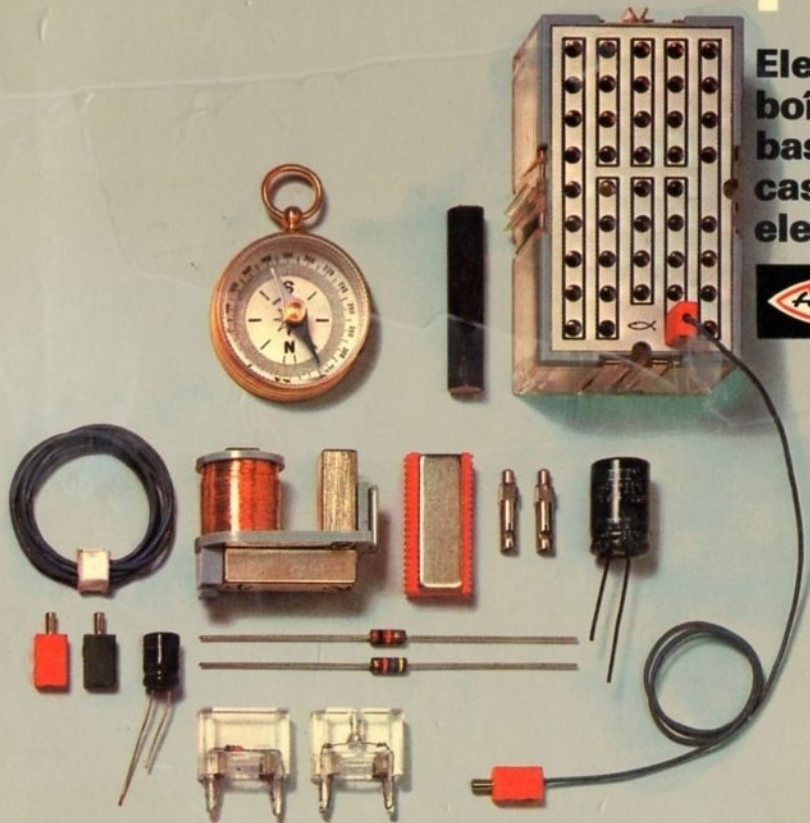


fischer[®]technik[®]

hobbylabor 1

Elektronik-Grundkasten Gleichstromkreis
boîte de base électronique circuit à courant continu
basic electronic kit DC circuit
cassetta elettronica base circuito a corrente continua
elektronika basisdoos gelijkstroomkring



Art.-Nr. 6 39560 7

“Dit gesprek droeg er toe bij dat ik mij weer wat intensiever met formules en wetten ging bemoeien en al spoedig merkte ik toen dat niets zo praktisch is als de theorie.

Wanneer we weten volgens welke regels krachten met hefbomen of katrollen zijn over te brengen, dan besparen we ons een hoop werk. Vele problemen zijn ook met proberen eenvoudigweg niet op te lossen, maar een paar getallen of schakelschema's losjes op papier gekrabbeld, voeren direkt tot het gewenste doel.”

(uit het fischertechnik boek “Kleine uitvinders – grote ideeën” door Dr. Herbert W. Franke)

fischertechnik[®]hobby

Handboek voor

hobbylabor 1

elektronika, de gelijkstroomkring

stroom: 4 x 1,5 V batterijen
of de ft-trafo mot 4

proefopstellingen: met fischertechnik 200 of hobby 1

meetapparatuur: voor de proeven in het tweede deel
van dit boek wordt de aanschaf van
een universeelmeter aanbevolen.



Voorwoord

Het nieuwe „hobbylabor“ is een aanvulling op het hobbyprogramma dat overwegend is gericht op technische toepassingen. Hobbylabor behandelt de theorie die nodig is om tot een helder begrip te komen van elektrische en elektronische processen. Het gaat in dit boek dan ook niet om het model, maar om de schakeling.

Hobbylabor voert ons stap voor stap door het rijk der elektronika en er is nauwelijks een natuurwetenschappelijke ontdekking te noemen, die sneller en ingrijpender onze wereld heeft veranderd – en dat nog dagelijks doet – dan juist de elektronika.

Het handboek van hobbylabor is omvangrijk en daar zijn verschillende redenen voor. Om te beginnen is het gebied van ons onderwerp, de gelijkstroomkring, vrij uitgebreid. En wanneer we iets op de juiste manier willen verklaren, dan moeten we dat vaak wat uitvoeriger doen. Niet dat we langdradig worden, maar wel dat we dieper op details ingaan. Het gaat er tenslotte om dat u de samenhang tussen de verschillende begrippen werkelijk begrijpt. En juist de basisprincipes van de elektronika zijn zeer belangrijk voor het succesvol experimenteren met elektronische schakelingen.

Vele toelichtingen zijn kleingedrukt. Ze zijn niet minder belangrijk. Als u echter meer in de praktische proeven bent geïnteresseerd dan is het geen ramp wanneer u de kleingedrukte stukken overslaat. Misschien neemt u ze later nog eens door wanneer u over een bepaald onderwerp meer wilt weten.

Er is nog een andere reden voor de dikte van dit boek. In de tekst zijn een groot aantal tekeningen afgedrukt die in vele gevallen een samenhang direct duidelijk maken, zonder veel woorden. Veel tabellen en diagrammen zijn opgenomen waarin u de resultaten van uw eigen proeven kunt noteren. Ook is op vele pagina's ruimte gelaten voor notities. Het handboek wordt op die manier het logboek van uw experimenten, waarop u later altijd weer kunt terugrijpen.

Tenslotte dient het boek als naslagwerk zijn nut te bewijzen bij uw hobby, daartoe zijn achterin een trefwoordenregister en diverse tabellen opgenomen. Natuurlijk is het zelfs in een boek als dit niet mogelijk elk onderwerp even diepgaand te behandelen.

In de tekst zijn tevens een aantal vragen opgenomen. De antwoorden blijken òf uit de daaropvolgende stof òf u kunt ze in het ahangsel vinden.

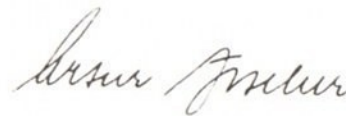
De hobbylabor dozen zijn zo opgezet, dat u met uw experimenten vele kanten uit kunt. Een nieuw onderdeel, het multi-schakelpaneel, heeft daarin een belangrijke bijdrage omdat u er allerlei onderdelen bij kunt gebruiken die in elke elektrotechnische winkel zijn te krijgen. Wanneer er een keer een weerstand, een diode of een transistor sneuvelt, kunt u die gemakkelijk vervangen.

