakeling eens wat beter en stellen vast: aan de stuurzijde moet nu enerzijds niet minder dan de dubbele basis-emitter-drempelspanning worden overwonnen. Bovendien volgt "achter" de tweede emitter nog de drempelspanning van de licht-emitterende diode. En zodra stroom begint te vloeien, komt er over de weerstand in de emitterkring ook nog een spanning te staan - alles bij elkaar een hele hoop. Tot zover het slechte nieuws. Nu het goede: voor een uitgangsstroom van bijvoorbeeld 10 mA is in een dergelijke schakeling eerst voor T2 een basisstroom van 10 mA, gedeeld door B, de stroomversterkingsfactor, vereist. Laten we laag beginnen en zeggen $B = 100$. Dan heeft T2 100 μA nodig. Meer hoeft T1 niet te leveren. Als hij eveneens een versterkingsfactor heeft van $B = 100$, dan heb je voor de hele schakeling de belachelijk lage ingangsstroom van 1 μA nodig. Conclusie: deze transistorcombinatie, die Darlington-schakeling wordt genoemd, werkt als een transistor met een stroomversterking van $B1 \times B2$. Zij kan ook met belasting in de collectorkring worden toegepast.

Emittervolger als "vertraagd licht"

We hebben al eerder, in hoofdstuk 6, een transistor gebruikt om processen in condensatoren duidelijker zichtbaar te maken. De zwakke basisstroom zorgt voor een tamelijk langzame ontlading van een condensator. De ontladingskromme is zoals we hebben gezien een exponentiële functie. Insiders weten dat die ontlading aan het eind nogal traag verloopt. Dat gebied kun je maar beter niet gebruiken. Hier biedt de emitter-volger uitkomst.



Figuur 86. Condensator als "tijdelijke batterij": door een druk op Ta1 wordt C1 via R1 opgeladen - LED1 licht op. Als je de toets loslaat, zorgt C1 nog een poosje voor basisstroom én licht.

54 We bouwen de schakeling op volgens de aanwijzingen in figuur 86 en drukken op de toets. Eerst gebeurt er een tijdje niets. Dan licht de LED op. Vervolgens laten we de toets los en - de LED blijft licht uitstralen. Met langzaam afnemende lichtintensiteit. Via de toets die we in werking hebben gesteld, hebben we de condensator vanuit de batterij opgeladen. Die is zodoende zelf een "tijdelijke batterij" geworden. Zijn spanning, die door de basisstroom langzaam wordt verminderd, zorgt ervoor dat de transistor een poosje in geleiding blijft. De LED dooft wanneer de condensatorspanning ongeveer is gedaald tot de som van de LED-spanning van de LED en de drempelspanning van de transistor.

55 We herhalen de proef met grotere condensatoren: de tijd die nodig is voor het op- en ontladen wordt dienovereenkomstig langer. We verminderen daarom R1 tot 100 Ω . Nu hoef je nog maar even op de toets te drukken. U_C nadert praktisch tot U_B .

Drempel met gevoel

Drempelspanningen zijn afhankelijk van de temperatuur. Dat hebben we al in hoofdstuk 7 gezien. We gaan ons nu bezighouden met de consequenties daarvan en de maatregelen die we daartegen kunnen treffen.

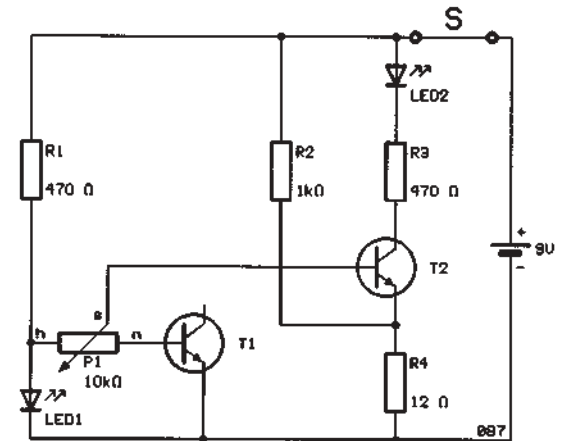
56 We keren terug naar de schakeling zoals aangegeven in figuur 74 en begeven ons naar een donker hoekje. Daar stellen we de potmeter zo in, dat we de LED nog net niet kunnen zien oplichten. Dan verwarmen we de transistor voorzichtig met een fohn. We zien hoe de licht-emitterende diode langzaam oplicht en licht blijft uitstralen, zolang we warmte toevoeren. Daarna dooft ze langzaam. Je kunt het afkoelingsproces versnellen door voorzichtig gebruik te maken van een koude tang of iets dergelijks. Verklaring: bij siliciumtransistoren daalt de drempelspanning telkens met ongeveer 2 mV wanneer de temperatuur 1 $^{\circ}\text{C}$ stijgt. Als de temperatuur wordt verhoogd van 20 $^{\circ}\text{C}$ tot 70 $^{\circ}\text{C}$ heeft de transistor voor dezelfde collectorstroom dus 100 mV minder basis-emitterspanning nodig dan bij kamertemperatuur. Wat kunnen we hiertegen doen?

Compensatie door identieke transistoren

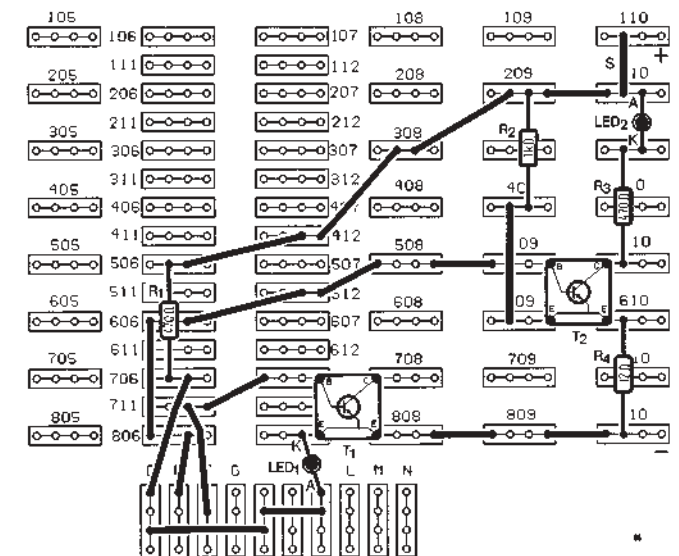
Op de chips van onze geïntegreerde schakelingen werkt het prima, maar ook met twee transistoren van hetzelfde type lukt het heel aardig: het compenseren van temperatuurinvloeden.

57 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 87 en stellen de potmeter zo in dat LED2 (groen) zwak oplicht (dat is dus in het eerste 1/3 van het instelbereik). Dan richten we onze fohn eerst op T1 (houd de warmtestroom eventueel met behulp van een stuk karton uit de buurt van T2): de

lichtintensiteit wordt minder. Vervolgens verwarmen we alleen T2: LED2 licht weer feller op. Dan laten we het zaakje afkoelen en behandelen de beide transistoren gelijktijdig met de fohn - de lichtintensiteit verandert bijna niet meer!



Figuur 87. Warmte-invloeden: potmeter instellen op zwak licht van LED2, breng T2 in een warme luchtstroom; het licht wordt sterker. Vervolgens de warme lucht richten op T1: het licht wordt zwakker. Warme lucht op beide transistoren: vrijwel geen reactie meer.



Figuur 88. Het opbouwschema bij figuur 87.

Verklaring: Als T1 wordt verwarmd, daalt de B-E-spanning van T1 en dus ook de voor T2 ingestelde spanning tot onder de drempelwaarde. Als daarentegen T2 wordt verwarmd, leidt de ingestelde spanning tot een sterkere collectorstroom. Als ze allebei tegelijkertijd worden verwarmd, wordt het effect van de veranderingen op de collectorstroom van T2 ongedaan gemaakt. Zoiets wordt temperatuurcompensatie genoemd.

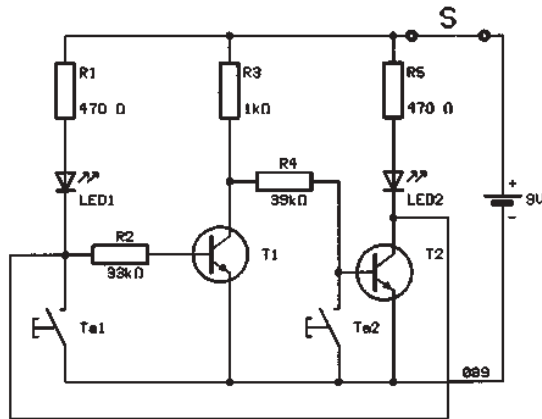
9. Met z'n tweetjes geen probleem: het schakelen van transistoren

Waar je in je eentje moeite mee hebt, lukt veel beter in teamverband. Bij schakelingen zijn overgangen ongewenst. Een transistor die maar "half gesloten" is, zet vermogen om en wordt warm. Dit vermogen wordt aan de omgeving afgegeven en dus niet voor het gewenste doel gebruikt. Zulke overgangen worden voorkomen door samen te werken. We zullen nu "combinaties" van transistoren leren kennen die interessante effecten opleveren. Zij vormen ook belangrijke elementaire bouwstenen van computers. Hiervoor keren we terug naar figuur 78 ("2 x nee = ja").

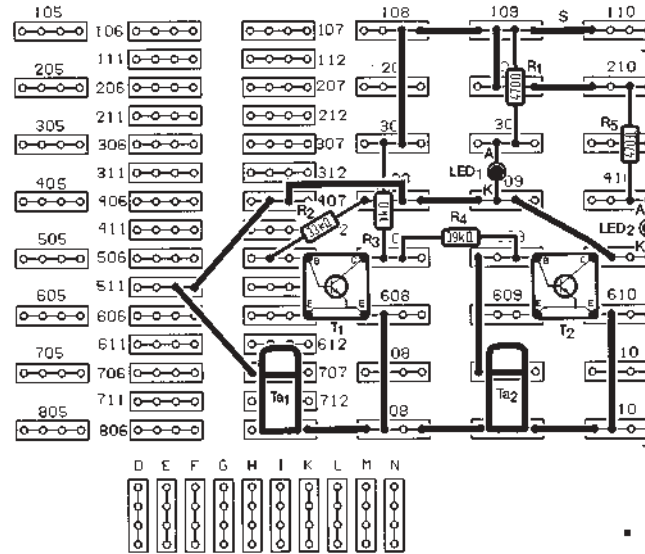
58

In figuur 89 is in tegenstelling tot figuur 78 de collector van T2 verbonden met de bovenste aansluiting van Ta1. We stellen vast: aanvankelijk gebeurt er niets. Nu drukken we op Ta1. Zoals te verwachten was lichten beide diodes op. Als we Ta1 loslaten, blijven de diodes gewoon licht uitstralen! Pas een druk op toets Ta2 sorteert effect. Daardoor leiden we de basisstroom voor T2 tijdelijk om de transistor heen naar de min-pool. Nu pas doven de beide licht-emitterende diodes.

Onze conclusie luidt: als je van twee invertoren een "ring" vormt door een terugkoppeling van de uitgang op de ingang, ontstaat er een schakeling met twee stabiele toestanden. We gaan die nu meer geschikt maken voor het volgende doel:



Figuur 89. "2 x nee = ja" met terugkoppeling resulteert in twee stabiele toestanden.



Figuur 90. Het opbouwschema bij figuur 89.

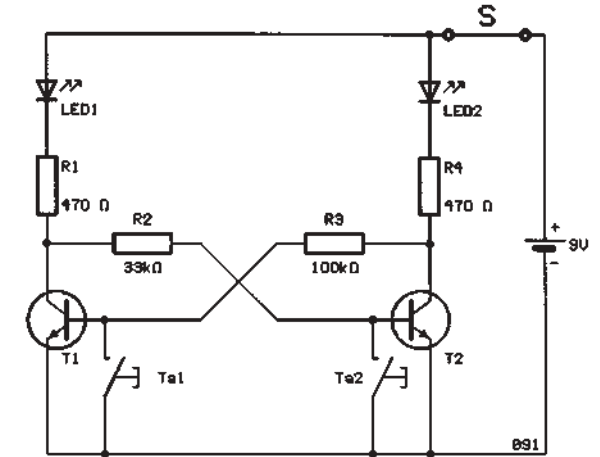
Stabiele dubbelzinnigheid: de statische flip-flop

Deze schakeling is bekend onder meerdere namen: van de plastische aanduiding flip-flop je hoort het gewoonweg "knippen") tot de officiële benaming *bistabiele multivibrator*. De schakeling slaat de toestand die je invoert op in het geheugen: de ene transistor geleidt, de andere spert. Totdat je het geheel naar de andere toestand overschakelt. Dan blijft die toestand stabiel. Het kleinste geheugen ter wereld.

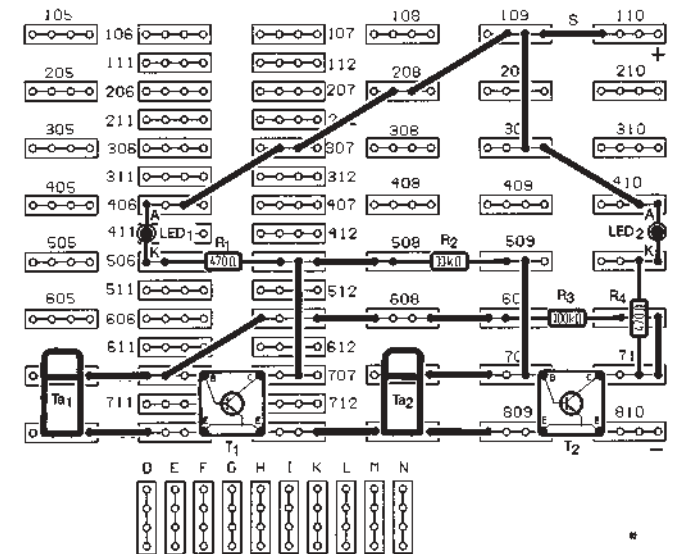
59

We bouwen een dergelijke geheugencel volgens de aanwijzingen in figuur 91. De licht-emitterende diodes geven de toestand aan. We stellen vast: als de batterij wordt aangesloten, licht LED2 op. LED1 blijft donker. Door op Ta1 te drukken verandert er niets. Als je echter even op Ta2 drukt, wordt de situatie omgekeerd. Dat blijft zo totdat je op Ta1 drukt. Dan keer je terug naar de begintoestand.

Figuur 91 laat zien: T1 en T2 hebben niet dezelfde mogelijkheden, zelfs niet wanneer de gegevens absoluut gelijk zijn. R2 heeft een lagere waarde dan R3. Bij het inschakelen van de batterij krijgt T2 een grotere basisstroom. Zijn collectorspanning is daarom lager dan die van T1. Als gevolg daarvan krijgt T2 nog minder basisstroom en stijgt zijn collectorspanning. Aan het einde van het inschakelproces is T2 nagenoeg ingeschakeld voor min (U_{CE} minder dan 0,3 V). T1 daarentegen is "volkomen gesloten". Dat hele proces voltrekt zich bliksemsnel. Alleen op papier kun je het "in vertraagde beelden" weergeven - een goede manier om schakelfuncties te leren begrijpen!



Figuur 91. Statische flip-flop, hersencel van computers.



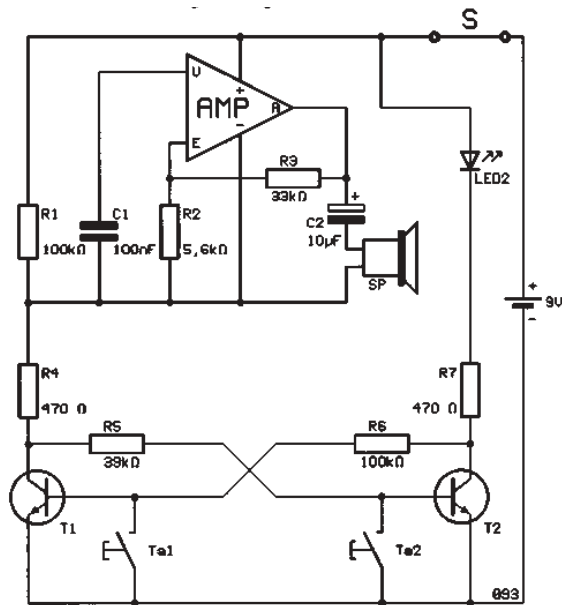
Figuur 92. Het opbouwschema bij figuur 91.

De flip-flop als vrijgezel

Op de chips van onze computers zijn vele tienduizenden flip-flop cellen met elkaar verbonden. Maar ook in z'n eentje is de "FF" een kranig baasje. Dan zijn het de details waar het op aankomt.

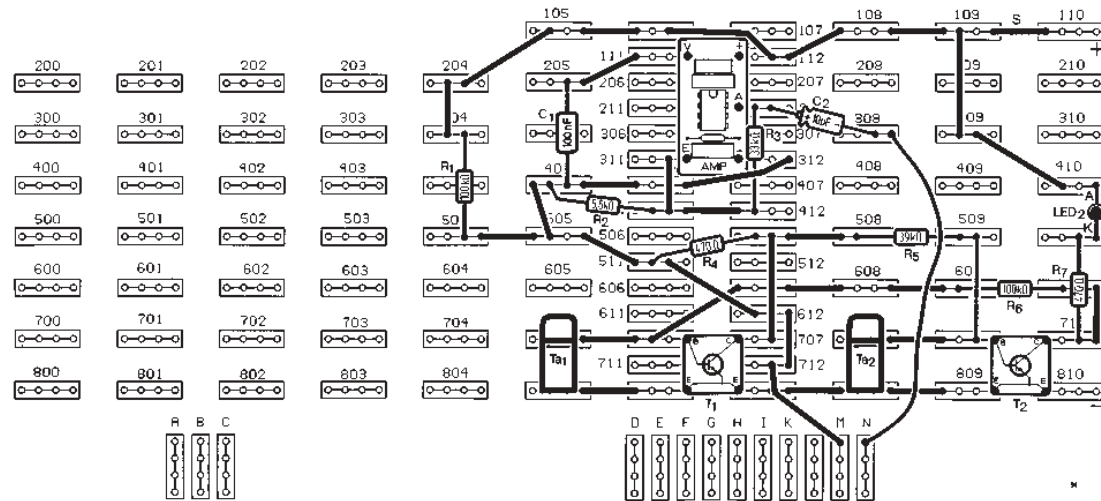
60 We verwisselen in figuur 91 $R2$ en $R3$. Dan blijkt: als we nu de batterij inschakelen, licht LED1 op. De waarde van deze weerstanden is dus inderdaad bepalend voor de inschakeltoestand van onze flip-flop. Dankzij dit trucje met de waarden is de FF een betrouwbare partner. Bijvoorbeeld in alarminstallaties.

61 We breiden de schakeling zoals aangegeven in figuur 91 uit met de versterkermodule uit onze experimenteerdoo. We voorzien deze module van dezelfde schakeling die we gebruiken hebben bij de geestenbezwering. Je krijgt dan een toonfrequentiegenerator. In ruststand straalt LED2 licht uit. Deze keer wordt de module echter ingeschakeld met T1 (figuur 91). Dat doen we door de module eenvoudigweg in plaats van LED1 aan te sluiten op de flip-flop. R4 begrenst de stroom. Daardoor blijft de collectorspanning U_{CE} over T1 klein wanneer deze in geleiding is.



Figuur 93. De flip-flop als solist: na inwerkingstelling via Ta2 continu alarm. Opheffen (wissen) alleen met Ta1.

We stellen vast: de luidspreker geeft geen geluid. Als we op Ta2 drukken, wordt het alarm in werking gesteld. Het alarmsignaal blijft klinken, ook nadat we Ta2 hebben losgelaten. De FF heeft dus "onthouden" dat er iets aan de hand was. Terugkeer naar de ruststand is alleen mogelijk met Ta1. Opmerking: in plaats van Ta2 wordt in de praktijk bijv. een schakelaar met magnetische bediening (reed-relais) aan een deurkozijn bevestigd.



Figuur 94. Het opbouwschema bij figuur 93.

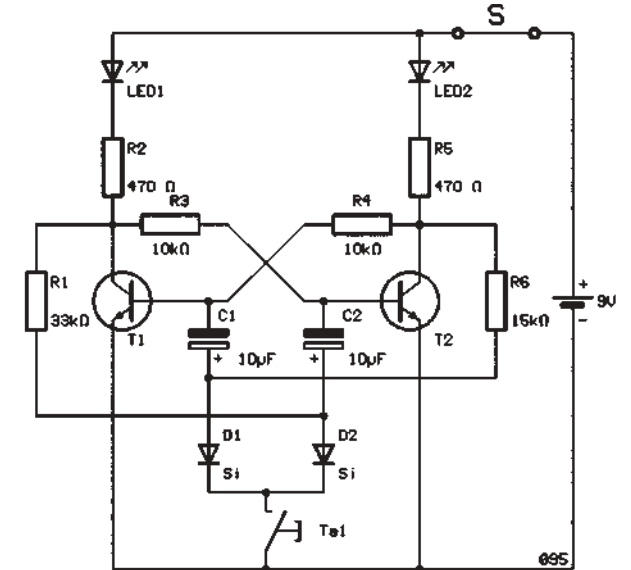
De schakelmagneet wordt zodanig op de deurvleugel gemonteerd dat hij, wanneer de deur wordt geopend, "in het voorbijglijden - heel even" het contact sluit. Dat volstaat om een aanhoudend lawaai te ontketen. Inbrekers schrikken daarvoor terug. De Zaak voor Twee is opgelost.

Eén in plaats van twee: dynamische flip-flop

Zelfs met maar een toets kun je een FF heen- en weerschakelen. (In het Engels heet dat: *to toggle*.) Al kost het wat meer. Maar dat verhoogt dan ook de gebruikswaarde.

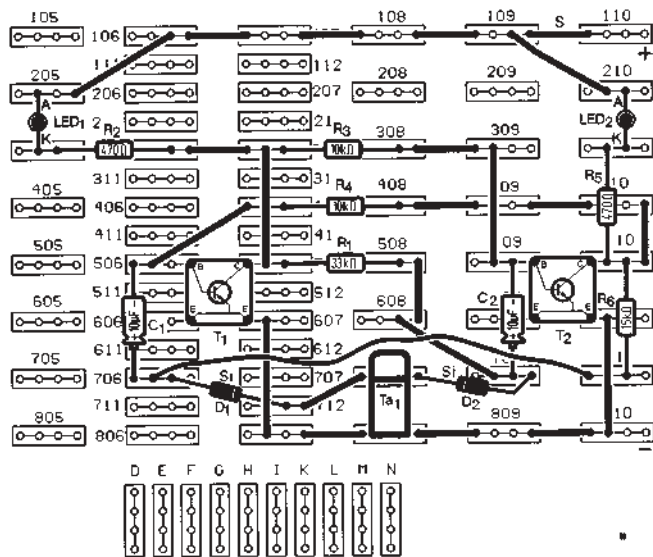
62 De schakeling zoals aangegeven in figuur 95 neemt al heel wat plaats in op onze montageplaat. In vergelijking met figuur 91 komen er 2 weerstanden, 2 diodes en 2 elco's bij. Let dus bij het monteren goed op de richting (bij de elco's is de rondlopende inkeping = plus, bij de diodes de ring = kathode). Nadat we de batterij hebben aangesloten, zien we: de ene LED geeft licht, de andere is donker. We drukken een paar keer op Ta1 en stellen vast: door elke druk op de toets licht de diode die net donker was, op en de andere dooft. De toets heeft zich opgewerkt tot een wisselschakelaar! Dat hebben we te danken aan de condensatoren. De statische besturing heeft zich ontwikkeld tot een dynamische. (Dynamisch omdat ze op veranderingen reageert.) Hoe gaat dat in z'n werk?