Helaas, er is een wijd verbreid vooroordeel dat alle theorie grauw en gortdroog is. Het tegendeel blijkt, wanneer we de zaak goed aanpakken. Het ècht begrijpen van de samenhangen kan evenveel plezier en vreugde verschaffen als de goede werking van een model.

In deze zin vormen hobbyprogramma en hobbylabor een tweeenheid.

Genoeg gepraat, veel plezier en succes,

uw



Inhoud

1	Hobbylabor	1	2.5	De wet van Ohm	28
1.1	Stroomvoorziening	1	2.5.1	Algemeen	28
1.1.1	Batterijen	1	2.5.2	Bepaling van weerstandswaarden	28
1.1.2	fischertechnik trafo	2	2.6	Bouw van een weerstand	29
1.1.3	Stroombron van batterijen	3	2.7	De kleurcode	29
1.2	De fischertechnik meter	3	2.7.1	De weerstandswaarde	29
1.2.1	Het meten van de spanning	3	2.7.2	Tolerantie vermelding	30
1.2.2	Meetbereik en precisie	4	2.8	Weerstand als eigenschap van het materiaal	30
1.2.3	Het aflezen van meetwaarden	4	2.8.1	Een proef met water	30
1.2.4	De eerste meetproeven	5	2.8.2	Geleiding en weerstand	32
1.3	Het fischertechnik Multischakelpaneel (MSP)	6	2.8.3	Soortelijke weerstand en soortelijke geleiding	32
1.3.1	Doel en gebruik	6	2.9	Chemische werking van een stroom	33
1.3.2	Schakelstrips	7	2.10	Het stroom/spanningsdiagram	33
1.3.3	Kombineren met fischertechnik	8	2.10.1	Het coördinatenstelsel	33
1.3.4	Proeven met MSP en lampjes	8	2.10.2	De weerstandsrechte	35
1.3.5	Kontaktrails voor de plus- en voor de minpool	10	2.10.3	Het uitzetten van de gevonden waarden	36
1.4	Proeven met de ft-meter	11	2.10.4	De toepassing van het stroom/spanningsdiagram	37
1.4.1	Metten van de spanning	11	3	Elektrisch vermogen en arbeid	39
1.4.2	Metten van de stroomsterkte	11	3.1	Warmte-ontwikkeling van een elektrische stroom	39
1.5	Hulpmiddelen	14	3.2	Vermogen en arbeid in het spraakgebruik	41
1.5.1	Verbindingsbruggen	14	3.3	Het elektrisch vermogen	41
1.5.2	Kleurgeving	14	3.4	De elektrische arbeid	42
1.5.3	De montage van stekkers	15	3.5	Het vermogen/spanningsdiagram	45
1.5.4	Stekkerhuis	15	3.6	De maximale belasting	47
2	Stroom-spanning-weerstand	16	3.6.1	Berekening van de toelaatbare spanning	47
2.1	Eenvoudige metingen van weerstanden	16	3.6.2	De vermogenshyperbool in het stroom/spanningsdiagram	48
2.2	Wat is elektrische stroom	18	4	Weerstand in serie geschakeld	51
2.2.1	Het zijn de elektronen die	18	4.1	Algemeen	51
2.2.2	Vrije elektronen	18	4.2	De stroom in een serieschakeling	52
2.2.3	Het metaalrooster	18	4.3	Deelspanningen en totale spanning	53
2.2.4	De eenheid van en het symbool voor stroomsterkte	19	4.4	De totale weerstand	55
2.3	Elektrische spanning	20	4.5	De verhouding tussen deelspanningen en deelweerstand	56
2.3.1	Een zelfgemaakte spanningsbron	20			
2.3.2	Elektronen	22			
2.3.3	In welke richting loopt de stroom?	23			
2.3.4	De eenheid van en het symbool voor spanning	24			
2.4	Elektrische weerstand	24			
2.4.1	Geleiders en niet-geleiders	24			
2.4.2	Volgende metingen met weerstanden	25			
2.4.3	Eenheid en symbool van de weerstand	27			

4.6	Drie en meer weerstanden in serie	57	6.5	Totale geleiding en totale weerstand	88
4.7	Elektrisch potentiaal en potentiaalverschil	59	6.6	Vermogensverdeling in de parallelschakeling	89
4.8	De verdeling van het vermogen in een serieschakeling ..	62	6.7	Toepassingen	89
4.9	Toepassingen van de serieschakeling	63	6.7.1	Verlaging van de weerstand	89
4.9.1	Samenvoegen van weerstanden	63	6.7.2	De shunt	91
4.9.2	Bepaling van de weerstandswaarde	63	6.7.3	Vergroting van het meetbereik	93
4.9.3	Metingen aan gloeilampen	64	6.7.4	Parallelweerstand bij de regelbare weerstand	94
4.9.4	Voorschakelweerstand in de spanningsmeter	66			
4.9.5	De spanningsdeler	68	7	Energiebronnen	96
5	Instelbare weerstanden en potentiometer	69	7.1	Algemeen	96
5.1	Weerstanden met aftakkingen	69	7.2	Oriënterende metingen	96
5.2	De potentiometer bouwsteen	70	7.3	Inwendige weerstand van energiebronnen	98
5.2.1	Toepassing als regelbare weerstand	71	7.4	Konstante spanning	102
5.2.2	Maximale belasting	72	7.5	Konstante stroomsterkte	102
5.2.3	De taak van de beveiligingsweerstand	73	7.6	Welke energiebron is de gunstigste	103
5.2.4	Toepassing als spanningsdeler	74	7.7	Vermogensverlies van een energiebron	103
5.3	Het ijken van de regelbare weerstand	75	7.8	Weerstandsaanpassing	105
5.3.1	Ijking door spanningsmeting	75	7.9	De veroudering van batterijen	107
5.3.2	Ijking door spanningsvergelijking	76	7.10	Testen van batterijen	109
5.4	De potentiometer als onbelaste spanningsdeler	78	7.11	Kombineren van spanningsbronnen	110
5.4.1	Het spanningsdeler-diagram voor $U_p = 4,5 \text{ V}$	78	7.11.1	Serieschakeling	110
5.4.2	Standaardiseren van het spanningsdeler-diagram	79	7.11.2	Gelijke polen aan of tegen elkaar schakelen	111
5.5	Verskillende karakteristieken	80	7.11.3	Parallelschakeling	111
5.5.1	Lineaire karakteristieken	80	7.12	Het stroom/spanningsdiagram van een bron	113
5.5.2	Logarithmische karakteristiek	80			
5.5.3	Andere karakteristieken	81	8	Gemengde schakelingen	116
5.6	Toepassingen	82	8.1	Parallelschakeling met voorschakelweerstand	116
5.6.1	Regelbare spanningsdeler met voorschakel-weerstand ..	82	8.2	De belaste spanningsdeler	120
5.6.2	Meting van een onbekende weerstand	82	8.2.1	Een voorproefje	120
6	De parallelschakeling van weerstanden	84	8.2.2	Spanningsdeler met vaste weerstanden	121
6.1	Het verschil tussen de serie-en parallelschakeling	84	8.2.3	Potentiometer met belastingsweerstand	122
6.2	De spanning op een parallelschakeling	85	8.3	De spanningsdeler als vierpool	125
6.3	Deelstromen en totale stroom	85	8.4	Toepassingen	127
6.4	De verhouding van deelstromen en deelweerstanden ..	87	8.4.1	Meetfouten bij spanningsmetingen	127
			8.4.2	Meetfouten bij stroomsterktemetingen	128

8.4.3	Juiste meting van stroom of van spanning?	129	12	De condensator in de gelijkstroomkring	172
8.4.4	Deling in tienden	130	12.1	Het elektronenmagazijn	172
8.4.5	Cascadeschakeling	130	12.1.1	Het principe van de condensator	172
9	Netwerken	132	12.1.2	De condensatoren in hobbylabor	173
9.1	De stapsgewijze vereenvoudiging van netwerken	132	12.1.3	Eerste proeven	174
9.2	Grafische voorstelling van parallel geschakelde weerstanden	135	12.1.4	De hoeveelheid lading	177
9.3	Grafische voorstelling van in serie geschakelde weerstanden	138	12.1.5	Symbool en eenheid van capaciteit	177
9.4	Grafische voorstelling van netwerken	141	12.1.6	De energie van een geladen condensator	178
9.5	Stroom/spanningsdiagram van de spanningsdeler	143	12.2	Kombinaties van condensatoren	180
9.6	De wetten van Kirchhoff	145	12.2.1	De parallelschakeling	180
10	De brugschakeling	146	12.2.2	Serieschakeling van condensatoren	182
10.1	Opbouw	146	12.3	Spanningsverdubbeling door condensatorschakelingen	184
10.2	Inleidende experimenten	147	12.4	Laden en ontladen via een weerstand	186
10.3	De ingestelde brug	150	12.4.1	Algemene beschouwingen en inleidende proef	186
10.4	Toepassingen	151	12.4.2	Het laadproces	187
10.4.1	Metten van weerstanden	151	12.4.3	Ontladen	190
10.4.2	Het ijken van de potentiometer met de brug	153	12.5	De tijdconstante van de RC-schakeling	191
10.4.3	Meetbrug met de potentiometer	156	12.5.1	Algemeen	191
11	De Diode	158	12.5.2	De theoretische laadcurve	191
11.1	Een elektrisch ventiel	158	12.5.3	De theoretische ontladcurve	192
11.1.1	Eerste proef	158	12.5.4	Wat is een e-functie?	193
11.1.2	Een beetje theorie	160	12.5.5	Bepalen van tijdconstanten	193
11.1.3	De spanning op een diode	161	12.6	De RC-schakeling als vierpool	194
11.2	De karakteristiek van de diode	162	12.6.1	De condensator als dwarsschakel of als langsschakel ..	194
11.3	Hoogst toelaatbare stroom en maximale belasting	165	12.6.2	De RC-schakeling als spanningsdeler	195
11.4	Beveiligingsweerstand voor dioden	165	12.6.3	De belaste RC-schakeling	197
11.5	Toepassingen	166	12.7	RC-cascade	199
11.5.1	Gelijkrichten van een wisselspanning	166	12.8	Afvlakkondensator	201
11.5.2	Polariteitsafhankelijke schakelingen	167	12.9	De condensator als weerstand in een wisselstroomkring ..	205
11.5.3	Beveiliging met een diode	169	12.10	De differentiator	208
			12.11	De integrator	210
			12.11.1	De onbelaste integrator	211
			12.11.2	De belaste integrator	213
			12.12	De opbouw van condensatoren	213
			12.12.1	Kapaciteit als eigenschap van het onderdeel	213
			12.12.2	Het diëlektricum	214
			12.12.3	Diëlektrische sterkte	214
			12.12.4	Typen van condensatoren	214