Condensatoren zijn - zoals we weten - reservoirs voor elektronen. Met behulp van hun verschillende ladingen kunnen we onze schakeling besturen. Welke elco op een bepaald moment is opgeladen, wordt bepaald door de toestand van de transistoren



Figuur 95. "Vluchtige" besturing: dynamische flip-flop - één toets is voldoende!

(open of gesloten). Als LED1 licht uitstraalt, dan is op dat moment Ta1 doorverbonden. C1 wordt opgeladen. De laadstroom vloeit (in technische stroomrichting) van de plus van de batterij via LED2, R5 en R6 naar de plus-kant van C1. Door "werking op afstand" komt hij als stuurstroom via de isolatielaag van C1 in de basis-emitterovergang van T1 terecht. Parallel daarmee komt



Figuur 96. Het opbouwschema bij figuur 95.

laadstroom praktisch tot nul daalt, wanneer de condensator is opgeladen, blijft de stroom via R4 doorvloeien. T1 blijft dus in geleiding. C2 zit intussen nagenoeg zonder lading. Daar zorgen R1 en R3 voor. Als we even op Ta1 drukken wordt alles om-gekeerd. Dat komt door de "batterij" C1. Die wordt via Ta1 en D1 met de min op de basis en met de plus op de emitter aangesloten. (D1 en D2 ontkoppelen de beide stroomkringen.) De negatieve spanning aan de basis spert de npn-transistor. Die heeft immers om te kunnen geleiden positieve basisspanning nodig. Je kunt het ook als volgt bekijken: de via R4 aangevoerde basisstroom wordt door C1 tijdelijk "weggezogen".

Insider-info 10

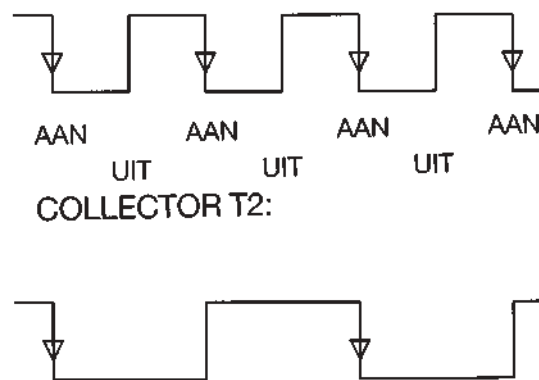
Je zult wel begrijpen dat de hoogte van de spanning die de sperrende lagen aankunnen beperkt is. Op de informatiebladen (die het "signalement" van onze bouwelementen bevatten) vind je hierover meer gegevens. Licht-emitterende diodes en de basis-emitterovergangen van bipolaire transistoren moet je niet met meer dan 5 V belasten. Al hangt het ook van de beschikbare energie af, of "een ietsje meer" al gevaarlijk is. Gelukkig vinden onze transistoren de negatieve condensatorspanning voor het sperren nog niet erg. Immers, de energie die de condensator te bieden heeft, is te gering.

Plus gedeeld door twee

Laten we eens wat gaan spelen met de wisselschakelaar. Bij elke tweede druk op de toets schakelt ook de collector van T2 om naar min. Er ontstaat dus een "negatieve uitgangspuls". Of anders gezegd: 100 ingangspulsen = 50 uitgangspulsen. We hebben zoëven een frequentiedeler ontdekt. Voor een goed begrip: de frequentie is een maat voor de snelheid waarmee een regelmatig herhaalde gebeurtenis plaatsheeft. Laten we eens kijken naar een tandwiel in een aandrijvingsmechanisme. Bij een omwenteling per seconde bedraagt de frequentie precies 1 Hz (Hertz). Indien de beweging van dit tandwiel wordt overgebracht op een tandwiel met twee keer zoveel tanden, zal dit laatste slechts een keer in twee seconden ronddraaien. De omwentelingssnelheid van dit grote tandwiel bedraagt dus 0,5 Hz.

Deze reductie bij onze dynamische flip-flop kunnen we beter beschrijven aan de hand van figuur 97. We onderzoeken de van Ta1 afkomstige ingangspulsen en de reactie aan de collector van T2. We kunnen deze pulsen naar een tweede flip-flop leiden. T2 uit de eerste FF neemt dan de functie van Ta1 uit de tweede FF over. Het is volkomen duidelijk: ook hier wordt gedeeld - tussen de eerste ingang en de laatste uitgang 2:1:0,5 of wel 4:1! Met drie flip-flops kom je tenslotte uit op 8:1. Dit hele proces wordt tegenwoordig veel beter en op een uiterst klein oppervlak uitgevoerd door geïntegreerde schakelingen zoals de 4024 in onze experimenteerdoos. Daarover later meer. Ook in z'n eentje is deze flip-flop goed te gebruiken. Dat blijkt uit het volgende experiment.

TOETS:



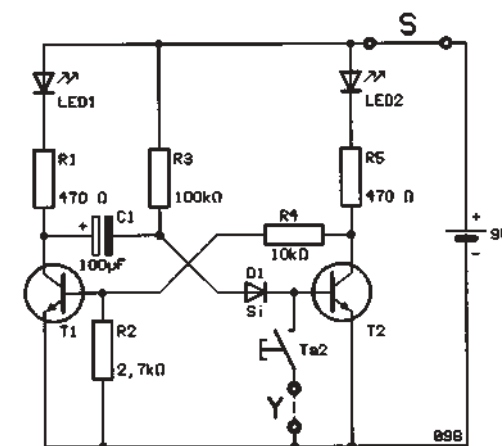
Figuur 97. Pulsdiagrammen van de toets en de uitgang van T2: slechts bij iedere tweede druk op de toets reageert de licht-emitterende diode LED2.

63 We vervangen in figuur 95 Ta1 door de fototransistor uit onze experimenteerdoos. Geheugensteuntje voor de montage: het korte pootje is van de collector. Dit moet worden aangesloten op D1, D2. In een donker hoekje richten we een zaklantaarn met een goed gebundelde lichtstraal op de fototransistor en knippen de zaklantaarn een paar keer aan en uit. We stellen vast: de flip-flop kan ook met lichtpulsen worden omgeschakeld. Licht betekent dat de fototransistor geleidt (schakelaar aan). Een kokertje van zwart papier dat over de fototransistor wordt geschoven, zorgt ervoor dat het verschil in geleidingsvermogen tussen "licht" en "geen licht" groot genoeg is.

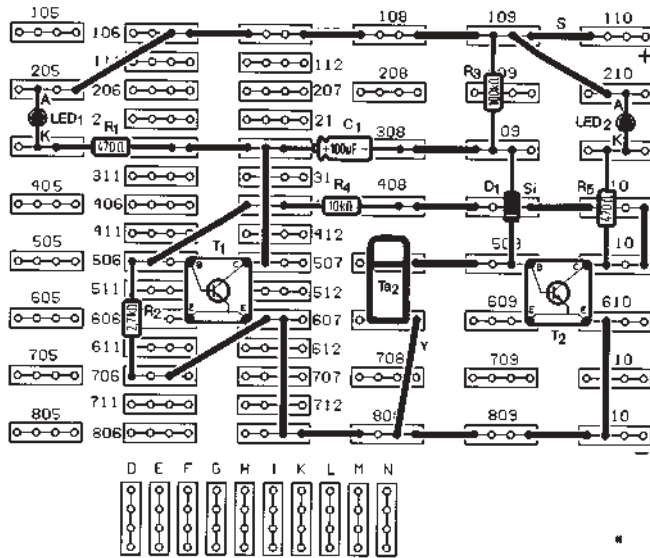
Dynamiek van een andere soort: de monostabiele multivibrator

De volgende kleine veranderingen hebben een groot effect.

64 We brengen een kleine wijziging aan in de opbouw van onze dynamische flip-flop (figuur 98). In stabiele toestand zien we dat LED2 licht uitstraalt. Als we (even) op Ta2 drukken, dooft LED2 en licht LED1 op. Niets nieuws? Wacht maar eens af! Na een paar seconden wordt de oude toestand hersteld. Nu is het weer LED2 die oplicht. Dat kun je zo vaak herhalen als je wilt. 't Wordt een tikkeltje anders als we heel lang op Ta2 drukken. Wanneer we de toets loslaten blijft LED1 nauwelijks nog een seconde licht uitstralen.



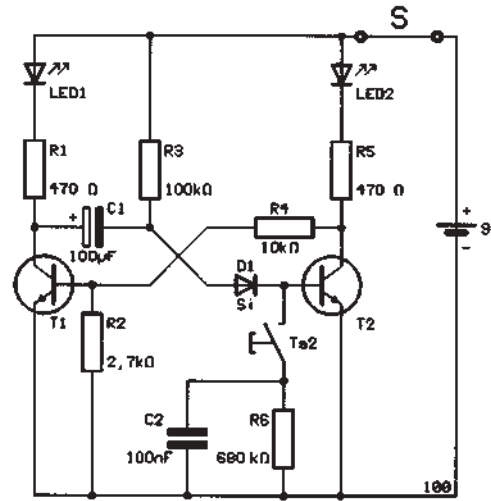
Figuur 98. Stabiel met "vluchtige" toestand: de monoflop. R3 en C1 bepalen iedere tweede druk op de toets reageert de licht-emitterende diode hoelang LED1 na een druk op de toets licht blijft geven.



Figuur 99. Het opbouwschema bij figuur 98.

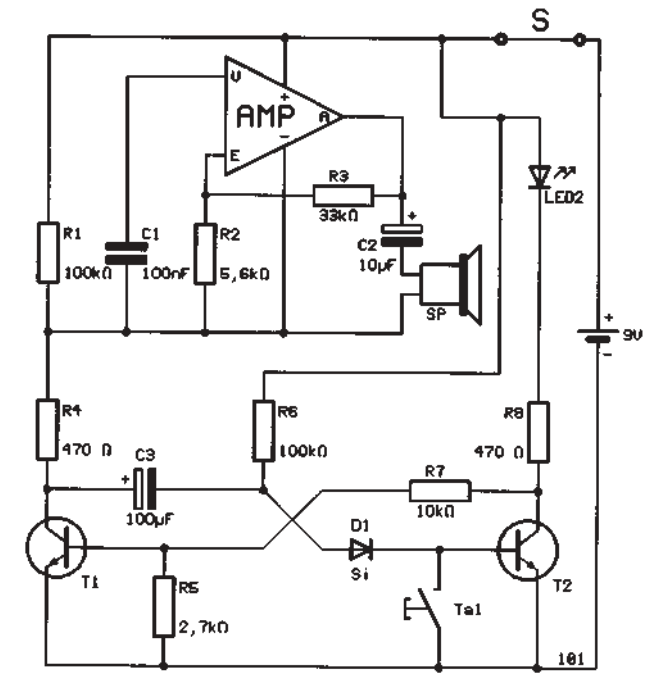
65 We overbruggen D1 en herhalen de proef waarbij we even op de toets drukken. Nu geeft LED1 aanzienlijk korter licht. Als je te lang op Ta2 drukt, licht LED2 vrijwel direct nadat je de toets hebt losgelaten, weer op.

Laten we de resultaten eens op een rijje zetten: de beide transistoren hebben wat de besturing betreft niet dezelfde mogelijkheden. Terwijl T2 via R3 rechtstreeks vanuit de plus wordt gestuurd, krijgt de basis van T1 zijn stroom pas via de spanningsdelers R5 - R4 - R2. Bovendien is C1 nog leeg wanneer de batterij voor het eerst wordt ingeschakeld. De laadstroom van C1 ondersteunt dus T2 bij het inschakelen. Zodra T2 via R3 echter volledig in geleiding gaat, is er voor de basis van T1 nagenoeg geen spanning meer over. C1 begint dus op z'n dooie gemak met het opladen. Zijn spanning bereikt echter nooit het niveau van de batterijspanning, want LED1, D1 en het B-E-traject van T2 zijn in serie geschakeld. De lading van C1 gaat pas een rol spelen, wanneer T2 met behulp van Ta2 tijdelijk wordt gesperd. Dat wil zeggen dat de collectorspanning van T2 oploopt tot ongeveer 7 V en T1 begint te geleiden. Zodoende komt onze "condensatorbatterij" met de plus tegen de emitter, dus tegen de min-kant van de schakeling aan te liggen. Tijdelijk heerst dus op het verbindingspunt van R3, C1 en D1 de laadspanning van C1 met negatieve polariteit. Voorlopig blijft T2 dus zeker gesperd. R3 begint echter meteen te compenseren: plus 9 V met ongeveer min 6 V. Daardoor daalt de condensatorlading met de tijdconstante $R3 \times C1$. (Wat de tijdconstante is hebben we in hoofdstuk 6 geleerd.)

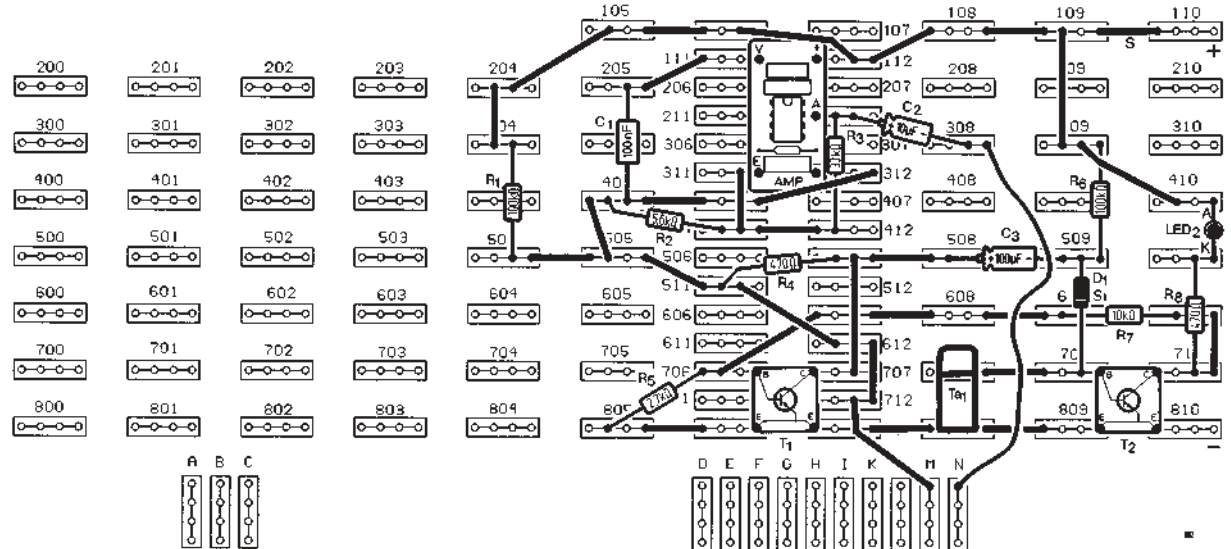


Figuur 100. Dynamische starttoets bij de monoflop: je kunt er op drukken zolang als je wilt!

Daar komt nog bij dat de laadstroom van C1 ...maar dat hebben we al gehad. Bovendien wordt nu duidelijk dat alles veel sneller gaat zonder D1 - T2 verbindt dan namelijk al tussen 0,6 V en 0,7 V weer door.



Figuur 101. Mono-alarm: de tijdsduur ervan is zeer beperkt.



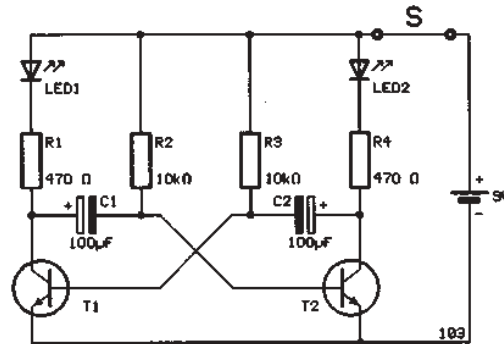
Figuur 102. Het opbouwschema bij figuur 101.

Een dergelijke schakeling die maar een ("mono") stabiele toestand heeft, wordt een monostabiele multivibrator genoemd, of wat minder deftig een monoflop. Nu zitten we alleen nog met het vervelende probleem van de toets waar te lang op is gedrukt. Ook voor dit probleem biedt "condensator-dynamiek" de oplossing.

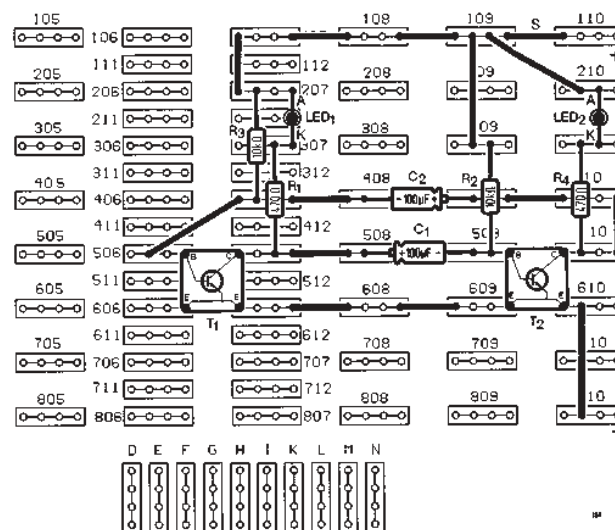
66 We breiden figuur 98 uit met een kleine truc-schakeling. We verwijderen de brug Y in figuur 99 en monteren in plaats daarvan C2 en R6 zoals aangegeven in figuur 100. We kunnen dan net zolang op Ta2 drukken als we willen. En tot ons genoegen stellen we vast: LED1 geeft altijd even lang licht. En als we heel lang op de toets blijven drukken, dooft de diode zelfs voordat we de toets hebben losgelaten. We verminderen de waarde van C1 van 100 μ F tot 10 μ F en boeken hetzelfde resultaat. Ook als we de waarde van R3 verlagen van 100 k Ω tot 10 k Ω . Bovendien blijkt: hoe hoger de waarde van C1, des te langer geeft LED1 licht, hoe lager de waarde van R3, des te korter straalt ze licht uit. Maar pas op: gebruik geen te hoge waarde bij R3 (bijv. 680 k Ω): T2 zal dan niet meer goed in geleiding zijn! Er is niet veel fantasie voor nodig om je voor te stellen wat je allemaal kunt doen met zo'n "korte-tijd-pulsgever".

67 We monteren onze monoflop in plaats van de flip-flop in figuur 93. Nu klinkt er slechts een kort alarm wanneer de deur wordt geopend. Dat zou toch een handig winkelbelletje zijn voor tante Emma, of niet? Eigen dynamiek: de astabiele multivibrator. Als je vrolijk op de toets blijft drukken kun je de dynamische flip-flop ook als dubbel knipperlicht gebruiken waarvan de lampjes om de beurt aan en uit gaan. Maar ook hier werkt een elektronische schakeling beter.

68 We veranderen de opbouw van figuur 98 een beetje (zie figuur 103). Inderdaad, het licht knippert vanzelf! Onvermoeibaar, zoals het een automaat betaamt. We stellen de gebruikelijke vraag: hoe gaat dat in z'n werk? In feite hebben we dit effect stapje voor stapje bereikt. Laten we nog maar eens naar de monoflop kijken. De zojuist opgebouwde "AMV" (in de vaktaal van de technici de aanduiding voor de astabiele multivibrator) is eigenlijk nagenoeg een dubbele uitvoering van de linkerhelft van de "MF": R2 en R3 leveren de stroom voor de basisaansluitingen, C1 en C2 zorgen voor beweging. Aangezien beide gedeeltes echter via condensatoren met elkaar zijn verbonden, blijft het aan geen van beide kanten stabiel. In dit geval zijn de beginvoorwaarden gelijk. Daarom wint in eerste instantie de transistor met de grootste versterking. Als eenmaal "de richting is ingeslagen" verloopt het proces verder als volgt: Stel, T1 is net in geleiding gegaan. De plus-kant van C1 bevindt zich dan aan de min-aansluiting van de batterij en spert zodoende T2. Terwijl R2, die groter is, nog bezig is met het omladen van C1, wordt C2 veel sneller opgeladen tot meer dan 6 V - vanuit de



Figuur 103. Veelzijdig talent: de astabiele multivibrator. C1 en C2 zorgen voor beweging; samen met R2 en R3 bepalen zij hoelang elke toestand blijft bestaan



Figuur 104. Het opbouwschema bij figuur 103.

gesperde collector van T2 via de basis-emitterovergang van T1. Parallel daarmee vloeit via R3 basisstroom naar T1. Maar nu bereikt de lading van C1 het kritieke niveau: van -6 V (gerelateerd aan de basis van T2 in de richting van min) is hij door de stroom via R2 tenslotte tot ongeveer +0,6 V opgeladen. Dat volstaat om T2 te laten geleiden. Daardoor wordt de plus-laag van C2 steeds meer naar min "getrokken". Zodoende leidt hij de basisstroom van T1 af. De collectorspanning van deze stijgt, omdat een daling van de basisstroom een daling van de collectorstroom tot gevolg heeft. Op die manier ondersteunt C1 de basisstroom voor T2. Als

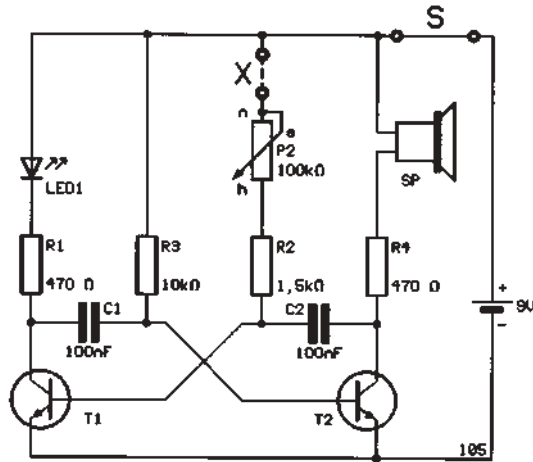
T2 dus eenmaal begint te geleiden gaat de rest tamelijk snel. Daarna is het weer even rustig - LED2 geeft licht, LED1 is donker. Totdat de spanning aan de min-kant van C2 gestegen is tot de drempelwaarde van de basis van T1. Hoe het verder gaat, weten we al. Het resultaat van dit voortdurend heen- en weervloeden zijn blokgolven aan de beide collectoren. Een LED die oplicht, geeft steeds de geleidingstijd van de betreffende transistor aan. Als de bouwelementen dezelfde waarde hebben, zijn hun geleidingstijden gelijk. Bij nader inzien is het dus hoofdzakelijk dit tweetal, bestaande uit basisweerstand en condensator, dat deze tijden bepaalt. Het "linker" paar is verantwoordelijk voor de spertijd van de "rechter" transistor (dus de geleidingstijd van de linker), het "rechter" paar voor de spertijd van de "linker" transistor.