13	De spoel in de gelijkstroomkring	216	14.1.2	Proeven met het Reedkontakt	253
13.1	Het magnetisch veld	217	14.1.3	Maximale belasting	255
13.1.1	Het magnetische veld van de aarde	217	14.2	Reedkontakt + spoel = Reedrelais	256
13.1.2	De permanente magneet	218	14.2.1	De elektromagnetische schakelaar	258
13.1.3	Noord-en zuidpool	219	14.2.2	De belangrijkste gegevens van een relais	260
13.1.4	Krachtlijnen	220	14.2.3	Reedrelais als verbreekkontakt	261
13.1.5	De elektromagneet	222	14.2.4	Relais dat zichzelf kan houden	263
13.2	De magnetische kring	223	14.2.5	Polair relais	263
13.2.1	De poolschoen	223	14.2.6	Relais met vertraagd afvallen	263
13.2.2	De gesloten magnetische kring	226	14.3	Het Reedrelais in een wisselstroomkring	265
13.3	Welke stoffen zijn te magnetiseren?	227	14.3.1	Het relais als zoemer	265
13.3.1	Niet-magnetische stoffen	227	14.3.2	Eenfasige gelijkrichting met een relais	266
13.3.2	Ferromagnetische materialen	227	14.3.3	Integratie van snelle impulsen	267
13.3.3	Tijdelijk en permanent magnetische materialen	229			
13.3.4	Het restmagnetisme	229			
13.4	Het elektromagnetische veld	230	Aanhangsel		268
13.4.1	Inleidende proef	230	A 1	Genormaliseerde symbolen	268
13.4.2	Het magnetisch veld om een geleider	231	A 2	Symbolen voor meetinstrumenten	270
13.4.3	De werking van een ijzeren kern in de spoel	233	A 3	Algemene natuurkundige grootheden	271
13.4.4	Enkele belangrijke magnetische grootheden	235	A 4	Elektrische grootheden	272
13.4.5	De luchtspleet	236	A 5	Voorvoegsels voor de machten van tien	274
13.4.6	Remanentie en Koërcitiefkracht	239	A 6	Soortelijke weerstand en geleiding van enige stoffen	274
13.5	Induktie	241	A 7	Eenheden in vergelijkingen	275
13.5.1	Induktie door beweging	241	A 8	Internationaal genormaliseerde weerstandswaarden voor filmweerstanden	275
13.5.2	De elektromotorische kracht (EMK)	242	A 9	Kleurcode voor filmweerstanden	275
13.5.3	Induktie door verandering van het magnetisch veld	243	A 10	Antwoorden op vragen in de tekst gesteld	276
13.5.4	Induktie van een spanning bij twee spoelen	244	A 11	Waar u op moet letten bij het kopen van meetinstrumenten	281
13.5.5	De spanningstransformatie	245	A 12	Rekenen met machten van het grondtal 10	282
13.5.6	Zelfinduktie	245	A 14	Los verkrijgbare onderdelen	283
13.6	Het belangrijkste over spoelen	246			
13.6.1	De zelfinduktie	246			
13.6.2	Symbool voor de spoel	246			
13.6.3	Kombineren van spoelen	246			
13.7	De spoel als wisselstroomweerstand	247			
13.8	De spoel in een magnetisch veld	248			
13.8.1	De stroomvoerende geleider in een magnetisch veld	248			
13.8.2	Het draaispoel-meetinstrument	250			
13.8.3	Weekijzer meetinstrument	251			
14	Het Reedrelais	252			
14.1	Het Reedkontakt	252			
14.1.1	De konstruktie van het Reedkontakt	252			
			Trefwoordenregister		284

1 Hobbylabor

Alvorens we ons gaan verdiepen in een aantal elektrotechnische zaken, eerst een korte behandeling van de belangrijkste onderdelen in de doos.

1.1 Stroomvoorziening

Ook voor de simpelste elektrische proef hebben we een elektrische stroombron nodig. Deze moet de stroom leveren die door onze proefschakeling loopt. We gebruiken voor onze experimenten batterijen of een fischertechnik-trafo met ingebouwde gelijkrichter. Transformatoren van elektrische spoorbanen en dergelijke zijn niet geschikt.

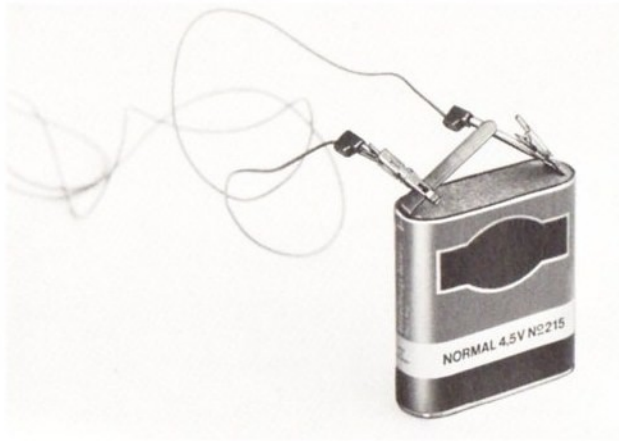
1.1.1 Batterijen

Wie al fischertechnik dozen heeft, kan als energiebron de batterijhouder met 5 (zie fig. 1.1) nemen, die ook in de motordoos met 1 zit. Hierin gaan 3 staafbatterijen van elk 1,5 volt. Op de uitgangsbussen staat een spanning van 4,5 volt die met een schakelaar kan worden omgepoold.

Direkte aansluiting van een schakeling op een stopcontact van het lichtnet is levensgevaarlijk en kan dodelijke gevolgen hebben.

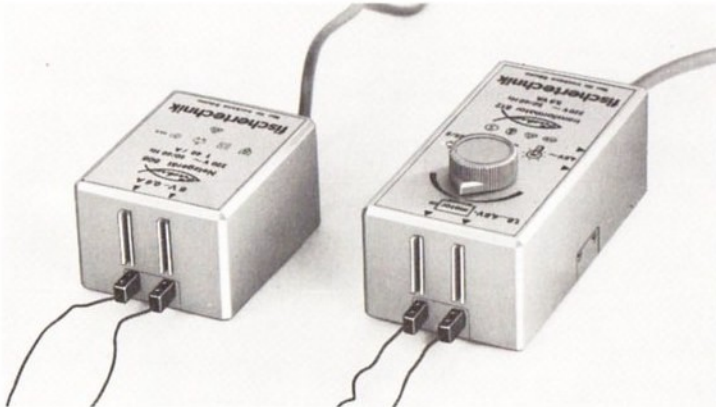


1.1



1.2

Wie geen batterijhouder heeft kan ook een platte batterij nemen van 4,5 volt. De aansluiting gaat volgens figuur 1.2 met een paar krokodilleklemmetjes uit de cassette van de hobbylabor doos.



1.3

1.4

1.1.2 fischertechnik trafo

Voordeliger dan batterijen is de fischertechnik trafo. Bij de grote trafo, de mot. 4 (fig. 1.4) kunnen we de gelijkspanning met een draaiknop trapsgewijs instellen tussen 0 en 7 volt. Door de knop naar links of naar rechts te draaien, wordt de stroomrichting omgekeerd. Bovendien staat er op twee aparte aansluitbussen nog een wisselspanning van ongeveer 7 volt ter beschikking. Voorlopig mogen we deze bussen echter niet gebruiken. (Deze wisselspanning kunnen we trouwens met de meter ook niet meten.)

De kleine trafo, mot. 8 (fig. 1.3) levert een niet-regelbare gelijkstroom van ongeveer 7 volt.

Beide trafo's zijn beveiligd tegen overbelasting, bij een foutieve schakeling kan er dus niets ernstigs gebeuren. De trafo's zijn volgens de voorschriften van de betrokken instanties getest. Het gebruik er van is volkomen ongevaarlijk zolang in droge ruimtes wordt gewerkt. De voorschriften eisen een vermelding van de werkspanning bij nominale belasting.

Wanneer we alleen een meter hebben aangesloten zal de spanning iets hoger zijn dan staat aangegeven. Hoofdstuk 7.3 vertelt precies hoe dat komt.

1.1.3 Stroombron van batterijen

Hoe we met 3 aparte batterijen zelf een stroombron kunnen maken die met de batterijhouder met 5 overeenkomt, zien we in fig. 1.5. Met dit principe kunnen we natuurlijk ook 1, 2 of 4 batterijen gebruiken, zodat we naar keuze een spanning krijgen van resp. 1,5–3–4,5–6 volt.

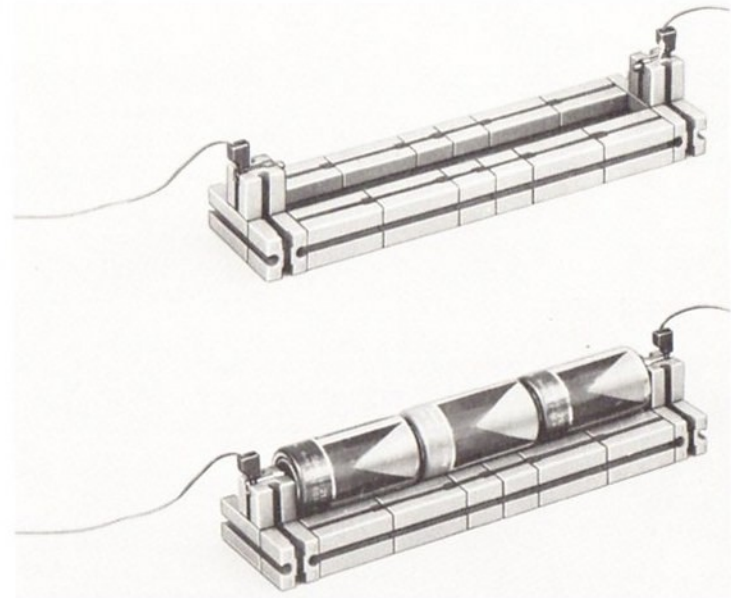
1.2 De fischertechnik meter

1.2.1 Het meten van de spanning

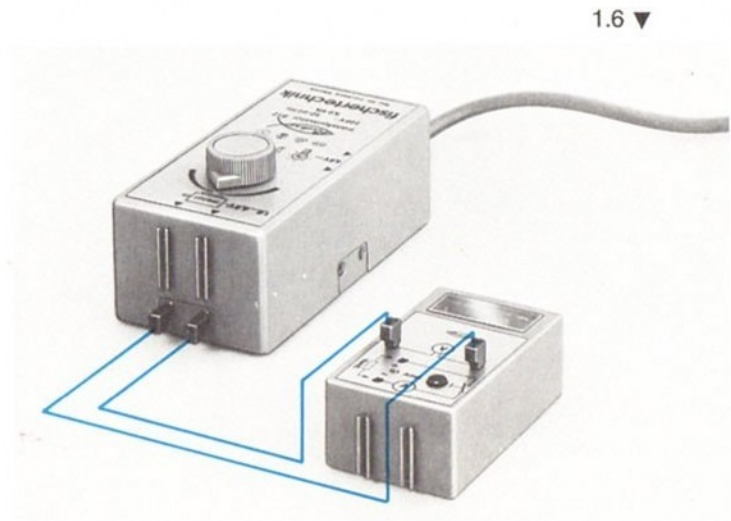
Met de ft-spannings- en stroomsterkte meter kunnen we b.v. de spanning van een batterij of de trafo meten. Hiervoor gebruiken we de bussen die gemerkt zijn met een V, de afkorting van volt, de eenheid van spanning. Bij de ene bus staat een + (plus) en bij de andere een – (min). Verbind altijd de +pool van de stroombron met de +bus en de –pool met de –bus. Bij een platte batterij staat het minteken bij de lange koperen strip en het plusteken bij de korte strip gedrukt.

Proeven

Wie met een batterijhouder of een trafo werkt, weet misschien niet wat nu de (+) en de (–) zijn. Dat hangt namelijk af van de stand van de schakelaar of van de draaiknop. U kunt zonder meer de bussen van de meter aansluiten op de bussen van de stroombron (fig. 1.6).



1.5 ▲

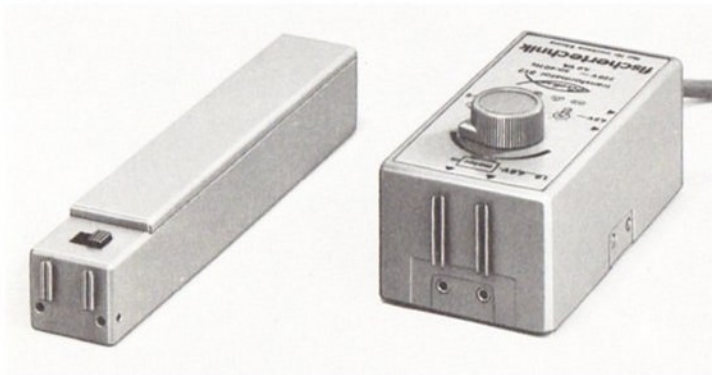


De meter is namelijk ongevoelig voor een foutieve aansluiting. Hij is daartegen – evenals tegen overbelasting – beveiligd door middel van twee „antiparallel“ geschakelde dioden. Hoofdstuk 11.3 geeft daarvan een verklaring.

Wanneer we toevallig de pluspool van de voltmeter met de pluspool van de stroombron (batterijhouder of trafo) hebben verbonden en daarmee ook automatisch de beide minpolen, dan slaat de wijzer van de meter naar rechts uit. In het omgekeerde geval, de plus van de stroombron met de min van de meter, dan gaat de wijzer naar links. We verwisselen in dat geval de aansluitingen op de meter.

Om niet elke keer opnieuw vast te moeten stellen wat de plus- en de minpool is van de trafo of batterijhouder, plakken we zelfklevende gekleurde etiketjes bij de aan/uit schakelaar of de draaiknop. Voor de minpool nemen we blauw en voor de pluspool rood. Figuur 1.7 en 1.8 geven twee voorbeelden.

1.7



- +

- +

1.8

1.2.2 Meetbereik en precisie

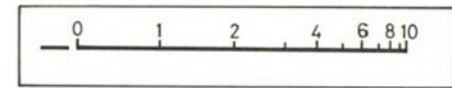
Voor het onderzoek naar de grondprincipes van elektrische en elektronische schakelingen is het meestal voldoende spanningen en stroomsterktes regelmatig te meten. Voor ons doel voldoet de meter van hobbylabor dan ook zeker, hoewel hij slechts één meetbereik heeft voor de spanning en één voor de stroomsterkte.