We controleren deze beweringen met enkele waarden voor R2, R3 en C1, C2. In de symmetrische eerste opstelling knippen de LED's rustig en gelijkmatig. Zo'n schakeling is geschikt voor een bakenlicht e.d. Bij kleinere capaciteiten wordt het onrustiger, maar dat kun je weer compenseren door weerstanden met hogere waarden te gebruiken - zolang ze nog voldoende basisstroom doorlaten.

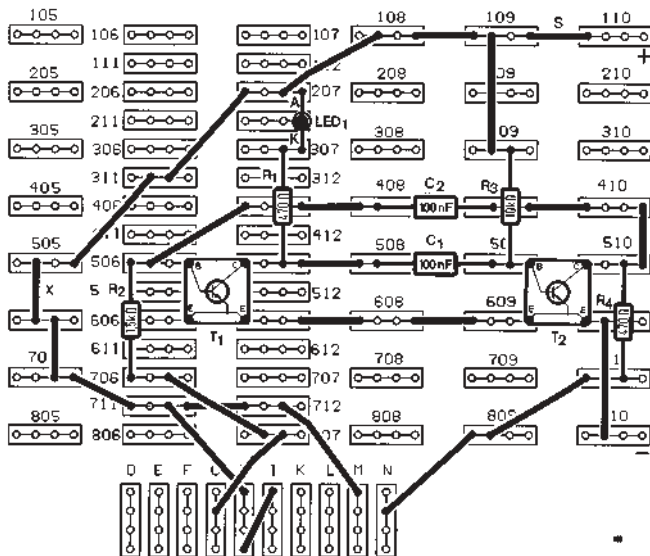
Voor het oog én het oor

Wat we al wisten: in de opgaaf van de frequentie komt tot uitdrukking, hoe vaak per seconde een toestand wordt herhaald. Onze ogen zijn in staat dit te onderscheiden tot maximaal ongeveer 20 Hz. Dan gaat het flikkeren over in continu licht geven. Bij hogere frequenties kunnen we beter een beroep doen op onze oren.

70 In plaats van LED2 in figuur 103 sluiten we de luidspreker uit onze experimenteerdoos aan. Bovendien voeden we, zoals aangegeven in figuur 105, de basis van T1 via de potmeter van 100 k Ω . Van de condensatoren gebruiken we de beide exemplaren van 0,1 μ F. Onze multivibrator betreedt nu het rijk der tonen. Laten we eens wat aan P2 draaien en luisteren naar wat we te horen krijgen! Er worden frequenties bereikt die variëren van ongeveer 150 Hz tot iets minder dan 2 kHz. Daarmee kun je vast muziek maken! Bijvoorbeeld zo: een toets in plaats van brug X, een hand aan de knop van de potmeter en de andere aan de toets. Een beetje oefening volstaat om te weten te komen in welke positie de potmeter moet staan om bepaalde tonen op te wekken. Je draait aan de knop en drukt op de toets, terwijl je af en toe een beetje bijstelt - en het resultaat klinkt alsof je in Hawaii op het strand ligt... En als je de muziek te zacht vindt, verlaag je de waarde van R4 tot 100 Ω . Al vloeit er dan wel veel stroom, zodat je op den duur goedkoper uit bent met de KOSMOS-nettransformator X.



Figuur 105. Wie niet kijken wil, mag luisteren: de multivibrator voor de geluidsfrequentieband (luidspreker i.p.v. LED2). Groter volume door toepassing van 100 Ω voor R4. LED1 dient alleen nog maar om aan te geven dat alles "goed werkt". (Handig bij frequenties boven de gehoorrens, bijv. met 6800 pF i.p.v. 0,1 μF.)



Figuur 106. Het opbouwschema bij figuur 105

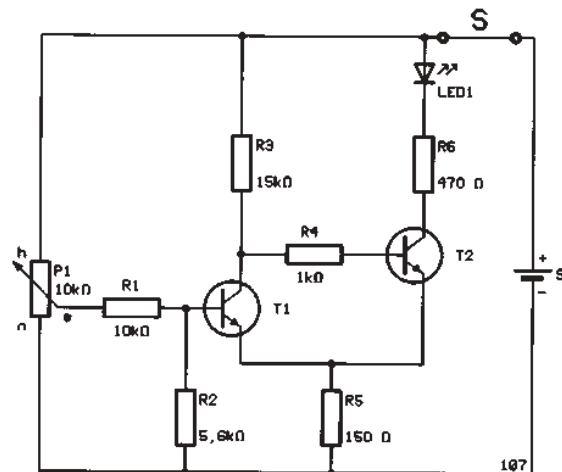
De astabiele multivibrator is dus een uiterst veelzijdige schakeling, niet alleen geschikt voor toepassing in waarschuwingsknipperlichten, maar ook als testsignaalgenerator, elektronische muziek en tenslotte als "elektronisch hart" - als kloksignaalgenerator in digitale schakelingen.

Drempels met sprong: de Schmitt-trigger

Opnieuw verbinden we twee transistoren met elkaar. Maar deze keer "gemengd" - tussen basis en collector en aan de gemeenschappelijke emitterkant.

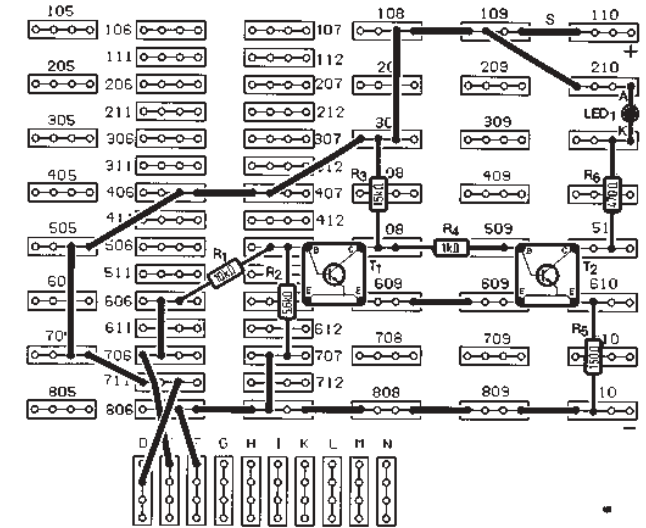
71

Voor dit experiment bouwen we de schakeling op zoals aangegeven in figuur 107 en houden LED1 in het oog. Ze straalt licht uit of is donker - al naargelang de positie van P1. Maar met deze afhankelijkheid is iets merkwaardigs aan de hand. Als je de looper naar beneden draait, wordt de licht-emitterende diode op een gegeven moment ingeschakeld. Als je ze weer wilt uitschakelen, moet je de looper echter tot een heel eind voorbij dit punt opdraaien! Pas dan dooft de diode weer net zo abrupt.



Figuur 107. Op de drempel tussen analoog en digitaal: de Schmitt-trigger met hysteresis.

We gaan op zoek naar de oorzaak van deze reactie en stellen vast: bij een hoge waarde van de ingestelde spanning aan P1 is T1 in geleiding. Hij leidt dus de basisstroom voor T2 af. T2 is gesperd en de LED donker. Als je P1 omlaag draait, daalt de basisstroom van T1, waardoor zijn basis-emitterspanning stijgt. Zodra deze spanning het niveau bereikt van de basis-emitterdrempelspanning van T2 begint deze te geleiden. Daardoor neemt de spanning over R5 toe, want door deze weerstand vloeit nu meer stroom. T1 krijgt zodoende nog minder basisstroom, de collectorstroom van T2 neemt verder toe - totdat het geheel "kijpt".



Figuur 108. Het opbouwschema bij figuur 107.

We hoeven dus alleen maar de potmeter in de kritieke zone in te stellen en de schakeling zorgt zelf voor de rest. Vandaar de naam *drempelwaardeschakelaar*. Nadat de schakeling is gekipt, vloeit er door R5 een relatief hoge stroom. In figuur 107 is dat ongeveer 10 mA. Over R5 staat dus ongeveer 1,5 V. Logisch - om ervoor te zorgen dat T1 weer kan geleiden heb je aan de potmeter een tamelijk hoge spanning nodig - ongeveer 2,1 V in de richting van min. Je moet de potmeter dus een behoorlijk eind opdraaien. Maar dan gaat het ook pijlsnel precies in de tegenovergestelde richting. Aangezien T1 nu steeds meer basisstroom van T2 "wegzuigt", daalt ook de spanning over R5, en T1 blijft er stevig aan trekken. Zijn zwakke collectorstroom (ongeveer 0,6 mA) brengt over R5 amper 90 mV tot stand. Deze reactie wordt hysteresis genoemd. Overigens stellen we vast: het "dode gebied" (de hysteresis) tussen de schakelpunten hangt af van de verhouding van de stromen van de beide transistoren. Het gebied wordt kleiner als je R3 en/of R5 verlaagt en/of R6 verhoogt. Maar wat is eigenlijk het nut van een dergelijke hysteresis? We geven twee voorbeelden waarbij zo'n hysteresis wordt toegepast.

1. Een straatlantaarn wordt bestuurd door een schemerschakelaar. Wanneer het 's avonds alsmaar donkerder wordt gaat de lantaarn aan. En 's morgens gaat hij uit, zodra er voldoende daglicht is. Het kan overdag echter zwaar bewolkt zijn. Het zou niet goed zijn als het aan- en uitschakelpunt zo dicht bij elkaar liggen, dat door de aanwezigheid van een wolk de lantaarn wordt ingeschakeld. Dankzij de uitvinding van meneer Schmitt kunnen we dat vermijden.

2. Een apparaat wordt gevoed door een accu. Het wordt uitgeschakeld wanneer (de waarde van de) accuspanning - door ontladen - de drempelwaarde heeft bereikt. Wanneer het apparaat is uitgeschakeld, neemt de spanning echter weer iets toe. Alleen met behulp van een automatische inrichting als de Schmitt-trigger kunnen we voorkomen dat dit tot een voortdurend en zinloos aan- en uitschakelen leidt. Tenslotte vormen drempelwaarde-schakelaars belangrijke "raakpunten" tussen de analoge en de digitale wereld. Schakelingen die alleen onderscheid maken tussen "ja" en "nee" hebben zo'n tolk nodig: van "niet helder" tot "een beetje helder" = Nee, van "tamelijk helder" tot "stralend helder" = Ja. Het grijze overgangsgebied wordt vermeden.

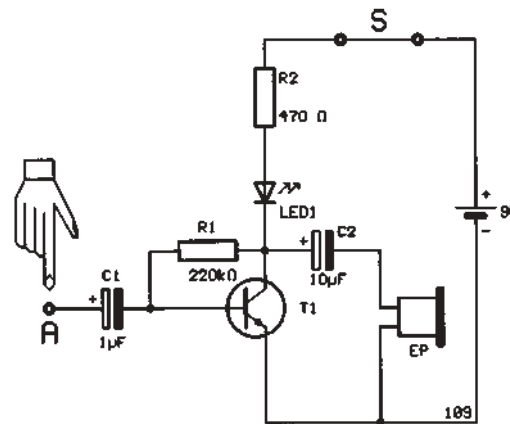
10. De transistor als versterker

De transistor is tegenwoordig het belangrijkste bouwelement in de elektronica - hetzij in zijn oorspronkelijke vorm als "solist" in zijn eigen kastje, hetzij samen met een groot aantal andere, geïntegreerd op een chip. Dat er niet simpelweg sprake is van de transistor weten we al. Verschillende natuurkundige effecten hebben geleid tot allerlei oplossingen en elke oplossing heeft zijn toepassingsmogelijkheden. Bipolaire transistoren met de zonevolgorde npn en pnp genieten vanwege hun degelijkheid in de praktijk nog steeds de voorkeur. De belangrijkste taak van de transistor is het versterken en alle toepassingsmogelijkheden die daarmee samenhangen. We hebben al gezien dat de bipolaire transistor in de eerste plaats een stroomversterker is: een zwakke basisstroom leidt tot een sterke collectorstroom. Als je in de uitgangskring een weerstand invoegt, veroorzaakt de versterkte stroom een spanningsdaling die des te groter is naarmate er meer stroom naar de basis vloeit - totdat de transistor al zijn op dat moment beschikbare ladingdragers heeft gemobiliseerd. Dan is hij verzadigd. Meer kan hij niet hebben. Dit is de bovengrens van het versterkingseffect. De benedengrens is gesteld door het feit dat een ingangsstroom pas kan gaan vloeien wanneer de diodespanning van de basis-emitteringangsdioden is overschreden. Onder ongeveer 0,6 V gebeurt er dus niets. Boven deze waarde moet ervoor gezorgd worden dat de ingangsstroom binnen de toegestane grenzen blijft. Onze minitransistoren beginnen al te protesteren bij een basisstroom van meer dan 50 mA. Stroom kun je begrenzen met behulp van weerstanden. Dat wist je al en mag je trouwens ook nooit meer vergeten. Maar wat te doen, als de spanning van de bron waarvan het "signaal" versterkt moet worden, niet over de ingangsdrempel heen komt of zelfs tegengesteld is in polariteit?

Versterker voor wisselspanning

Een wisselstroom verandert voortdurend van richting zoals we in hoofdstuk 6 hebben gezien. Voor zo'n wisselstroom vormt een condensator dus nauwelijks een obstakel - in tegenstelling tot de gelijkstroom, die door een condensator onherroepelijk wordt gesperd. Wisselstromen zijn voor ons interessant omdat - om

maar eens een voorbeeld te geven - uit de uitgang van een microfoon een wisselspanning komt wanneer er aan de ingang geluidsgolven tegen aanbotsen. Het vervelende is alleen dat deze door de microfoon opgewekte wisselspanning zo miniem is, dat die eerst nog enorm moet worden versterkt, voordat de luidspreker met zo-en zoveel foon kan gaan dreunen. Of juist een heel zacht geluid kan produceren, als wij dat willen. De versterker levert het aan de uitgang af zoals het aan de ingang wordt ingevoerd. Hij versterkt analoog. Weet je het nog? Alleen Ja of Nee - dat is digitaal. Dat hebben we in het vorige hoofdstuk geleerd. Figuur 109 toont een eenvoudige wisselspanningsversterker. De te versterken wisselspanning kan via de condensator (vrijwel) moeiteloos de basis van de transistor bereiken. Voor een eventuele gelijkspanning zou deze weg zijn gesperd. Maar transistoren werken nu eenmaal met gelijkspanning en daarom is de schakeling dan ook aangesloten op een batterij. Wat is het nut van die gelijkspanning?



Figuur 109. Eenvoudige wisselspanningsversterker: versterkt zelfs "brommende geluiden uit de vinger"! ($R_1 = R_B$, $R_2 = R_C$)

Gedeelde batterijspanning

Het klinkt een beetje gek: om ervoor te zorgen dat de wisselspanning op de juiste manier kan worden versterkt dient de transistor door toedoen van de gelijkspanning voortdurend een beetje geleidend worden gehouden - ook als het vóór de microfoon doodstil is. Dat wordt aangegeven door LED1. Met behulp van de weerstand tussen de collector en de basis haalt de transistor als het ware zelf uit zijn collectorspanning de basisstroom om te kunnen geleiden. Als je bijvoorbeeld de waarde van deze weerstand zo kiest dat het verschil tussen deze waarde en die van de collectorweerstand gelijk is aan de factor van de transistorstroomversterking, dan bedraagt de collectorspanning ongeveer de helft van de batterijspanning. Dus: $U_C = U_B/2$

Insider-info 11

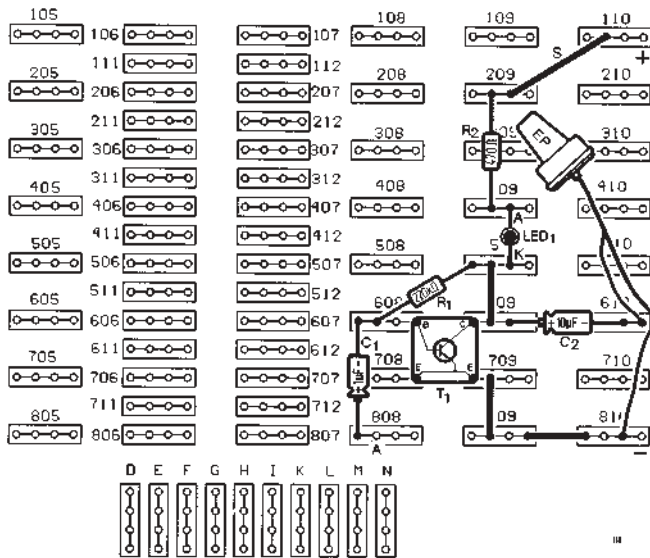
De basisstroom op zijn beurt wordt berekend aan de hand van de formule $I_B = (U_{CE} - U_{BE})/R_B$. Als we, om het eenvoudiger te maken, de LED-spanning van de licht-emitterende diode voor onze berekening aftrekken van de batterijspanning en de uitkomst de nieuwe batterijspanning U_B noemen, is de collector-emitterspanning te berekenen volgens de formule $U_{CE} = U_B - B \times I_B \times R_C$. In plaats van I_B schrijf je $I_B = (U_{CE} - U_{BE})/R_B$. Daar kun je alle interessante gegevens uit afleiden. Deskundigen ontwerpen een klein computerprogramma om het verloop van de spanning aan de collector over de weerstand R_B of ook wel afhankelijk van de stroomversterking bij een vaste waarde van R_B in een grafiek weer te geven. 'n Klein steuntje bij het nadenken: de batterijspanning U_B verminderd met de LED-spanning bedraagt ongeveer 7 V, de basis-emitterdrempelspanning U_{BE} ca. 0,6 V.

terwijl $R_B = B \times R_C$. Deze waarde komt nu goed van pas: laten we eens aannemen dat een (denkbeeldige) microfoon een wisselspanning afgeeft aan de basis. Aangezien de polariteit van deze wisselspanning voortdurend verandert "schommelt" ook de collectorspanning rond de genoemde gemiddelde waarde van de batterijspanning op en neer. Deze wordt via de condensator C2 naar de oortelefoon geleid.

De bromtest van opa opnieuw tot leven gewekt

72 We bouwen de wisselspanningsversterker op zoals aangegeven in figuur 110 (schakelschema in figuur 109). Voor de uitvoering van onze eerste proef maken we gebruik van een truc die opa met zijn oude, met buizen uitgeruste radiotoestel al kon waarderen: wij zijn voortdurend en overal omgeven met de elektrische velden van 50 Hz van onze energievoorziening. Ons lichaam reageert op deze omgeving als een condensator met een capaciteit van een paar honderd picofarad. Het is zodoende een prima "bron voor bromgeluiden". Als je de open uitgang A van de wisselspannings-versterker aanraakt begint het in de oortelefoon te brommen: net alsof er een wisselspanning via een condensator jij dus!) op de ingang is aangesloten.

73 Je kunt natuurlijk ook eens proberen of je de muziek uit de draagbare radio of de walkman kunt versterken; als je een beetje behendig bent sluit je dan de beide polen van de hoofdtelefoonaansluitingen van de radio aan op de ingang A en de min-pool van onze schakeling.



Figuur 110. Het opbouwschema bij figuur 109.

Werkpunt en negatieve terugkoppeling

Door de schakeling op de juiste wijze aan te passen hebben we zojuist een transistor gevoed met een zekere hoeveelheid basisstroom. Daardoor kan hij signaalspanningen versterken. De vakman noemt dat het instellen van het werkpunt. Die signaalspanning was in dit geval een wisselspanning. In andere schakelingen kan dat ook een hele kleine gelijkspanning zijn die (analoog) moet worden versterkt.

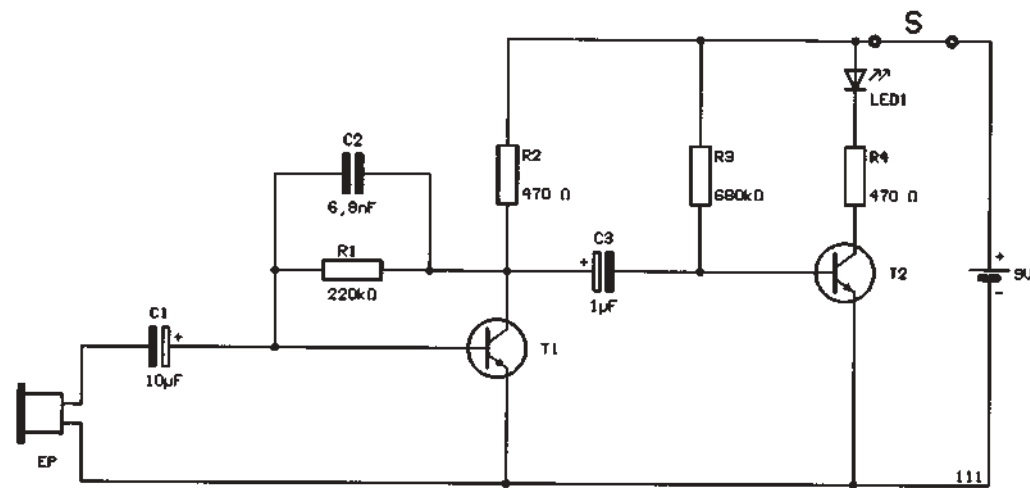
Het verbinden van de collector (uitgang) en de basis (ingang) middels een weerstand wordt overigens *negatief terugkoppelen* genoemd. Door het aanbrengen van een *negatieve terugkoppeling* krijg je een behoorlijk stabiel werkpunt; bovendien zorgt een negatieve terugkoppeling ook voor een vermindering van eventuele vervormingen van gesproken woord en muziek.

Klopsignalen

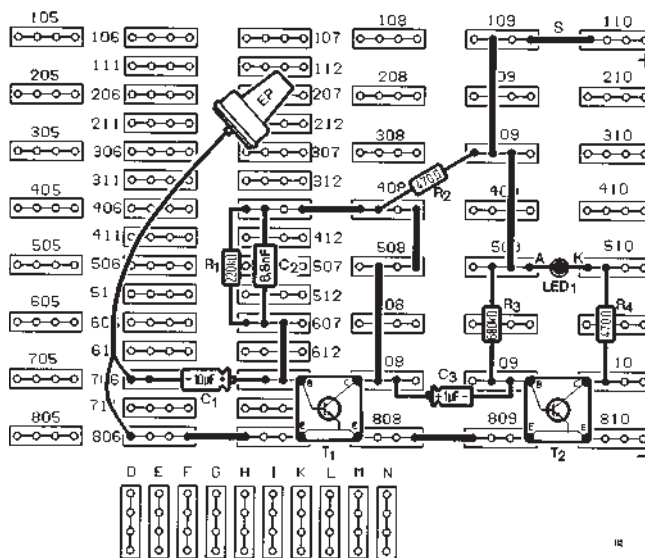
Een microfoon wordt niet alleen gebruikt voor gesproken woord en muziek. Dat blijkt uit het volgende experiment.

74

We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 111. Het resultaat is een klein seismologisch station, dat heel gevoelig is voor trillingen en daarop reageert met flinterende lichtsignalen.



Figuur 111. Een schokkend resultaat: als je klopt begint de licht-emitterende diode te flikkeren.



Figuur 112. Het opbouwschema bij figuur 111.

Als microfoon gebruiken we de oortelefoon, want het principe daarvan is omkeerbaar: wisselspanning wordt omgezet in geluid, maar geluid ook in wisselspanning. Niet direct een hoge spanning, maar de beide versterkertrappen voeren die wel op. Je kunt de

oortelefoon het beste op een tafelblad leggen en daar dan flink op kloppen. Voor hogere frequenties is het apparaat minder gevoelig. Dat komt door C2. In de oortelefoon zit een magneet-spoel, een inductiviteit, waarvan de weerstand toeneemt naarmate de frequentie stijgt. De weerstand van de capaciteit wordt daarentegen kleiner wanneer de frequentie stijgt. Met het stijgen van de frequentie wordt dus de naar het basisknooppunt vloeiende negatieve terugkoppelsstroom sterker, terwijl de ingangsstroom vanuit de oortelefoon zwakker wordt. Aangezien de ohmse weerstand van de oortelefoon nogal klein is heb je de koppelcondensator nodig, anders zou de basisovergang gesperd blijven. De tweede trap van de schakeling krijgt zijn basisstroom via een weerstand rechtstreeks uit de batterij. Dat betekent dat de compenserende werking voor het werkpunt ontbreekt, zodat dit meer afhankelijk is van de stroomversterking. De waarden zijn zo gekozen dat de lichtintensiteit van de licht-emitterende diode, uitgaande van een gemiddelde waarde, in beide richtingen duidelijk verandert als ter plaatse het tafelblad begint te trillen.

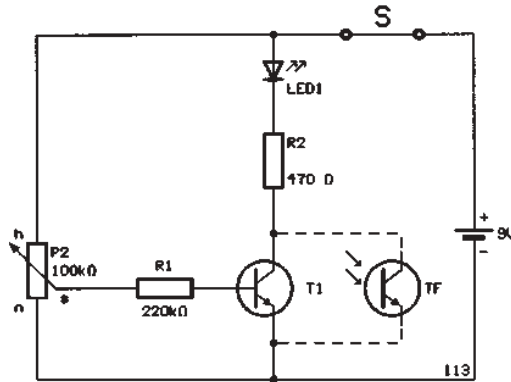
Geleidelijke overgangen

Met de volgende schakeling keren we terug naar de geleidelijke overgangen die kenmerkend zijn voor de analoge techniek.

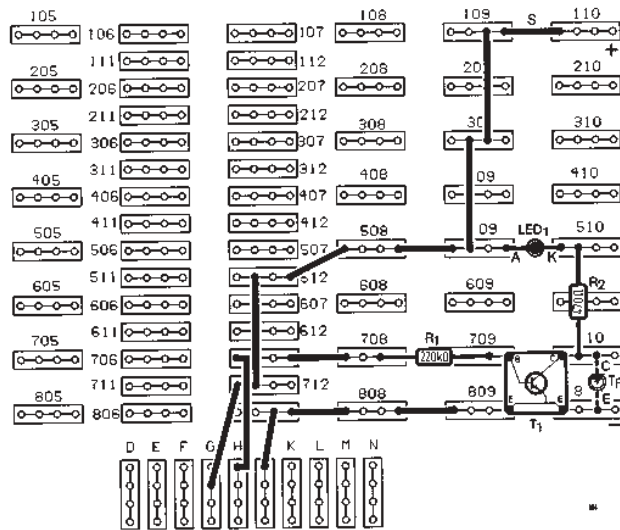
75

We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 113 en draaien de looper van de potentiometer behoedzaam van de aanslag n naar rechts. We merken op: al bij een tamelijk kleine verdraaiing begint de licht-emitterende diode zwakjes te gloeien. De lichtintensiteit neemt alsmat toe naarmate we verder draaien en bereikt nog vóór de aanslag de maximale sterkte. Dat kun je zo vaak herhalen als je herhalen als je wilt,

ook in omgekeerde richting. Het langzame doven tijdens het terugdraaien doet denken aan het effect van de bekende dimschakelingen waarmee je energie kunt besparen.



Figuur 113. Eenvoudige gelijkstroomversterker: LED1 wordt donkerder naarmate de loper verder in de richting van n wordt gedraaid ("licht dimmerschakeling").



Figuur 114. Het opbouwschema bij figuur 113.

De "verloren gang" aan het begin vindt zijn oorzaak in de basis-emitterdrempelspanning van ca. 0,6 V. Zoveel spanning moet er minstens op het aftakpunt aanwezig zijn om ervoor te zorgen dat de transistor gaat geleiden. Aan de aanslag h vloeit dan de basisstroom $(U_B - U_{BE})/R_1$. Aangezien deze iets minder bedraagt dan $40 \mu A$ zou er bij een stroomversterking van b.v. $B = 500$ een collectorstroom van ongeveer 20 mA kunnen vloeien.

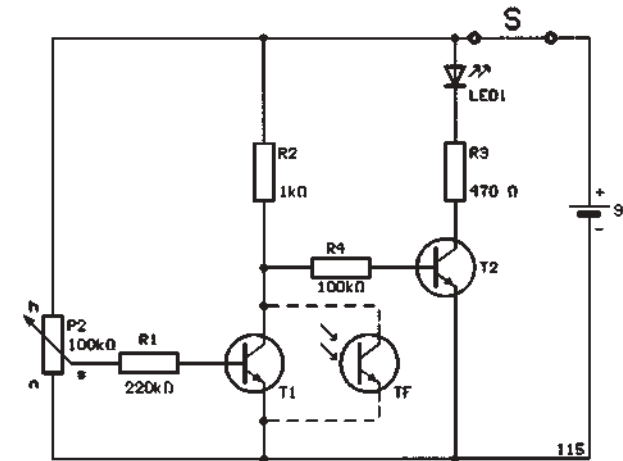
Op grond van $(U_B - U_{BE})R_2$ kan deze waarde echter niet meer bedragen dan een kleine 15 mA. In zo'n geval werkt de transistor vlak onder zijn verzadiging, zoals dat heet. Voor onze types met een klein vermogen moet je rekenen op een verzadigingsspanning van 0,2 tot 0,3 V. Dat is afhankelijk van basisstroom, collectorweerstand en werkspanning. Hoeveel de verzadigingsspanning precies bedraagt kun je aflezen aan de lijnen van de karakteristieken van de afzonderlijke types.

Tegenspraak

Collectorstroom, opgewekt door de basisstroom, zorgde ervoor dat de LED in figuur 113 oplichtte. In de ingangskring van figuur 115 treffen we dezelfde situatie aan als in figuur 113. De LED in de uitgangskring reageert echter precies "andersom".

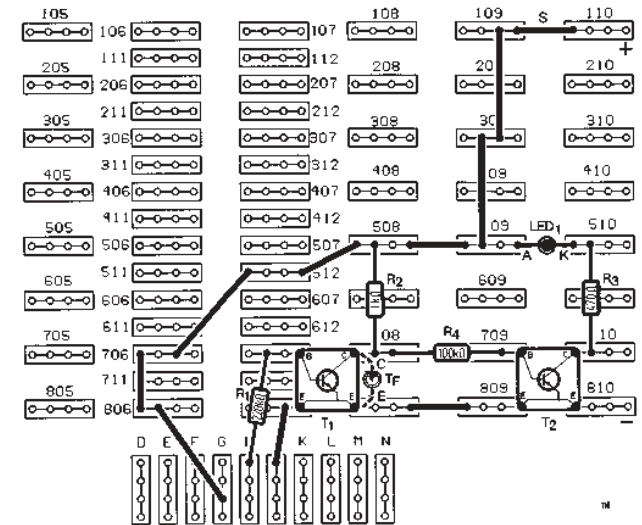
76

We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 115 en draaien aan de potmeter. En wat zien we? Als de loper beneden staat, geeft LED1 licht! Als we de loper opdraaien dooft LED1 langzaam.



Figuur 115. Het tegenovergestelde van figuur 113: als je de loper in de richting van n draait, licht LED1 steeds feller op.

Bij nader inzien hebben we twee invertoren achter elkaar geschakeld. Als de eerste begint te geleiden (potmeter langzaam opdraaien) onttrekt hij daardoor steeds meer basisstroom aan de tweede. Wat we in de digitale techniek dus hebben vermeden, dat gebeurt met de potmeter bewust: we "doorlopen" het gebied tussen niet-geleiden en volledig geleiden. In beide proeven reageert de lichtintensiteit van de licht-emitterende diode "op analoge wijze" op het draaien aan de potmeter. Alleen is het nu tegenovergesteld aan figuur 113. Ook in dit geval is schijnbare verkwisting vaak nuttig. Je kunt daarmee flexibel reageren op



Figuur 116. Het opbouwschema bij figuur 115

totaal verschillende ingangssignalen - steeds zul je de constellatie vinden die voor de verdere verwerking het gunstigste is. Om dit te demonstreren gaan we dadelijk nog twee proeven doen.

77

We vervangen T1 in figuur 1 1 3 door de fototransistor uit onze experimenteeldoos en letten op wat er met LED1 gebeurt. We zien dan: als er in onze omgeving niet al te veel licht is blijft de licht-emitterende diode donker. Dan brengen we langzaam een brandende zaklantaarn in de nabijheid van de fototransistor. We stellen vast: naarmate de lantaarn dichterbij komt, licht LED1 feller op. De fototransistor heeft weliswaar geen basisaansluiting, maar licht heeft hetzelfde effect als de spanning aan de aftakking van onze potmeter: hoe meer licht erop valt, des te sterker geleidt de transistor.

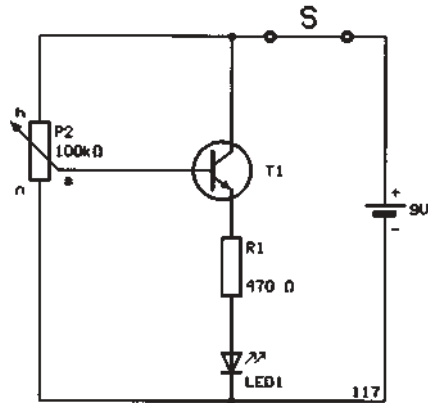
78

Dezelfde "vervanging" voeren we nu uit in figuur 115. Dan zoeken we weer een donker hoekje op. We zien dat LED1 fel licht uitstraalt. Dat verandert wanneer we de lichtstraal van de zaklantaarn op de fototransistor richten. Hoe dichterbij de lantaarn, des te donkerder de licht-emitterende diode. Onze conclusie luidt:

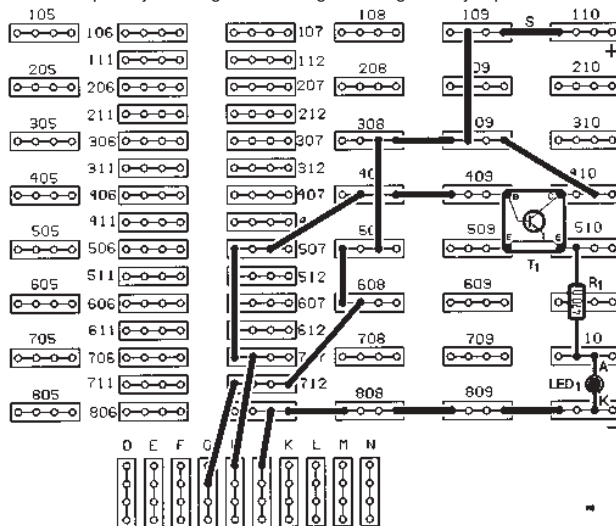
- de effectieve richting in figuur 115 is omgekeerd aan die van figuur 113, want er zijn twee emittertrappen achter elkaar geschakeld;
- de lichtgevoeligheid is in figuur 115 duidelijk groter dan in figuur 113, want er zijn twee versterkertrappen achter elkaar geschakeld.

Een weerstand minder

Bij de schakelingen die we zojuist onder de loep hebben genomen functioneert de emitter als gemeenschappelijke elektrode voor de ingangs- en uitgangskring. Om het basistraject te beveiligen tegen te hoge stroom heb je een weerstand nodig voor de stroombegrenzing. Die kun je bij de collectorschakeling zoals aangegeven in figuur 117 besparen. Althans, als je de collector precies zo hebt aangesloten als het hoort. In een collectorschakeling beveiligen onze transistoren zichzelf tegen een te hoge basisstroom: hun collectorverzadigingsspanning is lager dan de basis-emitterdrempelspanning



Figuur 117. Collectorschakeling, ook wel emittervolger genoemd: LED1 licht pas bij een hogere instelling van P2 geleidelijk op.



Figuur 118. Het opbouwschema bij figuur 117.

79

We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 117 en draaien de potmeter weer langzaam op van n naar h. Dan zien we: nu licht LED pas op, wanneer de loper van de potentiometer is aangekomen bij een spanning van $U_{BE} + U_F$. De schakeling heeft dus aanzienlijk meer ingangsspanning nodig om de LED te laten oplichten. En ze reageert ook in ieder opzicht totaal anders. Maar dat hebben we hierboven (en bij de Darlington-schakeling) al besproken. Hoe dat functioneert vanuit de optiek van de analoge techniek blijkt uit de volgende insider-info.

insider-info 12

We hebben al even kennis gemaakt met de collectorschakeling in hoofdstuk 9. Deze keer is het ons weer te doen om de reactie in de "actieve zone", dus in het gebied tussen Ja en Nee. Ten eerste: de uitgang van deze trap is de emitter. De spanning die aan de belastingsweerstand (incl. LED) optreedt, is gelijk aan de ingangsspanning verminderd met de waarde U_{BE} . Vanuit het oogpunt van de digitale techniek leidt "Ja" aan de ingang ook tot "Ja" aan de uitgang. In de analoge techniek en dus ook met betrekking tot wisselspanningsmodulatie noemt men dit het in fase zijn van de signalen aan de in- en de uitgang, terwijl ze bij de emitterschakeling onderling in tegenfase (180° verdraaid) optreden. En - ze worden wat hun spanning betreft niet versterkt. Vandaar de benaming "één-versterker" (Engels: "unity amplifier") die hiervoor ook wel wordt gebruikt. De collectorschakeling, ook wel emittervolger genoemd, heeft echter nog een belangrijke eigenschap: de ingang ervan is hoogohmig. Dat hadden we ook al in hoofdstuk 9 vastgesteld. Je kunt dat het beste begrijpen als je het als volgt bekijkt: de emitterstroom (de som van basis- en collectorstroom, die dus ongeveer overeenkomt met de collectorstroom) bereken je met toereikende nauwkeurigheid aan de hand van de formule $I_E = I_B \times B$. I_B wordt door de ingangsspanning U_{in} "op gang gebracht" $U_{in} = U_{BE} + I_E \times R_E + U_{BE} + B \times I_B \times R_E$. Als we U_{BE} ten opzichte van U_{in} verwaarlozen leidt dat tot een ingangsweerstand van ongeveer $B \times R_E$. Bij deze beschouwing komt LED1 in figuur 117 te vervallen! R_E komt overeen met R1.

11. Complementaire schakelingen

We hebben al gezien dat je niet eenvoudigweg van de transistor kunt spreken. Aan welke transistoren men bij de toepassing de voorkeur gaf, was afhankelijk van de beste resultaten tijdens de productie. Lange tijd werkte men in de theorie en de praktijk overwegend met npn-transistoren, dus transistoren met een positieve collector- en basisspanning, maar met een negatieve emitterspanning. Bij de zonevolgorde pnp is het net andersom. Transistoren met een dergelijke opbouw zijn een aanvulling op die van het npn-type - zij worden complementaire transistoren

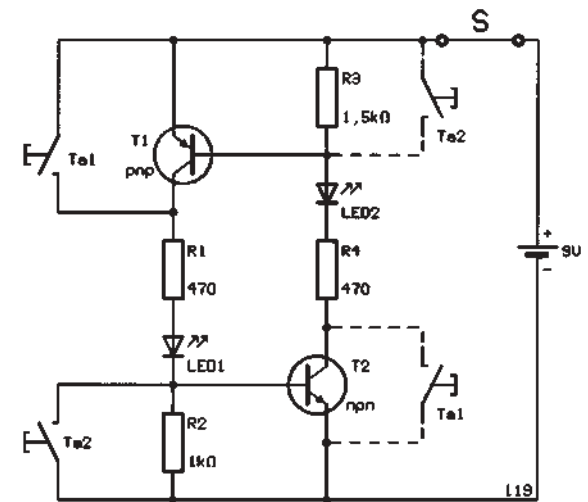
genoemd. Zodra men de beschikking had over series van elk van beide types met vergelijkbare eigenschappen werd het interessant om ze met elkaar te gaan verbinden. Daarbij beperkte men zich niet alleen tot de traditionele schakelingen, maar kon men ook speciale structuren nabootsen die o.a. toegepast worden in vierlagendiodes, thyristoren en triacs. Verder is het natuurlijk ook afhankelijk van de benaderingswijze en van de precieze kennis van deze mechanismen, hoe een dergelijke schakeling moet worden beschreven. En deze schakelingen zijn ook weer doorgedrongen in menig toepassingsgebied van de elektronische schakeltechniek. In onze experimenteerdoos zit een dergelijke pnp-transistor. Laten we met behulp daarvan de wereld van de "complementaire schakelingen" eens gaan verkennen!

Complementaire RS flip-flop (thyristor-structuur)

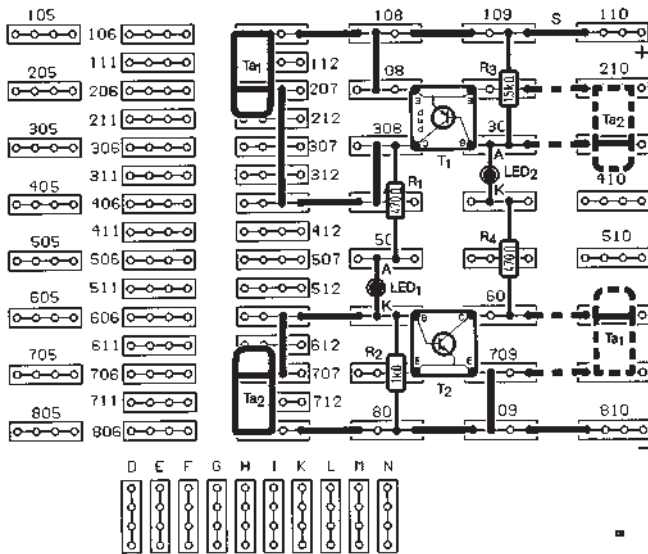
Een thyristor is een halfgeleider-bouwelement, bestaande uit verscheidene n- en p-lagen, dat door een ontsteekpuls wordt ingeschakeld. Je kunt het pas dan weer uitschakelen als de stroom tot onder een bepaalde waarde is gedaald. Ook in de volgende schakeling werken verscheidene n- en p-lagen samen - in de vorm van de beide transistoren. En ze reageert ongeveer net zo als een dergelijke thyristor. Tegelijkertijd functioneert ze als flip-flop.

80

Voor een onderzoek van deze complementaire flip-flop bouw je de schakeling op zoals aangegeven in figuur 119. Met behulp van de beide licht-emitterende diodes kunnen we vaststellen of en wanneer er in de beide takken van de schakeling stroom vloeit.



Figuur 119. Complementaire RS flip-flop: "meerlagen-opstelling" met, thyristor-eigenschappen.



Figuur 120. Het opbouwschema bij figuur 119.

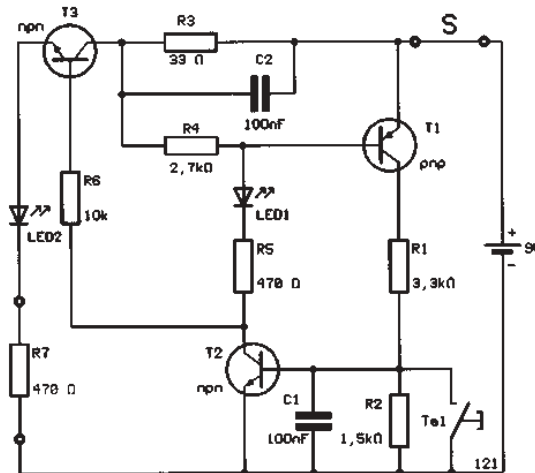
We drukken dus op toets Ta2 en ... wat een teleurstelling: er gebeurt niets! Dan drukken we op Ta1 en zien: beide diodes stralen licht uit. We laten Ta1 los en stellen vast: de diodes blijven licht geven. Vervolgens proberen we het nog een keer met Ta2 en zien tot ons genoegen: 't is gelukt - er vloeit geen stroom meer, beide LED's zijn donker. Als je figuur 119 nauwkeuriger bekijkt, zul je zien: de beide transistoren zijn kruislings met elkaar verbonden - de verbinding loopt telkens van de collector van de ene via LED en beveiligingsweerstand naar de basis van de andere. Met de bovenste toets Ta1 maken we de schakeling geleidend - we *setten* de schakeling. Door middel van de onderste toets Ta2 wordt de schakeling weer in de ruststand gebracht - de schakeling wordt gereset. Vandaar de naam RS flip-flop.

81 We verwisselen de toetsen "diagonaal": Ta2 wordt parallel geschakeld aan R3, Ta1 overbrugt de collector-emitterovergang van T2. Nu testen we het geheel opnieuw door op de toetsen te drukken. Het resultaat is: de schakeling functioneert zoals daarnet, alleen zit de S-toets nu aan de onderkant en de R-toets aan de bovenkant.

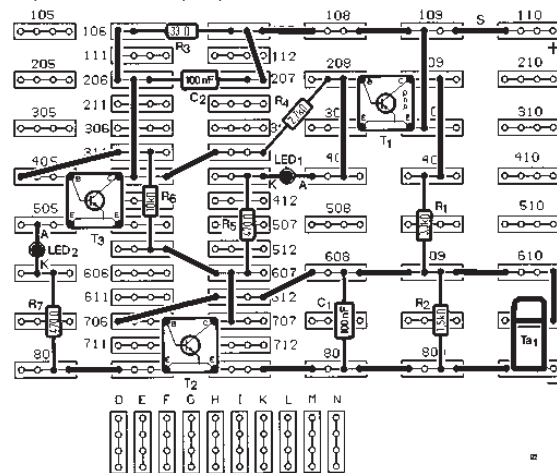
Elektronische overstrombeveiliging

Onze flip-flop heeft al menig bouwdeel behoeft tegen over-belasting. Hoe dat in z'n werk gaat laat de volgende proef zien. Met de schakeling zoals aangegeven in figuur 121 maken we zo'n reddende engel voor bouwelementen. De groene LED2 en haar beveiligingsweerstand stellen een elektronische schakeling

82 voor waarin kortsluiting of gewoon een te hoge belasting kan ontstaan. In beide gevallen stijgt de stroomopname tot boven het gebruikelijke niveau, waardoor de spanningsbron, een tussenliggende stabilisatieschakeling of de schakeling zelf beschadigd kan worden. Dat willen we voorkomen. Na het inschakelen geeft LED2 licht - alles o.k. Door middel van een weerstand van 150 Ω , parallel aan R7, gaan we de schakeling nu overbelasten en we stellen vast: LED2 gaat plotseling uit in plaats van kort en fel op te flitsen en dan "de geest te geven". In plaats daarvan licht LED1 op om het uitvallen van LED2 te



Figuur 121. Redde al menig bouwdeel: elektronische overstrombeveiliging met complementaire RS flip-flop.