1.2.3 Het aflezen van meetwaarden

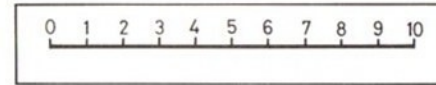
Alvorens te beginnen met elektrotechnische experimenten, nog iets over het aflezen van de schaal.

Zoals uit figuur 1.9 blijkt verloopt de schaalverdeling niet gelijkmatig. Het begin neemt meer ruimte in, is als het ware uitgerekt. Figuur 1.10 laat een gelijkmatige verdeling zien, dit heet een lineaire schaal. De „uitgedijde“ schaal biedt het voordeel dat we ook kleine spanningen van minder dan 1 volt nog goed kunnen aflezen. Zelden zal de wijzer precies op een deelstreep staan, maar ook de waardes tussen de strepen kunnen we gemakkelijk schatten. Om reden van het samenpersen van de schaal aan het eind, zijn de cijfers 3, 5, 7, 8 en 9 niet aangegeven. Fig. 1.11 laat zien dat de waarde 0,5 niet precies in het midden tussen 0 en 1 ligt, maar iets verschoven naar de 1. Hetzelfde geldt voor de waarde 1,5; 2,5 enz. Ook de waarden 0,1 en 0,2 zijn naar rechts verschoven (zie fig. 1.12).

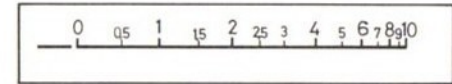
Bij de spanningsmeting kunnen we de aangewezen waarde zonder meer aanhouden. De meter wijst bij volledige uitslag – wanneer de wijzer op de eindwaarde van de schaal staat – een werkelijke spanning van 10 volt aan.



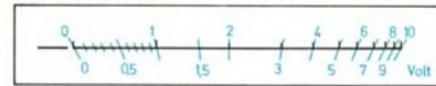
1.9



1.10



1.11



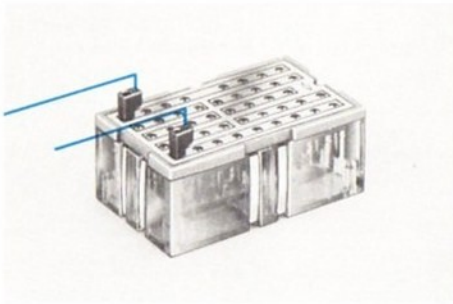
1.12

1.13

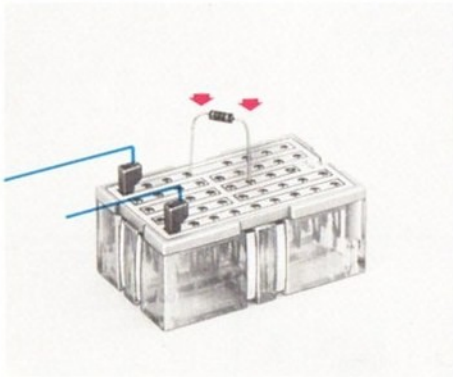
Stroombronnen	Spanning in volt
1 staafbatterij 2 staafbatterij 3 staafbatterij	nieuw
1 staafbatterij 2 staafbatterij 3 staafbatterij	oud
platte batterij, nieuw platte batterij, oud	
ft-batterijhouder	
ft-trafo mot. 4 trap 1 trap 2 trap 3 trap 4	

1.2.4 De eerste meetproeven

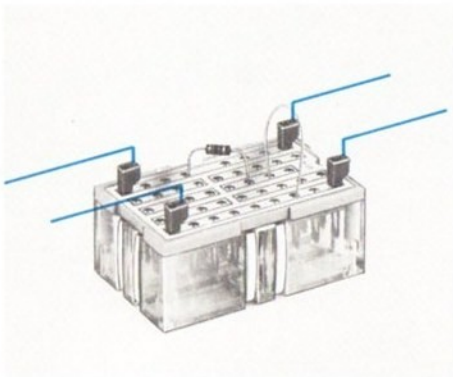
Meet de spanning van alle oude en nieuwe batterijen die u heeft en daarna de spanningen die u met de draaiknop op de trafo kunt krijgen. De verkregen waarden worden in nevenstaande tabel 1.13 genoteerd. De stroomsterktemeting komt in hoofdstuk 1.5 aan de orde.



1.14



1.15



1.16

1.3 Het fischertechnik Multischakelpaneel

Deze bouwsteen (fig. 1.14) zullen we in het vervolg afkorten met MSP. Hij is speciaal ontwikkeld voor het snel en gemakkelijk opzetten van experimentele schakelingen voor onze elektrotechnische en elektronische proeven. Wie eenmaal met het principe vertrouwd is, kan heel gemakkelijk een schakeling veranderen of op de gewenste punten een meting verrichten.

1.3.1 Doel en gebruik

In de bussen passen niet alleen de fischertechnik stekkers, maar evengoed blank draad en de aansluitkabels van elektrische of elektronische onderdelen. Vooropgesteld dat de draden een zekere stijfheid hebben en dat zij diep genoeg in de bussen kunnen worden gestoken (ca 20 mm). Op het MSP kunnen we ook losse elektrische onderdelen mechanisch bevestigen en tegelijk elektrisch met elkaar verbinden. Bovendien zijn elektrische en elektronische onderdelen die later in een speciaalzaak zijn gekocht, zonder meer in onze schakelingen op te nemen.

Aan de onderkant kunnen we zien dat de bussen aan het eind een verende inkeping hebben, zodat een goed contact met de draad is gewaarborgd. De doos bevat een pincet waarmee elke aansluiting, ook in een schakeling met veel verschillende onderdelen, is te bereiken. Met de pincet kunt u elke draad direkt in een bus steken of er weer uithalen (fig. 1.17).

De pincet buigen we nog iets om, zoals in fig. 1.18 is aangegeven. We bereiken daarmee dat de pincet nog wat beter klemt.

Het zonder meer loshalen van aansluitdraden en stekkers door aan de onderdelen of de draden zelf te trekken, is niet verstandig daar u dan de kans loopt dat u alleen het onderdeel of de draad in handen houdt. Met de onder een hoek staande pincetpunten kunt u een klem zittende stekker heel gemakkelijk uit de bus wippen (zie fig. 1.19).