Figuur 122. Het opbouwschema bij figuur 121.

signaleren. We verwijderen de "overbelastingsweerstand" en drukken even op Ta1: LED1 dooft en LED2 licht weer op. We proberen het nog eens met de weerstand: deze keer werkt Ta1 alleen als we erop blijven drukken. Dat betekent dat de oorzaak van het uitvallen nog niet is opgeheven. Waar bevindt zich het beveiligingsmechanisme van deze schakeling? We weten dat T3 een transistor in collectorschakeling is. Hij wordt vanuit de basisstroom via R4, LED1, R5 en R6 ingeschakeld. Want T2 is in eerste instantie gesperd (LED1 is donker). T1 en T2 zijn geschakeld als een complementaire flip-flop zoals aangegeven in figuur 119. Om ervoor te zorgen dat hij niet te snel reageert wordt zijn werking een beetje afgeremd door C1 en C2. Anders zou hij bij het inschakelen ongewenst in werking gesteld kunnen worden. De beslissende factor voor de beveiliging is R3. Door deze weerstand vloeit de stroom waarvan de sterkte in de gaten moet worden gehouden. Bij 33 Ω volstaat ca. 15 mA om ervoor te zorgen dat T1 gaat geleiden, want de spanning over R3 functioneert als basis-emitterspanning. Als T1 begint te geleiden wordt ook T2 ingeschakeld en zet zodoende T1 met zijn collectorstroom helemaal open - het bekende flip-flopmechanisme. Je kunt pas resetten met Ta1 als de spanning over R3 wat is gedaald, m.a.w. als de te hoge stroom is verdwenen.

83 We verwijderen C1 en C2 uit de schakeling zoals aangegeven in figuur 121 en sluiten vervolgens de batterij aan. We stellen vast dat de zekering nu de neiging vertoont om bij het inschakelen te reageren.

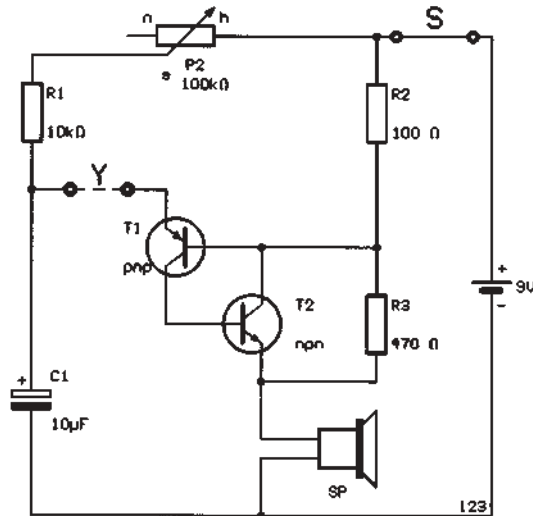
84 Nu steken we de condensatoren weer op hun plaats. Bovendien nemen we parallel aan R7 een elco van 10 μ F op, met de plus-aansluiting in de richting van LED2. We merken op dat de zekering al reageert op de korte stroomstoot waarmee de condensator wordt opgeladen.

PUT-metronoom - een schakeling die "knak" zegt

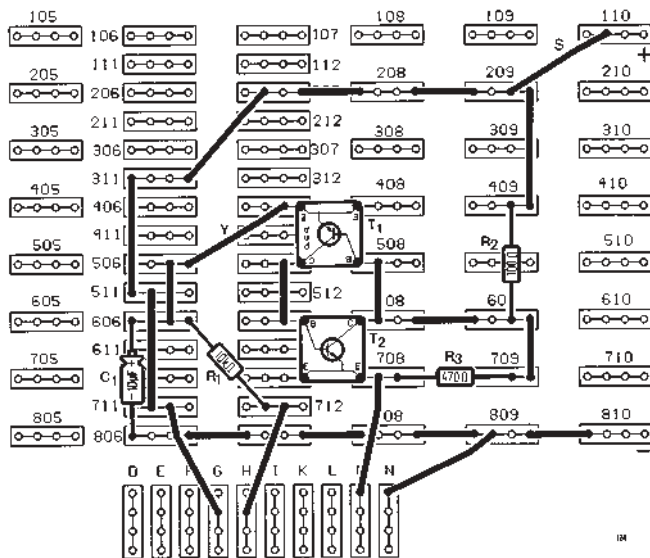
In deze schakeling, weergegeven in figuur 123, herkennen experts overeenkomsten met speciale, via de anode stuurbare thyristoren en programmeerbare unijunction-transistoren (PUT's). Wij zijn meer geïnteresseerd in wat die schakeling kan.

85 De schakeling zoals aangegeven in figuur 123 heb je gauw opgebouwd. We horen korte, droge, knakkende

geluiden uit de luidspreker komen. We draaien aan P2 en merken op: hoe dicht de looper s bij de aanslag h komt, des te sneller wordt de opeenvolging van deze pulsen. Hun frequentie stijgt van ongeveer 0,5 Hz tot 5 Hz. Dat kan goede diensten bewijzen, bijv. voor een metronoom.



Figuur 123. Complementaire metronoom: doet denken aan een unijunction transistor.



Figuur 124. Het opbouwschema bij figuur 123.

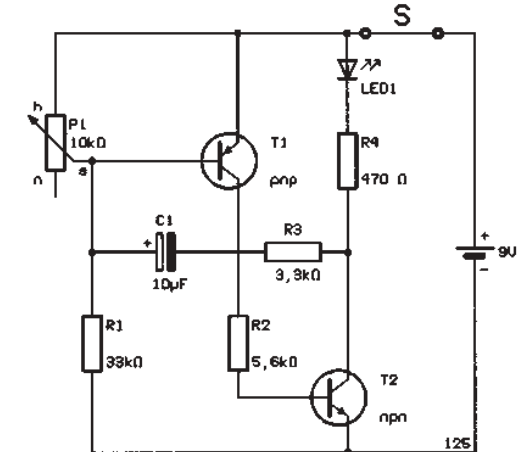
86 We vervangen $C1$ door een condensator met een kleinere capaciteit - eerst 100 nF, dan 6,8 nF - en horen dan tonen.

87 Bij een waarde van $C1$ van 6,8 nF vervangen we $R1$ door een weerstand van 33 kΩ en nemen tussen $C1$ en de emitter van $T1$ in plaats van de brug Y een weerstand van 10 kΩ op. De schakeling reageert hierop door duidelijk luidere tonen te produceren. We begrijpen waarom de schakeling zo reageert als we figuur 123 eens wat beter bekijken: $C1$ wordt vanuit de plus van de batterij opgeladen via $R1$ en $P2$. De laadtijd is afhankelijk van de ingestelde waarde van $P2$. $T1$ zal gaan geleiden zodra de spanning over $C1$ een waarde aanneemt die hoger is dan de waarde van de spanning over $R2$ + de waarde van de basis-emitterdrempe spanning van $T1$. Als $T1$ begint te geleiden opent hij met zijn collectorstroom ook $T2$ - de schakeling wordt abrupt "ontstoken". Uit de luidspreker klinkt even een knakkend geluid. De condensator is vanwege de lage luidsprekerweerstand snel ontladen. Als de waarde van de condensator wordt verlaagd, neemt de frequentie van laden en ontladen toe: we horen dan tonen. Tenslotte wordt door middel van de extra weerstand de onlaadtijd verlengd. In plaats van in korte "pieken" vloeit de stroom nu gedurende langere tijd door de luidspreker. Denk eraan dat de spanningsdeler van de batterij continu belast met een stroom van ongeveer 15 mA! Schakel dus niet snel uit (draadbrug S verwijderen).

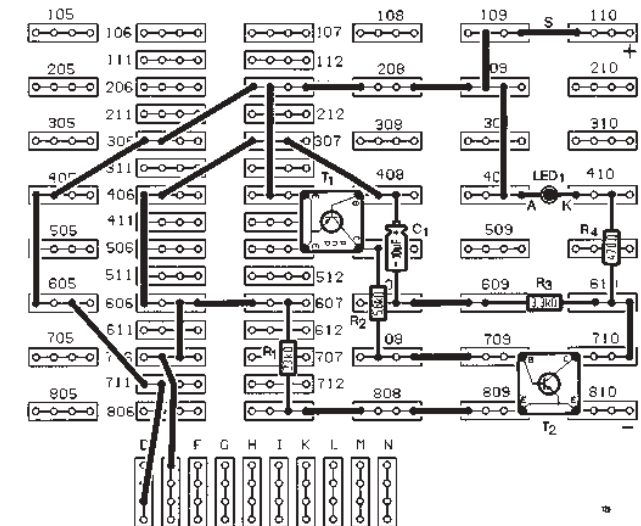
Complementair knipperlicht

Knipperlichten van het type dat we in hoofdstuk 9 hebben leren kennen functioneren meestal direct. Met bescheiden middelen brengen zij de elektronica tot "leven" en daarom genieten deze schakelingen onder beginners een zekere populariteit. Het knipperlicht dat we nu gaan bekijken werkt volgens het complementaire principe en is dus al iets meer veeleisend. Je moet er eerst het een en ander voor instellen, maar dan kun je er ook op vele manieren nuttig gebruik van maken.

88 Je bouwt het complementaire knipperlicht op zoals aangegeven in figuur 126. Eerst stellen we de regelbare weerstand op minimale waarde in (s naar h) en sluiten de batterij aan. Vervolgens draaien we de looper voorzichtig in de richting van n en houden daarbij de licht-emitterende diode in het oog. We komen op het punt waarop het knipperen begint en draaien nog iets verder. We zien dat LED1 dan continu licht uitstraalt. Maar dat is niet wat we moeten hebben en daarom draaien we een eindje terug totdat de diode netjes knippert. Hoe komt deze reactie tot stand? Vanuit de negatieve pool gezien krijgt $T1$ basis-emitterspanning via de spanningdeler van $R1$ en $P1$. Al bij een geringe waarde van $P1$ wordt de basis-emitterdrempe spanning bereikt en begint $T1$ te geleiden. Als je nu verder opdraait blijft $T1$ de hele tijd geleiden en komt er van knipperen niets terecht. Dus



Figuur 125. Complementair knipperlicht met energiebesparingseffect: temperatuur- en spanningsafhankelijkheid kunnen zinvol worden gebruikt.



Figuur 126. Het opbouwschema bij figuur 125.

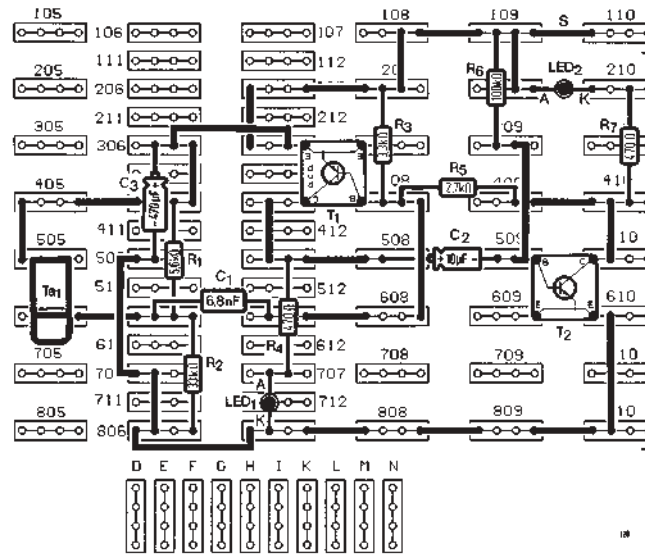
niet verder draaien dan tot het punt waar het knipperen net begint. Voor het overige zorgt de "dynamiek" van de schakeling. Want: $T2$ krijgt nu basisstroom via $T1$ en begint eveneens te geleiden. Zodoende ontstaat er zowel voor de R_C -schakeling $R3$, $C1$ als voor LED1 een stroombaan naar de negatieve pool. Dankzij de stroom door de R_C -schakeling gaat $T1$ sterker geleiden zodat $T2$ snel verzadigd raakt.

De LED straalt dus al korte tijd nadat ze is ingeschakeld, op volle sterkte licht uit. Afhankelijk van zijn capaciteit en de waarde van de voorschakelweerstand wordt C1 nu opgeladen door de basisstroom van T1, zodat deze stroom voortdurend afneemt. Zodra dit ertoe leidt dat T2 uit verzadiging gaat, neemt de collectorspanning van deze transistor weer snel toe en draagt ertoe bij dat de stroom die door de R_C -schakeling vloeit niet alleen nul wordt, maar vervolgens ook in tegengestelde richting gaat vloeien. T2 wordt gesperd en LED1 dooft. De relatief zwakke stroom waarmee C1 zich dan via LED1 ontladst veroorzaakt een zwak schijnsel dat hooguit in het donker nog zichtbaar is. De condensator C1, die tevoren bij een batterijspanning van 9 V tot bijna 8 V was opgeladen (begrensd door de verzadigingsspanning van T2 en de basis-emitterspanning van T1), ontladst zich via P1, LED1, R4 en R3. Zolang deze ontladstroom vloeit veroorzaakt hij over P1 een sperspanning voor de basis van T1. Nadat deze stroom is weggeëbd, wordt aan de spanningsdeler van P1 en R1 de begintoestand hersteld waarna de volgende knippercyclus begint.

89 We sluiten het knipperlicht eerst aan op een verse batterij en vervolgens op een batterij die al een poosje is gebruikt. Dan zie je het volgende: als je erin bent geslaagd om de schakeling met de ene batterij aan het knipperen te krijgen, zal je dat met de andere hoogstwaarschijnlijk niet lukken. Je moet de schakeling dan opnieuw instellen. Dat betekent echter wel dat het functioneren van ons knipperlicht afhankelijk is van de batterijspanning! Dat mag op het eerste gezicht ongunstig lijken, maar een goede technicus is soms net als een inventor - hij verandert negatieve effecten in positieve.

90 Laten we het knipperlicht dan maar eens gewoon als spanningsindicator gebruiken! Je stelt P1 in op de spanningswaarde die moet worden bereikt. Als de spanning afneemt dooft het knipperlicht. Over de vraag hoe van dit "ontbreken" van het signaal gebruik kan worden gemaakt, moet je nog maar eens nadenken. (Suggesties vind je aan het eind van dit hoofdstukje.) Andersom kan de schakeling ook worden gebruikt om de lading van accumulatoren te controleren: als de diode knippert is de ingestelde laadspanning bereikt.

91 Als de knipperlichtschakeling juist is ingesteld gaan we een of beide transistoren verwarmen, bijvoorbeeld met een fohn. We stellen vast: ook de temperatuur is van invloed op het knipperen. Dit effect wordt vooral veroorzaakt door de temperatuurafhankelijkheid van de basis-emitterspanning en de stroomversterking. Maar ook van deze nood kun je een deugd maken: bijvoorbeeld door de pnp-transistor op een bouwelement te plakken dat niet te warm mag worden. Als dat wel gebeurt gaat onze schakeling knipperen.



Figuur 128. Het opbouwschema bij figuur 127.

92 We vervangen C1 door een condensator van 6,8 nF en sluiten in plaats van LED1 de luidspreker uit onze experimenteerdoos aan.

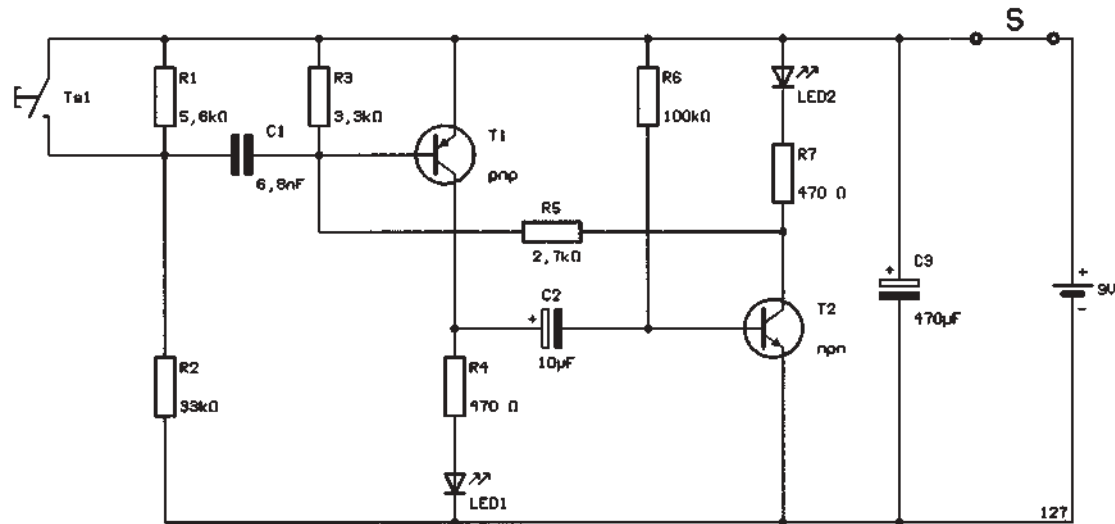
Vervolgens draaien we weer langzaam aan P1. Wat er nu gebeurt had je eigenlijk wel kunnen verwachten: ons complementair knipperlicht is veranderd in een toonfrequentiegenerator. Dat biedt in de hierboven genoemde voorbeelden nieuwe mogelijkheden voor het vaststellen van spanning en temperatuur!

Monostabiel in complementair

Een monostabiele multivibrator is als het ware een astabiele multi-vibrator die niet helemaal is afgemaakt: als hij in werking wordt gesteld voert hij een trilling uit en daarna doet hij niets meer. Je kunt een dergelijke "monoflop" o.a. prima gebruiken als tijdschakelaar.

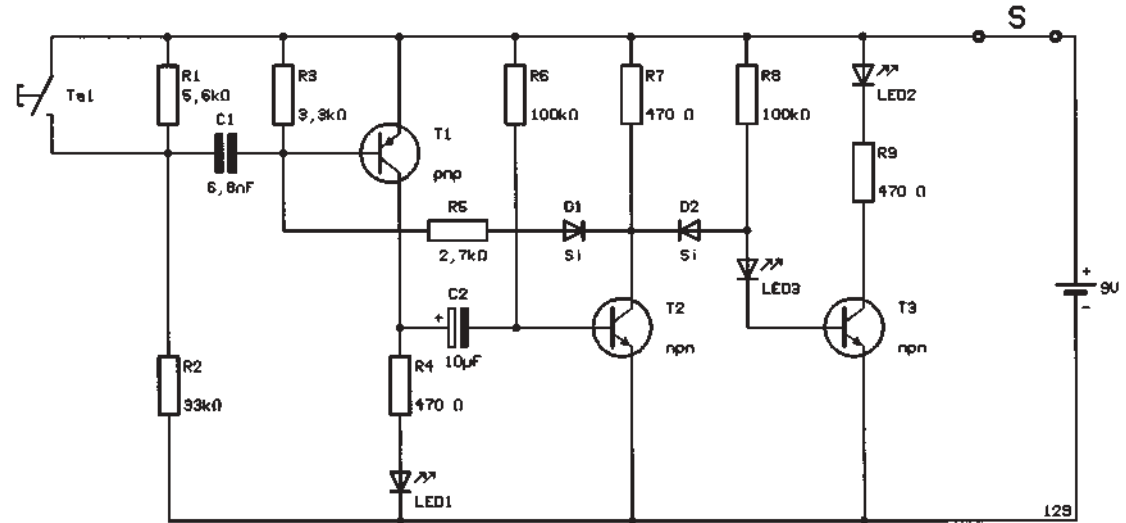
93 Nadat we de schakeling zoals aangegeven in figuur 127 hebben opgebouwd, sluiten we de batterij aan en stellen vast dat de beide licht-emitterende diodes continu licht geven. Dan drukken we op toets Ta1. We zien dat de beide diodes even doven, maar daarna weer oplichten. De schakeling reageert dus inderdaad als een monoflop. Je kunt net zo lang op de toets blijven drukken als je wilt, zonder dat dat enige invloed heeft op de tijd dat de diodes donker blijven. Dat komt door de dynamische aansluiting via de condensator C1. We hebben deze truc al in hoofdstuk 9 leren kennen.

94 We verhogen de waarde van C2 van 10 µF via 100 µF tot 470 µF. We zien dat de tijd waarin de diodes geen licht uitstralen, toeneemt evenredig aan de waarde van C2 - van ongeveer 1 s tot ca. 50 s.



Figuur 127. Complementaire monoflop: door een druk op de toets worden de beide transistoren gesperd. Bepalend voor de duur zijn R6 en C2.

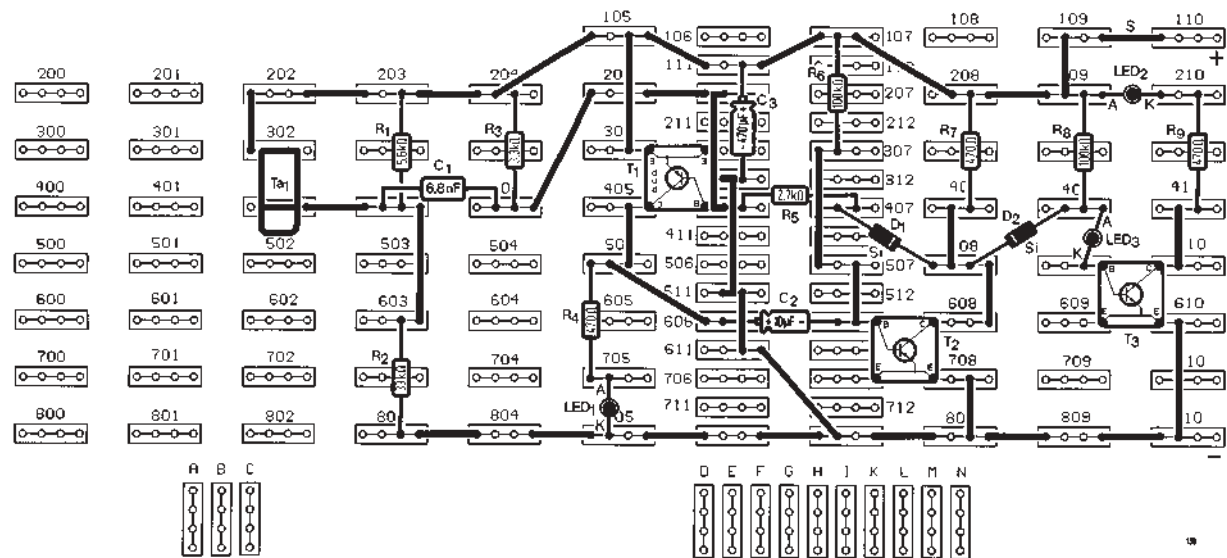
Laten we de werking van deze schakeling eens onderzoeken. De licht-emitterende diodes geven de toestand aan. In ruststand geven ze alle twee licht, want T2 is door de op de plus aangesloten batterijweerstand R6 voldoende in geleiding. Op die manier krijgt ook T1 voldoende basisstroom waardoor LED1 in diens collectorkring oplicht. In de schakeling zit een soort "ontsteking" in de vorm van de condensator C1 aan de basis van T1. Deze condensator is bij een batterijspanning van 9 V tot ongeveer 1 V opgeladen. Wanneer op de toets wordt gedrukt, bereikt deze spanning als tijdelijke sperspanning de basis van T1. De positief geladen kant van C2 voor de basis van T2 wordt daardoor gescheiden van de plus en is dan opeens in serie met LED1 en R4 als "sperbatterij" aangesloten op de basis-emitterovergang van T2. Het ontladen van C2 duurt aanzienlijk langer. Aanvankelijk is C2 tot ongeveer 8 V opgeladen. LED1 zorgt ervoor dat de voor de basis-emitter-overgang effectieve sperspanning afneemt tot de net nog toelaatbare waarde van 6 V (richtcijfer). Terwijl de werking van de "ontsteking" aan T1 nu allang is weggeëbd, blijft T2 vanwege de aanzienlijk tragere ladingscompensatie voorlopig nog gesperd, zodat ook T1 nog niet opnieuw kan gaan geleiden. Via de op de plus aangesloten basisweerstand van T2 (100 k Ω) laat een zwakke stroom de sperspanning over T2 langzaam afvloeien. Zodra de positieve waarde van 0,6 V is bereikt begint T2 weer te geleiden. Daardoor geleidt ook T1 wat op zijn beurt tot gevolg heeft dat T2 snel wordt ingeschakeld - de wachtstand is hersteld en de beide diodes geven licht.



Figuur 129. Model voor de trappenhuisverlichting: de met diodes gekoppelde schakeltrap reageert na een druk op de toets door het licht een poosje te laten branden.

95

Als we de schakeling uitbreiden met de transistor zoals aangegeven in figuur 129 krijgen we een stroomkring die al meer geschikt is voor praktische toepassingen. Als je nu op de toets Ta1 drukt, geeft LED2 gedurende de "monoflop-tijd" licht, terwijl LED2 als "stand by-indicator" dan donker is. De schakeling zoals aangegeven in figuur 129 is bedoeld als tip voor insiders. We geven hierbij de volgende verklaring: met behulp van D1, D2 en LED3 worden de extra trap en de monoflop ontkoppeld. Zonder deze drie bouw-elementen zou T1 via de basis-emitterovergang van T3 in geleiding blijven. Zoals je ziet kan ook door middel van een licht-emitterende diode worden ontkoppeld. Ondanks de diodespanning van D2 wordt de extra transistor dan veilig gesperd door T2. De extra transistor functioneert als invertor. Daardoor geeft LED2 alleen in de monoflop-tijd licht. Deze schakeling is niet helemaal onproblematisch. Opnieuw voor de insiders: in schakelingen met meer dan een transistor kunnen zich gemakkelijk zelf-bekrachtigingsverschijnselen voordoen. In dit geval verandert de monoflop dan in een astabiele multivibrator - hij flinkt of knippert aan een stuk door! Dit wordt veroorzaakt door de verbinding van in- en uitgang via de inwendige weerstand van de batterij. Gebruik daarom voor deze proef verse batterijen of de KOSMOS-nettransformator X!



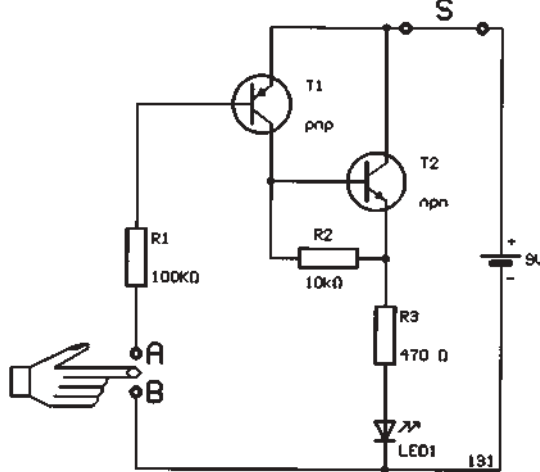
Figuur 130. Het opbouwschema bij figuur 129.

pnp-Darlington

Een Darlington-schakeling bestaande uit twee npn-transistoren hebben we al in hoofdstuk 8 leren kennen. Het principe " $B_1 \times B_2 = B_{tot}$ " functioneert zowel bij npn- als bij pnp-transistoren en zelfs in complementair verband. Je moet wel telkens goed op de juiste polariteit van de batterij letten. Dat wil zeggen: plus aansluiten op de emitter bij pnp en op de collector bij npn (figuur 131).

96

De volgens de aanwijzingen in figuur 132 opgebouwde schakeling levert het bewijs. Vorm met het topje van je vinger (mag best droog zijn!) een hoogohmige verbinding tussen R_1 (A, klemveer 406) en min (B, klemveer 506). De licht-emitterende diode laat zien dat er nu stroom vloeit. Als je je vinger terugtrekt dooft de diode. De ingang van R_1 functioneert als sensor.



Figuur 131 Complementaire Darlington-schakeling: bijna te gevoelig.

97

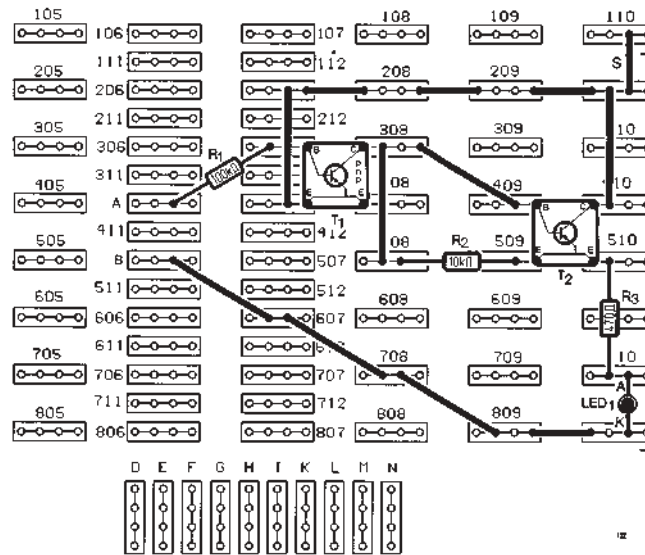
Nu vervangen we R_1 door de weerstand van 1,5 MΩ uit de experimenteerdoos. Als we de test herhalen blijkt: het functioneert nog steeds. Zelfs als we alle weerstanden uit onze doos achter elkaar schakelen kunnen we er met onze vinger voor zorgen dat LED1 licht geeft.

98

Als je de beschikking hebt over de KOSMOS-nettransformator X gebruik je die nu ter vervanging van de batterij. (Let op de juiste polariteit: rood is plus!) Herhaal de proef met je vinger en je zult zien dat het nu al voldoende is als je alleen maar de kant van R_1 aanraakt!

99

We verwijderen de weerstand R_2 en sluiten op R_1 de "antenne" aan die we hebben gebruikt bij onze spook



Figuur 132. Het opbouwschema bij figuur 131.

proeven. Als je een door wrijven opgeladen lineaal dicht bij de antenne houdt, flinkt LED1. De schakeling reageert nu dus ook op elektrische velden.

100

Vervang nu de batterij die je in de vorige proef hebt gebruikt weer door de nettransformator - als je die hebt. Leg vervolgens een stukje papier of ander isolatie-materiaal op de sensor. Door dit "diëlektrum" heen schakel je dan met je vinger de licht-emitterende diode weer in! In tegenstelling tot onze eerste spookproeven kunnen we nu verklaren wat er allemaal gebeurt. Onze schakeling heeft een zeer groot versterkend vermogen en is dus zeer gevoelig. Met de nettransformator hebben we nieuwe varianten van de bromtest van opa leren kennen - in dit geval optische varianten. Dat wil zeggen, we hebben met onze vinger via een condensator (het stukje papier als diëlektrum) de schakeling met netbromspanning gevoed. De negatieve deeltjes daarvan hebben T1 in geleiding gebracht. Ook wanneer we onze vinger als verbinding gebruiken (proeven met de batterij), komt de basisstroom voor T1, een pnp-transistor, "van onderop", vanuit de min. De collectorstroom, in grootte ongeveer gelijk aan het produkt van de stroomversterkingsfactor en de basisstroom van T1, stuurt als basisstroom de pnp-transistor T2. Diens emitter is de uitgang. Dit gedeelte van de schakeling vormt dus weer een collectortrap. De stroom in de uitgangskring is gelijk aan de basisstroom van T2 vermenigvuldigd met diens stroomversterkingsfactor. We geven een voorbeeld en gaan uit van $B_1 = B_2 = 400$: om een uitgangsstroom van 16 mA te verkrijgen heb je, omdat

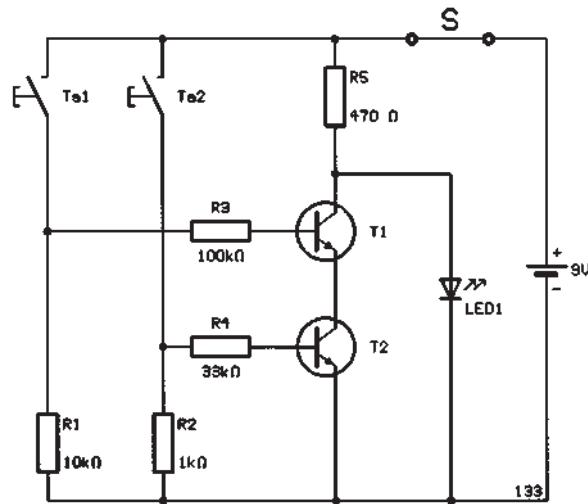
$B_{tot} = 160.000$, niet meer dan 0,1 μA basisstroom nodig voor T1! De manier waarop de schakeling nu reageert is echter voor veel toepassingen te gevoelig. Vandaar de weerstand van 10 kΩ parallel aan de basis-emitterovergang van T2. Die weerstand zorgt ervoor dat stroom tot 60 μA om T2 heen wordt geleid voordat deze begint te geleiden.

12. Transistorlogica

Digitale technieken en computers bestonden al voordat de eerste geïntegreerde schakeling werd uitgevonden. (In het begin werkten rekenmachines zelfs nog met relais.) Om vertrouwd te raken met de tweewaardige, binaire logica kunnen we dan ook gebruik maken van eenvoudige transistorschakelingen. En menig klein probleem kunnen we ook tegenwoordig nog oplossen met een dergelijke schakeling. In hoofdstuk 8 hebben we al de invertor leren kennen en in hoofdstuk 9 hebben we nog meer primaire schakelingen van de digitale techniek behandeld. Met de logische regels die aan de werking van computers ten grondslag liggen moet je je eerst vertrouwd maken. In een dergelijk wonder van gegevensverwerking worden tweewaardige signalen verwerkt. Daarvoor heb je zogenaamde poorten nodig, die "Ja" danwel "Nee" aan de ingang ondubbelzinnig beantwoorden met "Ja" of "Nee" aan de uitgang. We kiezen voor de invoer "Ja" het indrukken van een toets waarmee de betreffende ingang wordt aangesloten op de plus-pool. Aan de uitgang moet dan een licht-emitterende diode oplichten bij "Ja". De signalen worden op meerdere ingangen aangesloten. Het resultaat verschijnt aan de uitgang. Hoe dat eruit ziet is afhankelijk van het soort poort dat wordt gebruikt. Zo heb je de EN-poort: Ja EN Ja wordt Ja. Dus: aan beide ingangen moet Ja worden ingevoerd om aan de uitgang Ja te krijgen. En verder de OF-poort: Ja OF Ja wordt Ja. Het wordt spannender als de schakeling ook nog eens alles gaat omkeren zoals de invertor in hoofdstuk 8. Dan krijg je NEN (NIET EN) en NOF (NIET OF). NEN betekent: Ja EN Ja wordt NIET Ja (dus Nee); NOF: Ja OF Ja wordt NIET Ja (dus ook weer Nee). Of dat duidelijk is gaan we nu in de praktijk toetsen.

101

Als we de schakeling opbouwen zoals aangegeven in figuur 133 krijgen we een poort met twee ingangen. Als LED1 licht geeft, betekent dat "Ja" aan de uitgang. Aanvankelijk is op geen van beide ingangen een signaal aangesloten - dat betekent Nee. De weerstanden R_1 en R_2 "trekken" de ingangen naar nul (min). We drukken op Ta1 (dat betekent Ja aan de ingang) en wachten het resultaat af. Maar de schakeling werkt nog niet mee. We laten Ta1 los en drukken in plaats daarvan op Ta2: hetzelfde teleurstellende resultaat. Geeft niet - we drukken gewoon op allebei de toetsen! En ja hoor - LED1 geeft zich gewonnen. Als we nu een van beide toetsen (om het even welke) of allebei de toetsen loslaten gaat de diode meteen weer aan.



Figuur 133. Transistor-NEN: LED1 geeft GEEN licht zodra je op Ta1 EN Ta2 drukt.

NAND-Gatter

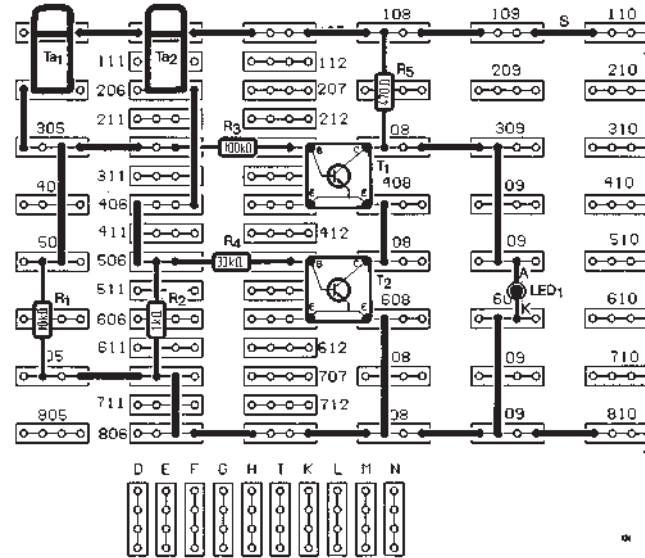
Ta1	Ta2	LED1
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Figuur 133a. Waarheidstabel voor de NEN-poort

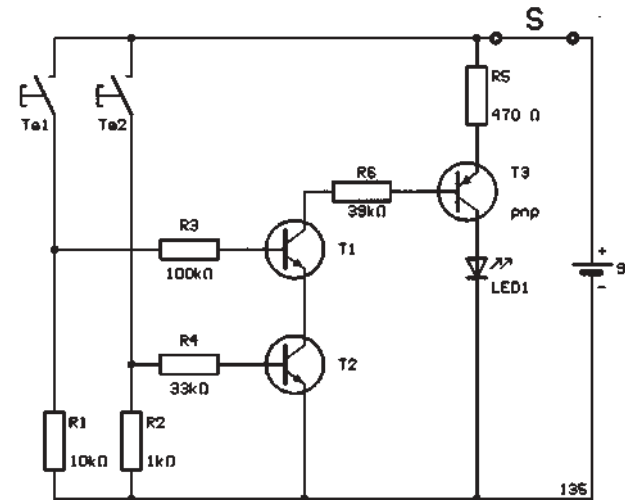
Als we nu eens nadenken over de verschillende stappen in onze proef dan blijkt: alleen als op de bovenste en op de onderste ingang "Ja" (positieve spanning - vandaar dat dit ook wel positieve logica wordt genoemd) wordt aangesloten, antwoordt de schakeling met "Nee". (De uitgang schakelt van hoge spanning - LED geeft licht - naar lage spanning, d.w.z. LED dooft.) Aha. Dat is dus een NEN-schakeling in transistortechniek.

102

We breiden onze NEN-schakeling uit met de pnp-transistor zoals aangegeven in figuur 135. We stellen vast: nu is LED1 donker wanneer de toetsen niet geactiveerd zijn. We drukken eerst weer op een toets en daarna op allebei tegelijkertijd en zien: alles is net andersom als bij de vorige proef. Ja en Ja wordt Ja! Nu hebben we dus een EN-poort met twee ingangen gebouwd.



Figuur 134. Het opbouwschema bij figuur 133.



Figuur 135. Transistor-EN: LED1 geeft licht wanneer je op Ta1 EN Ta2 drukt.

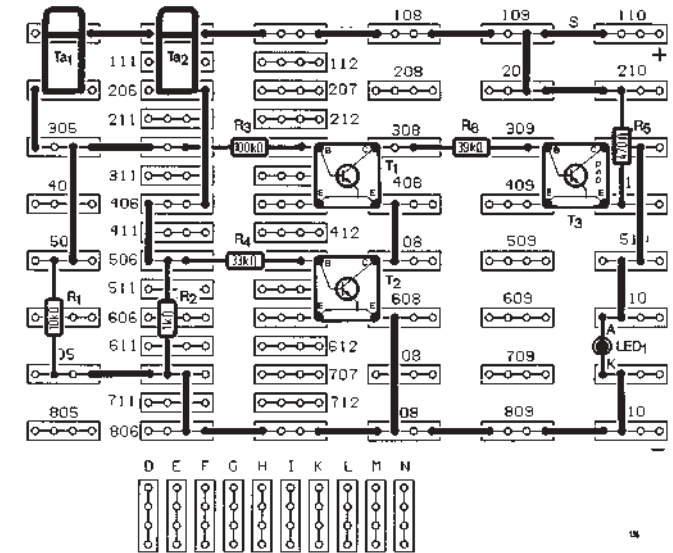
103

Als we de schakeling opbouwen zoals aangegeven in figuur 137 krijgen we een poort met ontkenning, die anders reageert. Druk maar zo vaak als je wilt op Ta1 of Ta2 of op allebei en je zult zien: telkens dooft LED1. Logisch dat dit een Niet-Of-poort wordt genoemd - of met een meer gangbare term een NOF-poort.

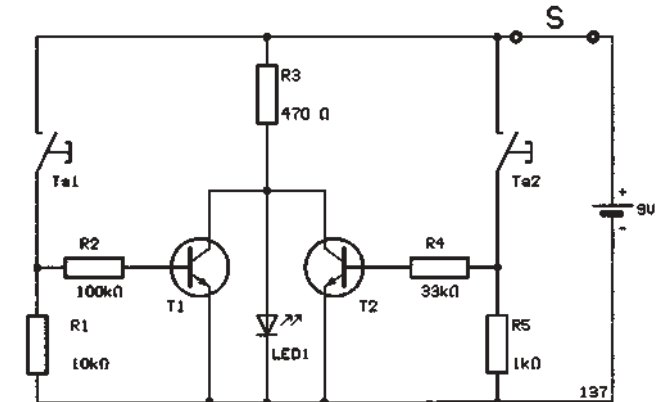
AND-Gatter

Ta1	Ta2	LED1
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Figuur 135a. Waarheidstabel voor de EN-poort.



136. Het opbouwschema bij figuur 135.



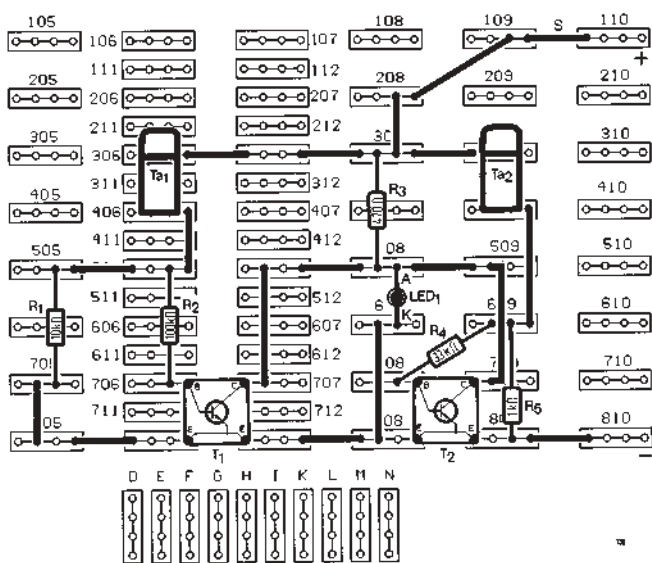
Figuur 137. Transistor-NOF: LED1 geeft GEEN licht als je op Ta1 OF Ta2 drukt.

NOR-Gatter		
Ta1	Ta2	LED1
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Figuur 137a. Waarheidstabel voor de NOR-poort.

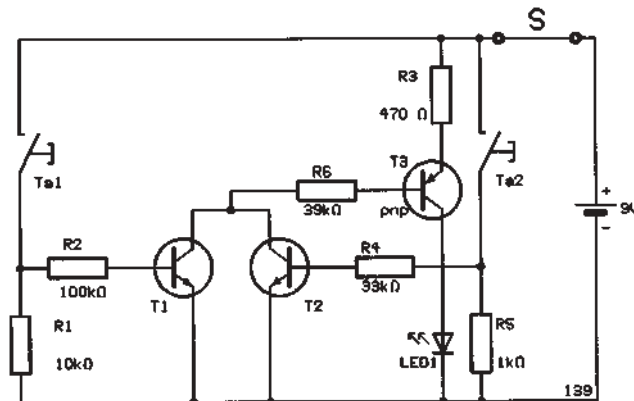
104 We breiden ook deze schakeling uit met onze pnp-transistor (figuur 139). Als je de batterij aansluit blijft LED1 aanvankelijk donker. Als je nu op Ta1 of Ta2 drukt of op allebei gaat de diode aan. Nu hebben we dus de beschikking over een OF-poort.

Er bestaat intussen een onvoorstelbaar groot aantal van deze schakelingen die met honderdduizenden tegelijk op siliciumchips zijn geïntegreerd. Een elektronische microkosmos die wordt bestuurd door een onfeilbare logica en waarin niets aan het toeval wordt overgelaten. Het wordt tijd dat ook wij bij onze experimenten gaan werken met geïntegreerde schakelingen.



Figuur 138. Het opbouwschema bij figuur 137.

Figuur 139. Transistor-OF: LED1 geeft licht wanneer je op Ta1 OF Ta2 drukt.



Figuur 140. Het opbouwschema bij figuur 139.

Figuur 139a. Waarheidstabel voor de OF-poort.

OR-Gatter		
Ta1	Ta2	LED1
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

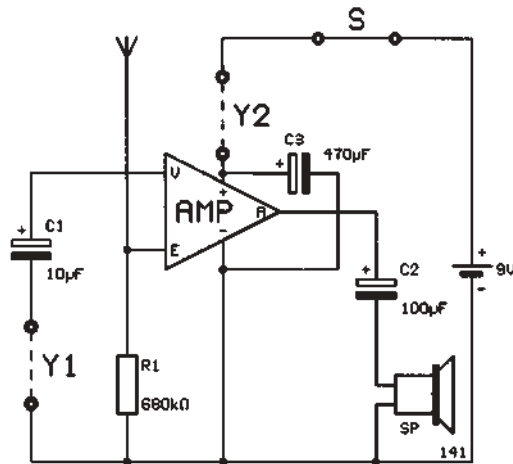
13. Van spanning naar vermogen: de AMP TBA 820

In onze experimenteerdoos zit ook een kleine krachtpatser - een geïntegreerd versterker-bouwelement waar je een luidspreker op aan kunt sluiten. Op de insteekbare module zitten nog een paar onderdelen die voor een goede werking ervan noodzakelijk zijn. Het geheel beschouwen we gezien vanuit de vijf stekerpootjes als een eenheid met een eigen symbool.