1.3.2 Schakelstrips

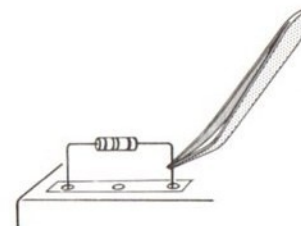
Op het MSP zitten vijf rijen bussen. De losse bussen zijn gecombineerd tot schakelstrips. Deze strips zijn aangegeven met een omlijning (fig. 1.20). De bovenste en onderste rij zijn doorlopend omlijnd. Het betekent dat de 8 bussen van de onderste strip elektrisch met elkaar zijn verbonden en de 9 bussen van de bovenste rij eveneens.

De drie middelste rijen hebben elk twee aparte strips. Per veld hebben alle bussen weer contact met elkaar. Aan de onderkant zijn de combinaties duidelijk te zien.

Met het MSP kunnen we gekompliceerde schakelingen opbouwen. De strips en aparte bussen zijn met opzet niet gemerkt. U heeft daardoor de volledige vrijheid de schakelingen op te zetten zoals u meent dat het 't beste is. Door de praktijk van het zelf uitzoeken, krijgt u veel sneller een zeker gevoel voor de beste opstelling en rangschikking dan wanneer u strikt zou werken volgens het boekje.

In de meeste gevallen is er namelijk een aantal mogelijkheden om een schakeling op het paneel uit te zetten. Het elke keer natuurgelukkig uittekenen van de voorkant is niet alleen omslachtig, maar werkt ook onoverzichtelijk. Er is daarom een simpeler vorm gekozen (zie fig. 1.21). De bussen zijn weergegeven met ringetjes en de verbindingen tussen de aparte bussen met lijnen.

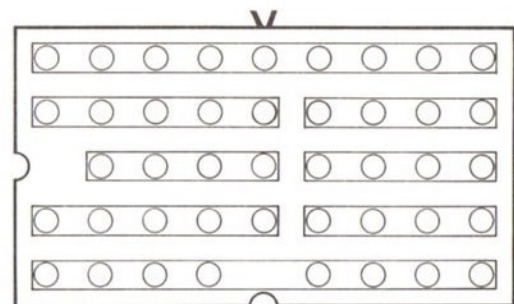
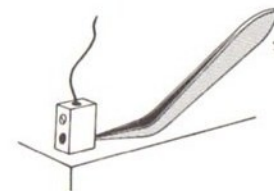
1.17



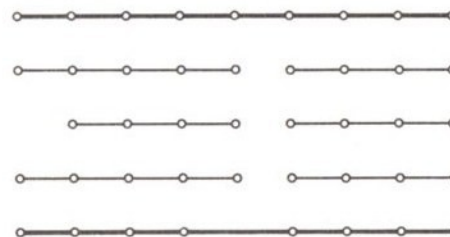
1.18



1.19



1.20



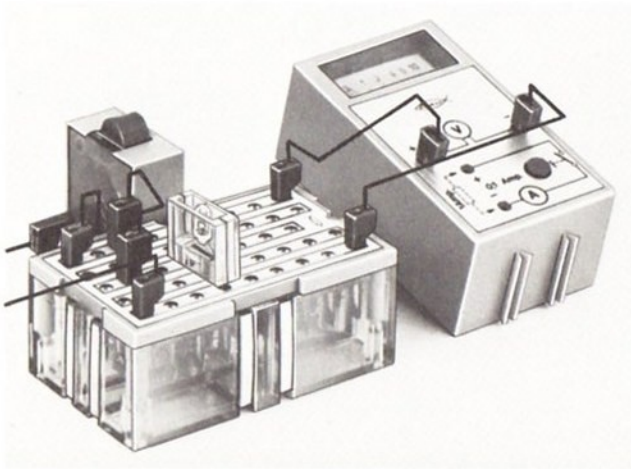
1.21



1.22

1.3.3 Combineren met fischertechnik

De strippen voor de stroomgeleiding die aan de zijkant van de MSP bouwsteen zitten, hebben in onze proeven en experimenten geen functie. Ze dienen om het Multischakelpaneel te kunnen combineren met de fischertechnik elektronika bouwstenen. Vanzelfsprekend is het MSP ook te combineren met alle andere fischertechnik bouwstenen. Fig. 1.22 laat b.v. zien hoe we de ft-drukknop uit doos ft-em (elektromechanika) of uit hobby 3 op de MSP bouwsteen kunnen bevestigen.



1.23

1.3.4 Proeven met MSP en lampjes

Hobbylabor bevat 4 stekkerlampjes, dat zijn transparante stekkerhuizen met daarin een gloeilamp. De montage van andere onderdelen in de stekkerhuizen wordt later beschreven. We gaan nu, om het MSP te testen, een dergelijke stekkerlamp in een schakeling opnemen met een stroombron (batterij of trafo) en de spanning meten voor en na het inschakelen van de lamp. De schakeling bouwen we volgens fig. 1.23. Het stroomkringschema er van vinden we in fig. 1.24.

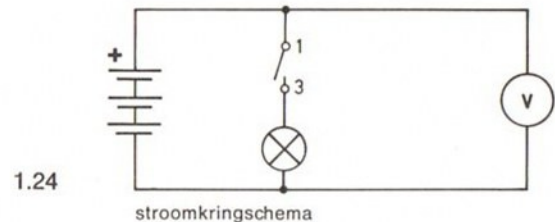
Een stroomkringschema is een schakelschema waarin de onderdelen zo met elkaar zijn verbonden dat daaruit zo duidelijk mogelijk hun functie naar voren komt.

Een „stekkerplan“ (fig. 1.26) daarentegen geeft aan hoe de onderdelen op het multischakelpaneel zo praktisch mogelijk gerangschikt en met elkaar worden verbonden. Het stroomkringschema en het stekkerplan komen slechts zelden met elkaar overeen.

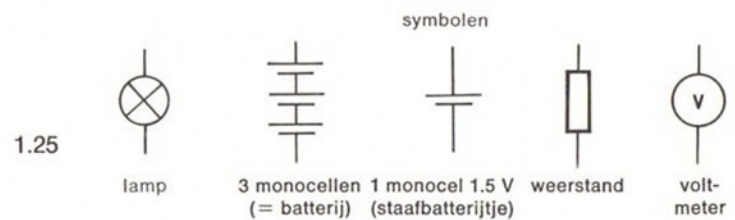
De genormaliseerde symbolen staan in fig. 1.25. Het symbool voor de voltmeter staat ook op de voorkant van de meter. Wie geen ft-drukknop heeft, kan de verbinding tussen de vrije aansluiting van de lamp en de + leiding met een kabeltje tot stand brengen.