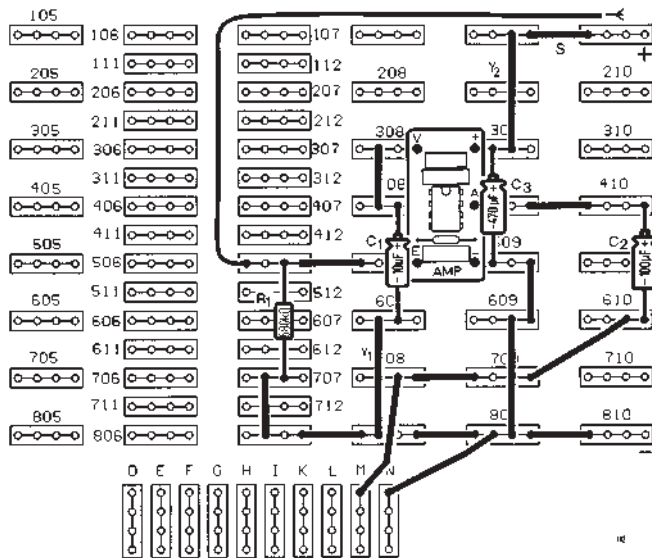
Versterkt alles wat je kunt horen

Het symbool voor een dergelijke versterker (in het Engels amplifier, vandaar AMP) is een driehoekje. Je komt het in allerlei schakelingen tegen. Links vinden we de ingangen, rechts de uitgang; aan de bovenkant de plus-, aan de onderkant de min-aansluiting voor de batterij. Maar waarom is er meer dan een ingang, vraag je je wellicht af. Waar dat goed voor is, daarover zullen we in het hoofdstuk over operationele versterkers meer te weten komen. Een speciale operationele versterker is ook onze AMP. Elk van zijn ingangen heeft een duidelijk omschreven eigen functie. Wat versterkt moet worden gaat naar ingang E. Hoe groot de versterking moet zijn bepalen we door het aansluiten van een externe schakeling op de ingang V. Deze speciale AMP is namelijk inwendig sterk tegengekoppeld. Dat vermindert de vervorming en houdt de versterking binnen redelijke grenzen. Daardoor kan de reactie van de versterker worden berekend. De grootste versterking (die gepaard gaat met een aanzienlijk gekraak en geknetter in de luidspreker) krijg je als je de ingang V met wisselspanning via een elco rechtstreeks aansluit op de min-pool. Tot een waarde van ongeveer 470 Ω geldt dat je al naar gelang de waarde van de weerstand in serie met deze condensator bij een toename van R een afname van de versterking krijgt. Dus hoe kleiner R , des te meer wordt er versterkt en des te groter is de vervorming door de AMP. Probeer het zelf maar eens in de volgende proeven.

105 In het experiment zoals aangegeven in figuur 141 laat de AMP zien wat hij kan. Eerst met een nieuwe of nagenoeg nieuwe batterij. In de luidspreker hoor je allerlei merkwaardige geluiden: gefluit, gebrom, gekraak, kortom alles wat er aan storende elektrische velden in de omgeving hoorbaar wordt.



Figuur 141. Hij laat spoken aan het woord en spoort verborgen elektrische leidingen in muren op: de AMP - gevoelige geïntegreerde vermogens versterker met C1 ingesteld voor maximale versterking.



Figuur 142. Het opbouwschema bij figuur 141.

Daar kun je stemmen van spoken of bovenaardse muziek van maken als je de antennendraad aanraakt die je ook bij de geesten-bezwering hebt gebruikt. Al klinkt het niet echt mooi.

We verwijderen nu de draadbrug Y1 en stellen vast: het geluid wordt een stuk zachter. Dit is dan ook de maximale waarde waarmee je de versterking kunt verminderen: oneindig grote weerstand in serie met C1! Nu kunnen we, zoals we hierboven hebben gezien, door middel van weerstanden met waarden van 470 Ω tot 1,2 Ω de versterking weer opvoeren. De weerstanden bevestig je op de plaats van de draadbrug Y1.

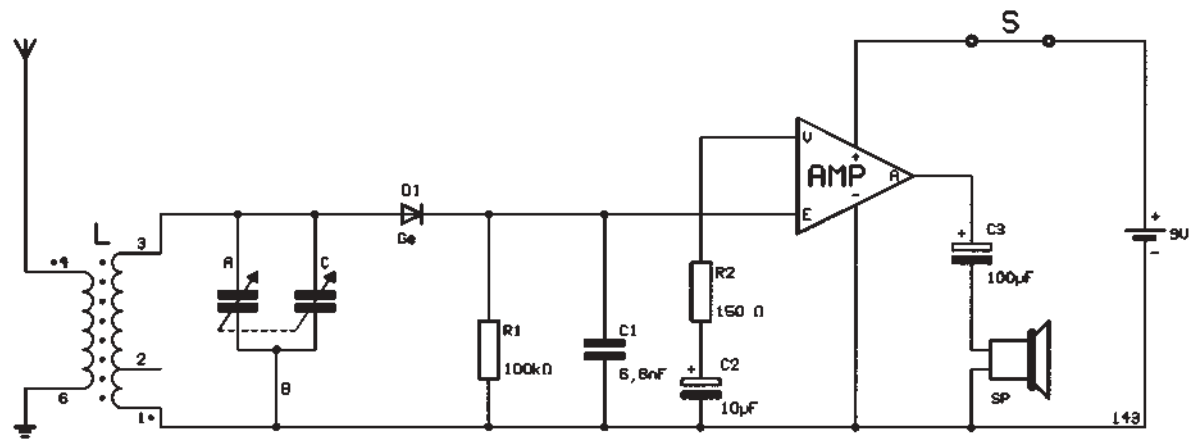
106 Nu komt een oudere batterij aan de beurt. Maar daar beleven we weinig plezier aan: de luidspreker gromt en jankt als een oude waakhond. We vervangen die dus weer door de nieuwe batterij en bevestigen bovendien tussen de plus-pool van de batterij en de plus-kant van de schakeling een weerstand van 100 Ω in plaats van de draadbrug Y2. Wat horen we dan? Net zulke onaangename klanken als daarnet. Het gejack en gegrom is dus blijkbaar te wijten aan de hoge inwendige weerstand van de oude batterij - en aan de grote versterking. Dat kunnen we controleren door de voorschakel- weerstand van C1 te verhogen. De vakman noemt dit de zelfbekrachtiging van de versterker - hij oscilleert. Wat dat precies voor effect heeft is afhankelijk van de toestand van de batterij. Bij een nieuwe batterij en de kunstmatige inwendige weerstand van 100 Ω kan een condensator van 470 µF (die je in de doos vindt) nog uitkomst bieden, als je die rechtstreeks op de plus- en de min-pool van de AMP aansluit. En eventueel moet je ook de weerstand voor de aansluiting V verhogen. Met zulke problemen wordt een elektro-technicus elke dag geconfronteerd.

107 We stappen nu over op de KOSMOS-nettransformator als die tenminste voorhanden is. Dat spaart batterijen. Mogelijk dat de luidspreker dan eerst driftig begint te brommen. Dat herinnert ons aan de bromtest van opa - blijkbaar vangt de schakeling capacitef netbrom op. Om dat in de praktijk te voorkomen moet je het geheel *afschermen*, d.w.z. de schakeling in een metalen behuizing plaatsen - net zoals je dat met een autoradio doet.

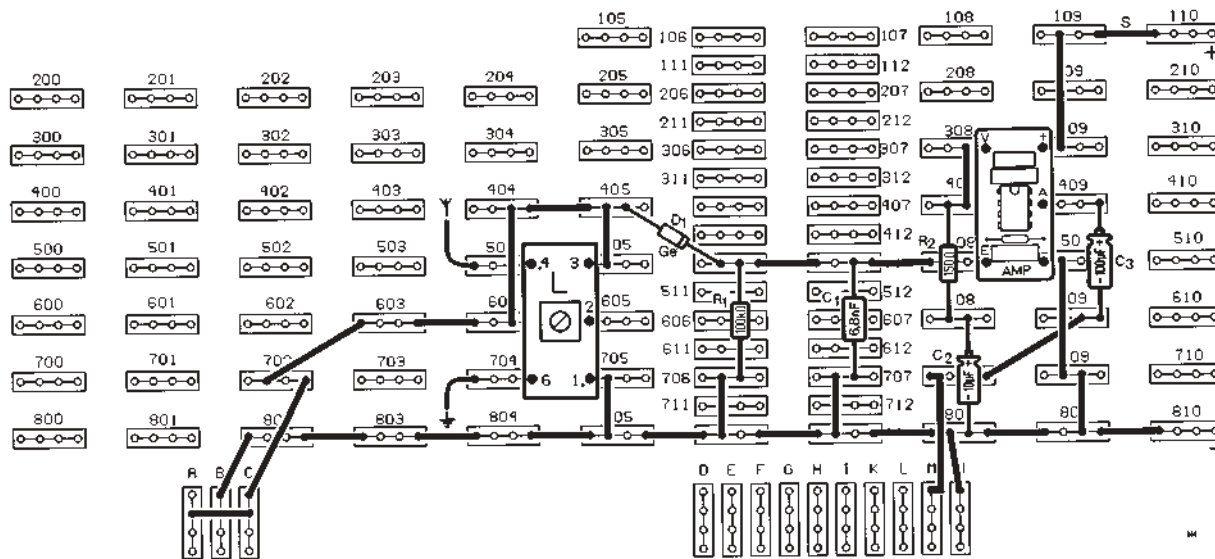
We onthouden dus: zowel een te grote versterking als een te grote inwendige weerstand van de spanningsbron kan ertoe leiden dat iets niet zo functioneert als het theoretisch was gepland. De oplossing voor een dergelijk probleem: minder versterken, de inwendige weerstand - voor wisselspanning - verkleinen door een grote condensator toe te passen, de schakeling beveiligen tegen storende velden van buitenaf.

Gewenste tonen

Het is mogelijk om aan de ingang van een versterker de via de antenne opgevangen gewenste signalen van ongewenste te scheiden. Goudzoekers gebruiken een zeef: zand en water glippen erdoor, maar de grotere voorwerpen blijven erin achter. Die kunnen ze dan op hun gemak naar kleur sorteren. Ook om naar de radio te kunnen luisteren heb je een zeef nodig. Die bestaat uit een spoel en een condensator en wordt *trillingskring* genoemd. Elke radiozender heeft een bepaalde frequentie. Als je die kent kun je de juiste waarden voor de spoel en de condensator berekenen. In de experimenterdoos tref je een *middengolfmodule* (L-module) aan met een afgeschermd spoel en een passende *instelbare condensator*. Met deze condensator, parallel geschakeld aan de spoel, kun je op zoek gaan naar zenders. Wanneer de frequentie van een zender overeenkomt met de ingestelde resonantiefrequentie



Figuur 143. De AMP heeft de kwaliteit van de detector aanzienlijk verbeterd: een eenvoudige radio met zenderafstemming.



Figuur 144. Het opbouwschema bij figuur 143.

van onze trillingskring, wordt deze zender uit de wirwar gepikt van al die andere signalen die in de lucht zijn. Het signaal dat dan de trillingskring binnenkomt kan gelukkig nog verder worden verwerkt voordat het in de vorm van gesproken woord en muziek wordt weergegeven.

108 Voor dit doel bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 143 en draaien dan de instelbare condensator een keer langzaam vanuit de nulstand helemaal op. Wat je dan te horen krijgt is afhankelijk van allerlei factoren. Om een sterke middengolfzender te kunnen ontvangen volstaat het eerder gebruikte eindje draad als antenne. Voor zwakkere zenders heb je al wat meer draad nodig. In de meeste gevallen kun je nog wel behelpen met een *kamerantenne*: bevestig een stuk draad met een lengte van een paar meter op een zo hoog mogelijk punt. En vergeet de aarde niet. Ook daarvoor is een stuk draad dat op de vloer wordt gelegd meestal al voldoende. Maar je kunt de draad beter vastmaken aan de waterleiding of een radiator. Probeer het maar eens! Met het opsporen van golven kun je trouwens wel een hele avond zoet zijn. Op geen ander terrein is er vroeger waarschijnlijk zoveel geknutseld en geprobeerd als juist op dit terrein. Verderop vind je over dit onderwerp nog een hoop materiaal! Maar nu moeten we eerst eens proberen te achterhalen hoe dat allemaal in z'n werk gaat.

'n Uitstapje naar het rijk van de hoge frequenties

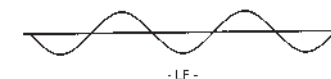
In figuur 143 herkent de vakman de moderne variant van de oervorm van de radio: een trillingskring plus een hoogfrequente gelijkrichterdiode - dat is de legendarische detector, die zowat zeventig jaar geleden voor het eerst de "draadloze omroep" onder de aandacht van het publiek bracht. Aanvankelijk kwam daar echter nog geen versterker zoals onze AMP aan te pas en was er een engelengeduld voor nodig om met behulp van de punt van een draad de juiste plaats te vinden op een loodsulfide-kristal of iets dergelijks. Om de boodschap vanuit de studio over te brengen naar de huiskamer wordt gebruik gemaakt van hoogfrequente trillingen. Een typische middengolffrequentie is b.v. 1 MHz (1 miljoen trillingen per seconde). Zulke snelle trillingen hebben een interessante eigenschap: de uit elektrische en magnetische veldlijnen bestaande wisselvelden zijn in staat zich los te maken van de metalen mast die zendantenne wordt genoemd. Vanuit deze mast planten zij zich voort in de vorm van cirkels, net zoals de golven die ontstaan wanneer je een steen in stilstaand water gooit. Dat gebeurt met de snelheid van het licht: 300.000 km per seconde. Tussen twee "golfbergen" van een dergelijke HF-trilling ligt dus bij 1 MHz een afstand van 300 m. Dat is de golflengte, die wordt aangeduid met de Griekse letter lambda. Om ervoor te zorgen dat er tijdens het zenden een goed rendement wordt behaald dient de zendmast al naargelang de golflengte eveneens een bepaalde lengte te hebben. Daarom zijn deze masten zo hoog.

Het geheim van de detector

Een miljoen trillingen per seconde, dat hoort niemand. Ons gehoor kan hooguit 16.000 Hz waarnemen. De hoogfrequente golven zijn dan ook slechts het transportmiddel om vanuit de draad in de vrije ruimte te komen. Van tevoren worden ze "geladen", gemoduleerd, met datgene wat wij kunnen horen.

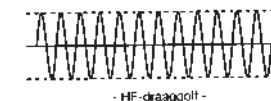
laagfrequente of LF-trilling die je kunt horen;

a



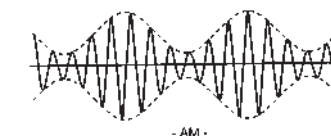
hoogfrequente of HF-trilling van de zender;

b



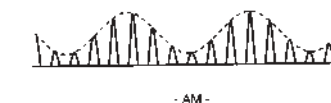
LF op HF overwint de ruimte;

c



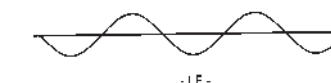
resultaat van de ontvangst achter de gelijkrichter;

d



omhullende curve van de HF-trilling achter de gelijkrichter aan de condensator: herwonnen LF die je kunt horen.

e



Figuur 145. Eerste les in radiotechniek.

Bij de korte, midden- en lange golf gebeurt dat door *amplitude-modulatie*, AM. Dat wil zeggen, de geluidstrillingen veranderen symmetrisch de trillingswijdte, dus de amplitude van de HF-trilling (zie figuur 145c).

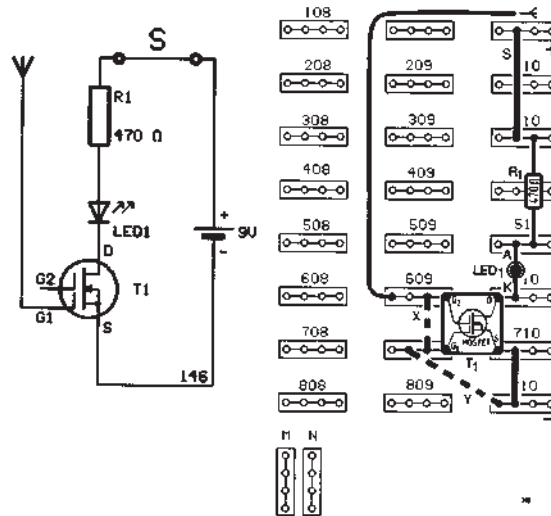
De detector haalt de boodschap weer van de hoogfrequente *draaggolf*. De detector is een gelijkrichter, d.w.z. hij laat stroom maar in een richting door. In onze radio's splitst hij de symmetrische trilling op de nullijn in de lengterichting en levert dan halve golven af met geluidstrillingen "op hun rug". Nu moeten we nog van de HF-component zien af te komen en daar zorgt een condensator voor. Zijn lading volgt uitsluitend de piekwaarden van de HF-component en de "verbindingslijn" van deze piekwaarden is onze toonfrequentie (zie figuur 145e). Daar zat de AMP net op te wachten en, nadat hij deze signalen flink heeft versterkt, levert hij ze bij de luidspreker af. Die zet ze om in hoorbare geluidsgolven, dezelfde geluidsgolven die in de zender door de microfoon werden opgevangen. En dat gebeurt allemaal vrijwel op hetzelfde ogenblik waarop het geluid wordt geproduceerd. Per slot van rekening reist zo'n trilling met de snelheid van het licht. In deze dienstverlenende functie zullen we de AMP nog vaker tegenkomen. Maar hij treedt ook zelfstandig op, want hij kan meer dan alleen maar ingangsspanningen versterken!

14. Een transistor van een andere soort: de MOSFET

Aan een ding hebben de elektronika-monteurs zich bij de bipolaire transistoren altijd al geërgd: zonder stuurvermogen (al is het nog zo weinig) geen versterking; zonder basisstroom (al is die vaak miniem) geen collectorstroom, zelfs niet bij de Darlington-schakeling. Maar de stroom in halfgeleiders kun je ook anders sturen, namelijk door middel van elektrische velden. Denk in dit verband maar eens aan de condensator: de laadstroom vloeit immers niet echt door de isolatielaag, maar de lading van de ene kant oefent slechts haar invloed uit op de ladingdragers aan de andere kant. Op soortgelijke grondslag werden destijds de *veldeffecttransistoren* ontwikkeld. Dat wil zeggen: de stroom wordt door een elektrisch veld, dus door een spanning gestuurd. Er vloeit nagenoeg geen stroomstroom.

109

We gaan meteen eens kijken hoe dat in z'n werk gaat. Met het snel volgens de aanwijzingen in figuur 146 opgezette experiment kun je leuke spelletjes uithalen. De antenne draad heb je nog over van de geestenbezwering. Als je met je hand in de buurt van die antenne komt licht de LED op of wordt ze donker. Maar het is niet goed te voorspellen wanneer dat gebeurt. Als we met de montageplaat de kamer rondlopen, zal de diode nu eens licht uitstralen en dan weer donker zijn. Metalen voorwerpen, elektrische leidingen, ja zelfs onze dierbare huisgenoten zorgen enkel en alleen door hun aanwezigheid ervoor dat de LED oplicht of juist dooft.



Figuur 146. De stoorveld-indicator: chaotische aanwijzing, maar geen spoken.

Een chaos van elektrische velden alom!

Op onze wonderbaarlijke transistor zit een metalen aansluiting voor de sturing, een *elektrode*. Deze is door siliciumoxyde geïsoleerd van een op de juiste wijze gedoteerd, geleidend kanaal in de halfgeleider. Het geleidend vermogen van dit *kanaal* wordt beïnvloed door een elektrisch veld dat wordt opgewekt door de aangelegde stuurspanning. Aan deze constructie heeft de transistor zijn naam te danken: *MOSFET*

(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Al naar gelang zijn samenstelling en dotering geleidt het kanaal uit eigen beweging (in het symbool aangegeven door een doorlopende lijn) of pas nadat voldoende stuurspanning is aangelegd (onderbroken lijn). De stroom vloeit dus niet door p- en n-zones, maar blijft in een kanaal met een vaste dotering. Daarom worden zulke transistoren ook wel *unipolaire transistoren* genoemd.

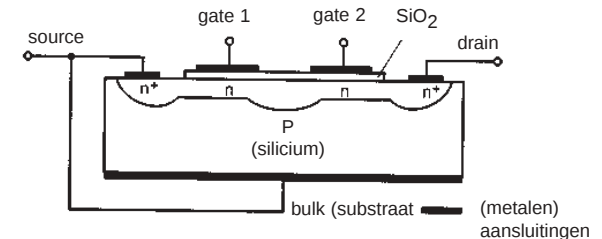
De bron achter de poort...

De aansluitingen van de MOSFET hebben andere namen dan die van de bipolaire transistoren. We zullen ze eens even naast elkaar zetten: Aansluiting voor de sturing: bipolair = basis; unipolair = gate (poort).

Tegenelektrode van de sturing, "onderste" aansluiting van de hoofdkring: bipolair = emitter; unipolair = *source* (bron); tweede ("bovenste") hoofdaansluiting: bipolair = collector; unipolair = *drain* (afvoer).

Je kunt het ook zo bekijken: emitter en source sturen de door de basis resp. poort gestuurde ladingdragers op pad, collector en drain verzamelen ze weer resp. laten ze "afvloeien" (drainage).

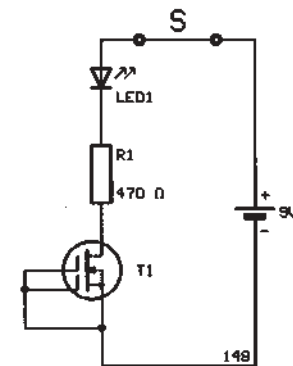
Uit het grote aantal verkrijgbare MOSFET's hebben we een bijzonder interessant type uitgezocht en daarvan vind je in de experimenteerdoos een exemplaar. Onze MOSFET heeft zelfs twee stuur elektrodes en geleidt ook nog als de gate-source-spanning 0 V bedraagt. Hij spert pas bij een negatieve stuurspanning. Dit wordt een *verarmings-type* genoemd. De officiële naam ervan luidt *n-channel Dual Gate MOS field effect tetrode, depletion type* (tetrode, omdat er vier aansluitingen zijn). Laten we hem voortaan maar gewoon "MOSFET" noemen. Figuur 147 laat het principe zien waarop de constructie van onze MOSFET berust.



Figuur 147. Dual gate-MOSFET: twee geïsoleerde stuur elektrodes op een n-geleidend kanaal.

Dubbel gesperd is beter

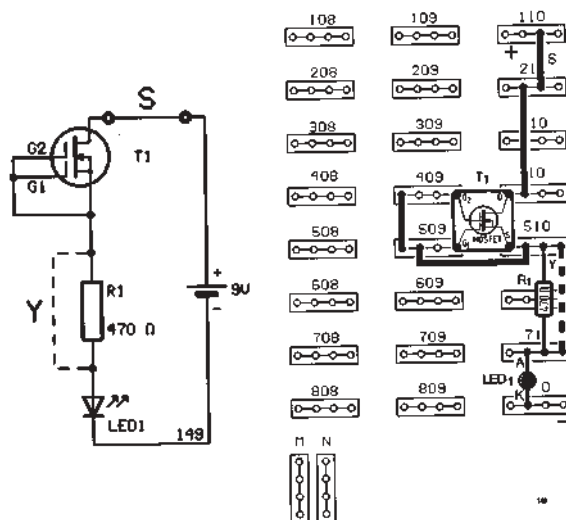
De beide stuur elektrodes doen denken aan onze NEN-poort uit hoofdstuk 12: alleen wanneer aan de beide elektrodes een ten opzichte van de spervoorde positieve spanning wordt aangelegd (Ja) is de hoofdstroomkring geleidend (uitgang is "geïnverteerd" Ja). We gaan dat eens wat nauwkeuriger bekijken. Wanneer geleidt de MOSFET en wanneer niet?



Figuur 148. Zelfgeleiding: de voorspanning van de gate bedraagt nul, maar desondanks geeft de LED licht, al is het maar zwak.

110 We veranderen de opbouw zoals aangegeven in figuur 146 een beetje en dan wordt alles duidelijk (figuur 148). Verwijder de antenne en sluit de beide poorten door middel van de bruggen X en Y direct aan op de source-aansluiting. Dan blijkt: LED1 geeft licht, al is de licht-intensiteit lang niet zo groot als bij de proef met antenne. In ieder geval geleidt het kanaal ondanks een gate-sourcespanning van 0 V. Zelfgeleiding bij wijze van spreken. Bewijs geleverd. Voor deze bedrijfstoestand zal het dan ook wel geen verschil maken of de LED en de weerstand worden aangesloten aan de kant van de drain of aan die van de source.

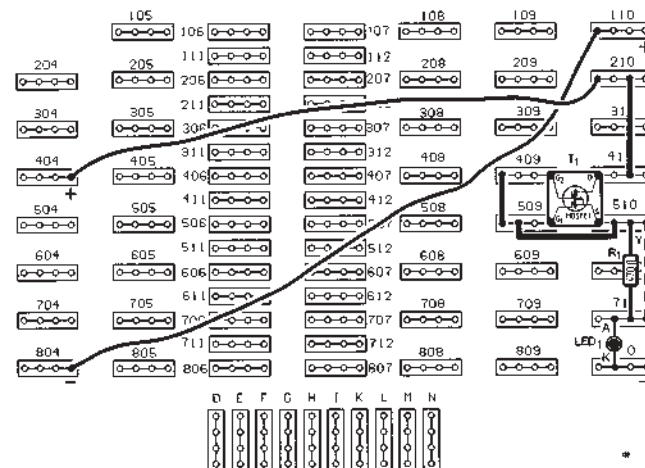
111 Met de opstelling zoals aangegeven in figuur 149 zullen we dat controleren. Dus gauw de onderdelen verplaatsen en dan zie je dat het klopt.



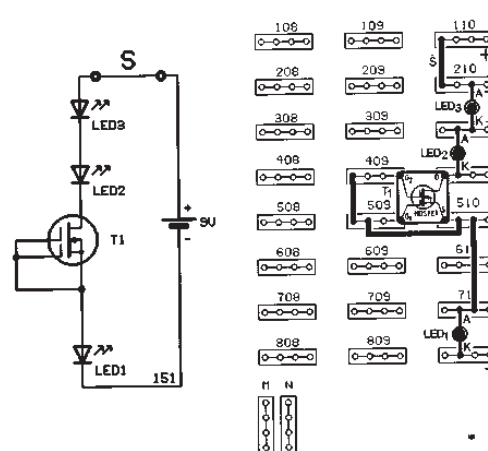
Figuur 149. In de drain- of in de sourcetak: bij deze gate-schakeling maakt het voor de MOSFET geen verschil waar LED en weerstand zijn opgenomen.

112 Omdat we helemaal niet bang zijn en bovendien toestemming hebben van de fabrikant, verwijderen we nu R1, bevestigen in plaats daarvan de brug Y en laten zodoende LED1 schijnbaar zonder enige beveiliging in de stroomkring achter. En het is nauwelijks te geloven, maar LED1 geeft nog steeds net zo weinig licht als voorheen. Voor alle zekerheid nemen we R1 opnieuw op in de schakeling en sluiten hem kort met de draadbrug Y. We vergelijken het resultaat met dat van de vorige schakeling en stellen vast: inderdaad, er is nagenoeg geen verschil. En we gaan nog een stapje verder. Door een tweede batterij van 9 V in het linkerpaneel (of de KOSMOS-nettransformator X) in

serie te schakelen met de eerste batterij van 9 V zoals aangegeven in figuur 150. Alles bij elkaar dus 18 volt! De diode geeft nu wel wat meer licht, maar het verschil is niet verontrustend.



Figuur 150. Ook als de spanning wordt verdubbeld, blijft de stroom nagenoeg constant.



Figuur 151. Bij een constante stroom is er genoeg voor vele: alle LED's in de stroomkring stralen net zoveel licht als een alleen (test met overbrugging van de afzonderlijke licht-emitterende diodes!)

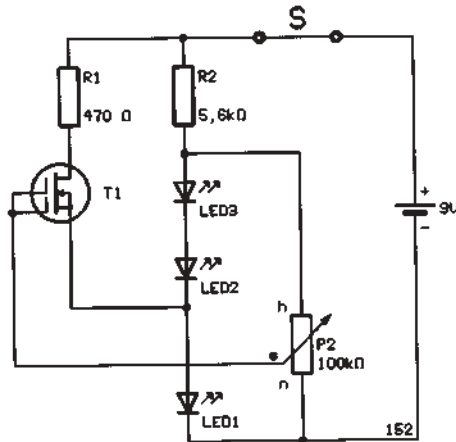
113 We verwijderen de tweede batterij en nemen de twee resterende licht-emitterende diodes op in de stroomkring (figuur 151). Met andere woorden, we verlagen de effectieve bedrijfsspanning met tweemaal de waarde van de drempelspanning. Maar zelfs daardoor verandert de lichtintensiteit van LED1 niet veel. Laten we de resultaten kort samenvatten: bij een gate-spanning van 0 V geleidt de MOSFET niet alleen, hij controleert ook de stroom tamelijk nauwkeurig, ongeacht de hoogte van de bedrijfsspanning. En die stroom blijft zo gering dat er voor de licht-emitterende diode ook zonder beveiligingsweerstand geen gevaar dreigt. Een schakeling die zo reageert wordt constante-stroombron genoemd. Er bestaan daarvoor nog andere oplossingen, ook met bipolaire transistoren. Alles bij elkaar een prima hulpmiddel, bijvoorbeeld voor de besturing van lampen die zijn aangesloten op een sterk pulserende voedingspanning!

Plus-min-swing aan de poort

Toch moet er een punt zijn waarop de MOSFET spert. En wel bij een negatieve gate-sourcespanning UGS. Gelukkig is negatief een relatief begrip. De licht-emitterende diode komt ons op onbureaucratische wijze met haar LED-spanning te hulp. De rest is een kwestie van het standpunt dat je inneemt. Gezien vanuit de source-aansluiting bedraagt de negatieve spanning van de kathode van de LED bijna 2 V, dat is namelijk de waarde van de LED-spanning. Spanningen die worden gemeten ten opzichte van een vastgesteld referentiepunt worden potentialen genoemd. Dat kun je vergelijken met een landschap met bergen en dalen: het referentieniveau is de zeespiegel ("normaal nul"). Dalen kunnen ten opzichte van de zeespiegel best op een "negatieve hoogte" liggen. Waar het eigenlijk op neerkomt: we kunnen de gates van onze MOSFET ten opzichte van de source een negatieve voorspanning geven zonder dat we daarvoor een tweede batterij nodig hebben.

114 We gaan dadelijk nog een stapje verder, bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 152 en testen ze uit. Als we P2 van n naar h draaien stellen we vast: LED1, die in het begin nog donker was, licht steeds helderder op. Al in de buurt van de aanslag h is de maximale lichtintensiteit bereikt.

Bij deze proef heeft de al eerder toegepaste truc met de LED-spanning opnieuw zijn deugdelijkheid bewezen. Gezien vanuit de source kunnen we met P2 over de beide licht-emitterende diodes een van negatief tot positief oplopende spanning aftakken en daarmee de MOSFET sturen. Hoe hoger de stand van de looper, des te hoger de spanning en des te sterker de stroom, totdat deze door de beveiligingsweerstand wordt begrensd.

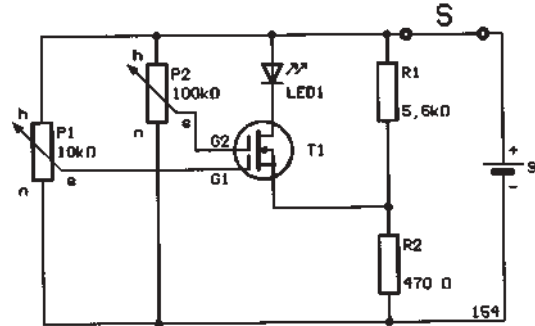


Figuur 152. De onderste LED is zowel indicator als onderdeel voor het opwekken van de voorspanning: aan de potmeter kunnen (in verhouding tot de source-aansluiting) positieve en negatieve gate-spanningen worden ingesteld. LED1 doorloopt daarbij het volledige spectrum van de lichtintensiteit.

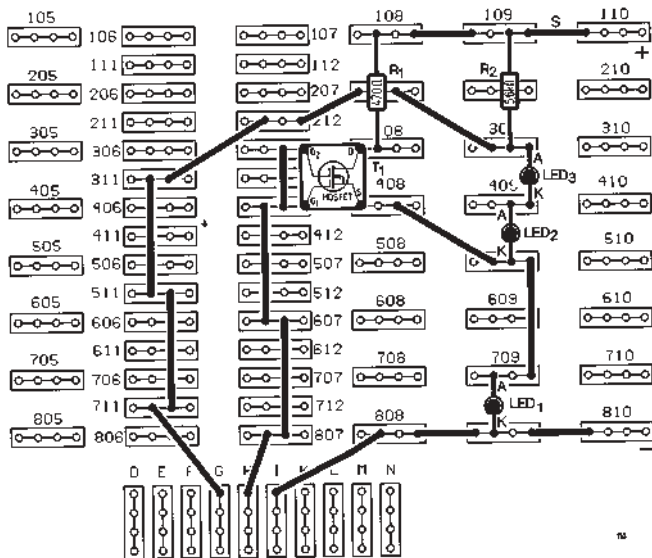
Ieder het zijne

Als er dan toch twee gates zijn moeten ze ook maar elk afzonderlijk aan hun trekken komen.

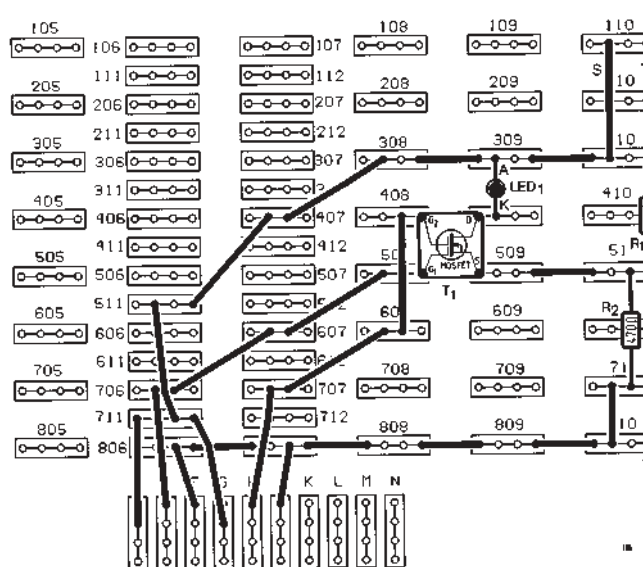
115 In de schakeling zoals aangegeven in figuur 154 krijgen de beide gates elk hun eigen spanning. We spelen een beetje met de knoppen en houden intussen de licht-emitterende diode in het oog. Deze keer zullen we volstaan met een eenvoudige spanningsdeler ter verkrijging van de sperspanning. Het knooppunt van R1 en R2 dient als referentiepunt.



Figuur 154. Dubbele sturing: met elk van beide potmeters kan de lichtintensiteit worden ingesteld, maar de positie van de loper van de potmeter die niet wordt gebruikt is bepalend voor de grenswaarde.



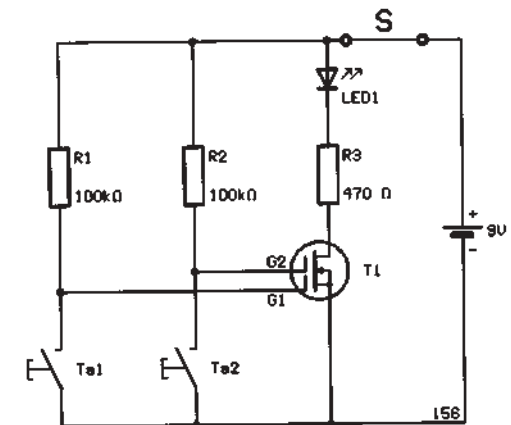
Figuur 153. Het opbouwschema bij figuur 152.



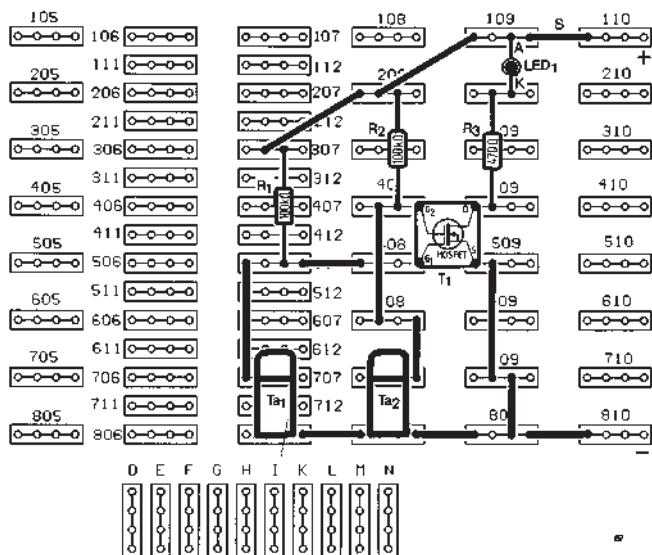
Figuur 155. Het opbouwschema bij figuur 154.

Nu blijkt: als een van de beide potmeters P1 of P2 op h is ingesteld, kan met de andere potmeter de lichtintensiteit worden teruggebracht tot "nul". Als echter een van beide op n is ingesteld, heeft de positie van de andere vrijwel geen effect. Je zult dan hoogstens, met G1 in gesperde toestand, in het donker een heel zwak schijnsel kunnen zien als je P2 opdraait. Blijkbaar stuurt G2 effectiever dan G1. Je kunt met de beide potmeters tussen de eindtoestanden sturen zoals je wilt. Maar let op: hoe groot de maximale lichtintensiteit is die je met de ene potmeter kunt instellen, is afhankelijk van de actuele stand van de andere. Dat is net als bij de tuinslang: als je de waterkraan niet ver genoeg opendraait, komt er aan de uitgang niet veel water uit, ook als je het ventiel helemaal hebt opgedraaid.

116 We breken deze schakeling af en bouwen de test-schakeling op volgens de aanwijzingen in figuur 156. Dan drukken we afwisselend op Ta1 en Ta2 en letten daarbij op de reactie van LED1. We zien dan dat de diode in beide gevallen minder licht geeft dan wanneer de toetsen zijn geopend. Logisch - per slot van rekening wordt het kanaal duidelijk "afgeknel" wanneer door een druk op een van de toetsen de betreffende gate wordt aangesloten op 0 V. Bovendien stellen we vast dat gate 2 - zoals hierboven al is opgemerkt - een grotere invloed heeft dan gate 1. Door een druk op Ta2 neemt de lichtintensiteit sterker af dan door het sluiten van Ta1.



Figuur 156. Vergelijking van de gates: als je op Ta2 hebt gedrukt is LED1 vrijwel helemaal donker- na een druk op Ta1 gloeit ze nog heel zwak. Gate 2 heeft dus meer invloed dan gate 1.

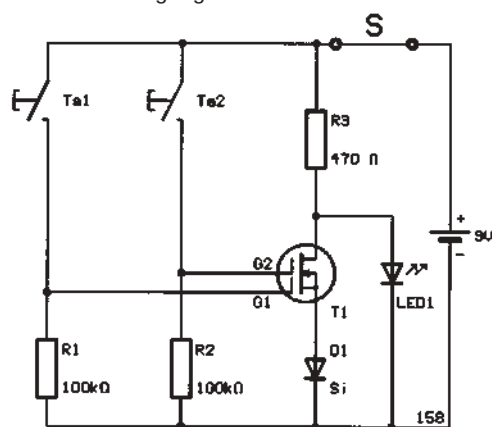


Figuur 157. Het opbouwschema bij figuur 156.

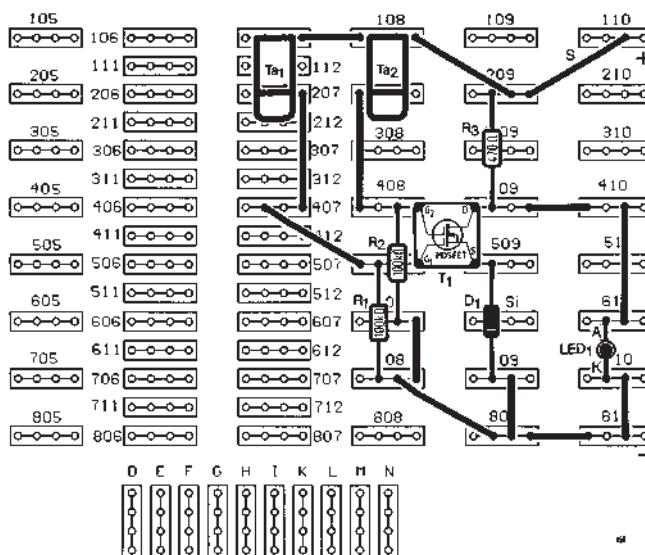
MOS-logica

Als bipolaire transistoren geschikt zijn voor logische schakelingen, waarom dan niet ook unipolaire?

117 De MOSFET als logische poort: voor de toepassing waarvoor we nu de schakeling opbouwen volgens de aanwijzingen in figuur 158, is het verschil tussen de beide gates van geen belang. Aanvankelijk geeft LED1 licht en signaleert zodoende Ja aan de uitgang.



Figuur 158. NEN-poort met slechts één MOSFET: Ja aan gate 1 EN Ja aan gate 2 resulteert in NIET-Ja aan de uitgang (LED dooft).

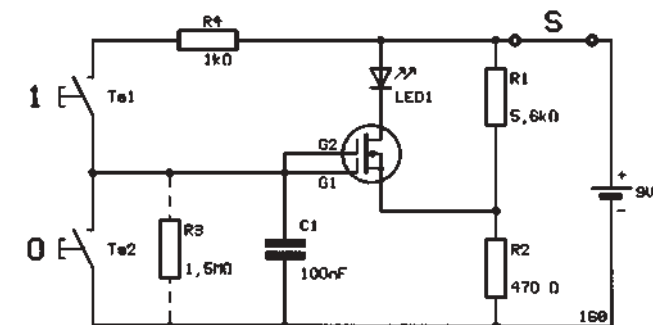


Figuur 159. Het opbouwschema bij figuur 158.

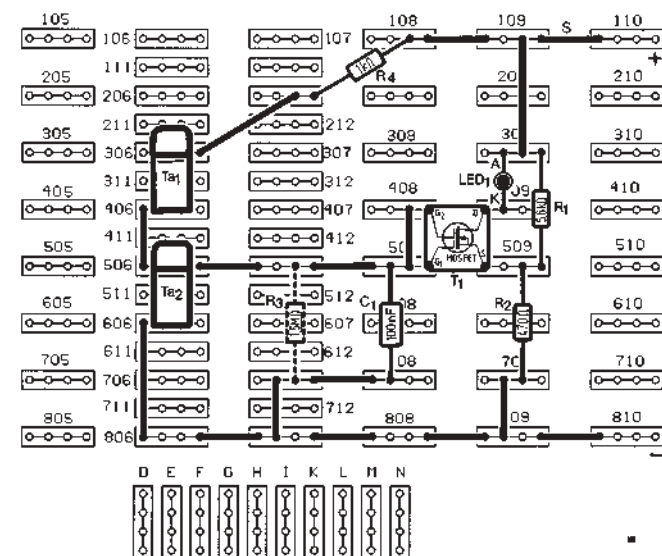
Er gebeurt niets als alleen Ta1 of Ta2 wordt gesloten. De licht-emitterende diode dooft pas als je op beide toetsen tegelijkertijd drukt. Daar hebben we nu eindelijk onze NEN-poort met de MOSFET - eentje is genoeg! De volgende schakeling heeft in de wereld van de computers evenwel een heel voorname plaats ingenomen.

118 Refreshment-schakeling: met de schakeling zoals aangegeven in figuur 160 bouwen we een "sterk vergrote" computer-geheugencel zoals die er bij wijze van spreken onder de microscoop uit zou zien. De weerstand R3 laten we voorlopig weg. Door even op Ta1 te drukken schakelen we LED1 in. Als we na een poosje de schakeling bekijken, stellen we vast: de diode geeft nog steeds licht, tenminste als de batterij het nog doet. Pas door een druk op Ta2 veranderen we Ja in Nee - LED1 dooft.

119 We vervangen C1 door een condensator van 10 μF en sluiten de plus-pool aan op G1. Parallel daaraan nemen we nu de weerstand R3 van 1,5 M Ω op in de schakeling (figuur 162). Op die manier breiden we de "microscoop" uit met een "camera voor vertraagde beelden". Vervolgens drukken we weer op Ta1, maar blijven deze keer de schakeling nauwkeurig in het oog houden. Dan blijkt: na een paar seconden is LED1 aanzienlijk donkerder geworden - tijd om bij te tanken! Als we nu even op Ta1 drukken wordt het dadelijk weer licht - voor een poosje.



Figuur 160. DROM-geheugencel: Ja of Nee kan in een MOSFET worden opgeslagen. C1 houdt de betreffende waarde vast. R05



Figuur 161. Het opbouwschema bij figuur 160.

Deze beide experimenten hebben ons het volgende geleerd:

1. Door een condensator aan te sluiten op de gate (of ook al door de gate alleen als condensator te gebruiken) kun je de MOSFET-ingang in de ja- of nee-toestand houden. Deze keer signaleert LED1 door op te lichten dat er Ja op de ingang is aangesloten, want dan vloeit er stroom door het kanaal (dus Nee aan de uitgang, met betrekking tot de spanning).
2. Als de oxydelag voor een volmaakte isolatie zou zorgen, dan zou de gate de betreffende lading eeuwig kunnen vasthouden (of zolang totdat we dit "ruw" onderbreken door een druk op toets Ta2). Dat wil zeggen dat het geheel bistabiel is, een flip-flop, dus een geheugencel voor Ja of Nee.