Wanneer met dezelfde drukknop twee lampen – parallel geschakeld – spanning moeten krijgen, dan houden we fig. 1.26 aan. Het daarbij behorende stroomkringschema geeft fig. 1.27.

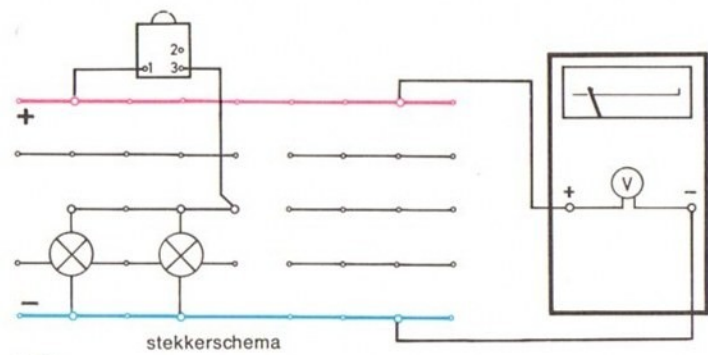
Terwijl in fig. 1.24 als stroomleverancier nog drie in serie geschakelde cellen zijn getekend, in fig. 1.27 is de stroombron simpelweg aangegeven met (+) en (-). U kunt de schakeling nog uitbreiden met een derde lamp, die parallel met de beide andere wordt geschakeld. Voor de beginner: de ft-drukknop is een „maak“ kontakt (TE). Dat betekent dus dat de lampen bij een druk op de rode knop gaan branden. Wie dat wil kan hieronder het stroomkringschema voor de schakeling met 3 lampen tekenen.



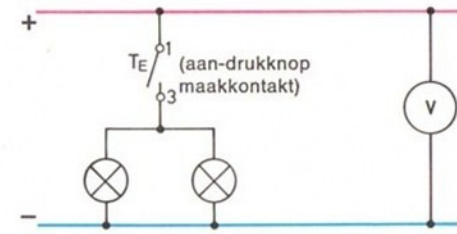
1.24



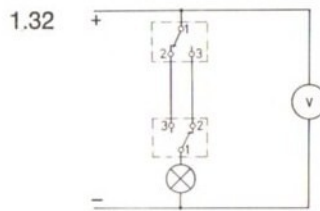
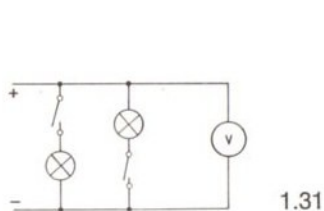
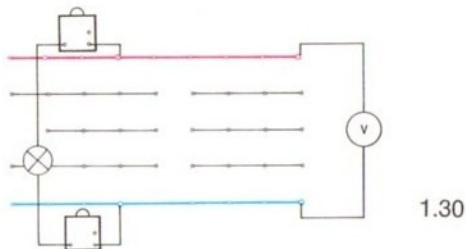
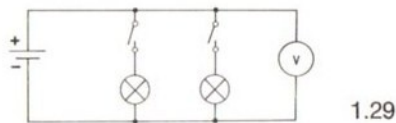
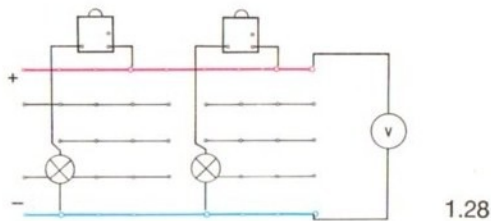
1.25



1.26



1.27



Het schema in figuur 1.28 laat zien hoe 2 lampen met aparte drukknoppen of schakelaars kunnen worden geschakeld.

Het principe van de schakeling blijkt uit het schema 1.29. Wie ook de verbinding tussen de lamp en de minleiding door een drukknop of een schakelaar wil onderbreken, kan dat doen volgens fig. 1.30. Het stroomloopschema kunt u hieronder tekenen.

Wie al enige ervaring heeft in het lezen van stroomloopschema's, kan de schakelingen 1.31 en 1.32 met het MSP opbouwen. De beginner raden we aan deze schakelingen later te maken.

1.3.5 Kontaktrails voor de plus- en voor de minpool

Het verdient aanbeveling voor de (+) leiding steeds de bovenste en voor de (-) leiding steeds de onderste busserij te nemen. De beide rijen kunnen we zien als kontaktrails. Door ons aan deze regel te houden, wordt de uitvoering van alle schakelingen in de ft-hobbyboeken veel gemakkelijker omdat ook in alle schema's steeds de (+) leiding boven en de (-) leiding onderaan is getekend.

1.4 Proeven met de ft-meter

1.4.1 Meten van een spanning

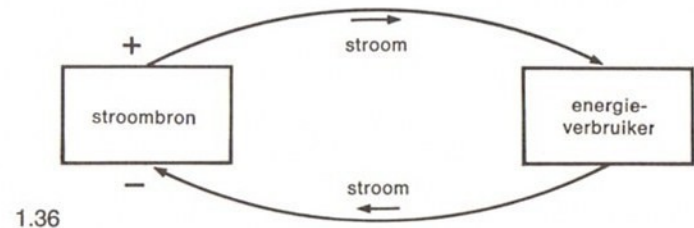
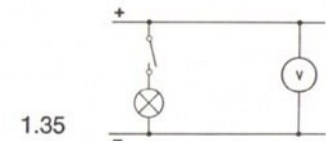
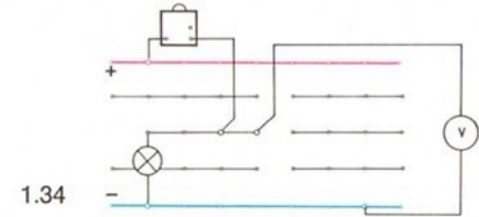
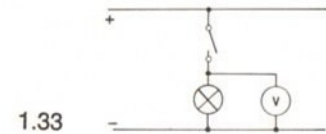
Om een spanning te meten moeten we de beide aansluitingen van de spanningsmeter (voltmeter) aansluiten op de punten waarop – of waartussen – de spanning staat die we willen meten. Het is verstandig om steeds te zeggen: „waartussen de te meten spanning staat“.

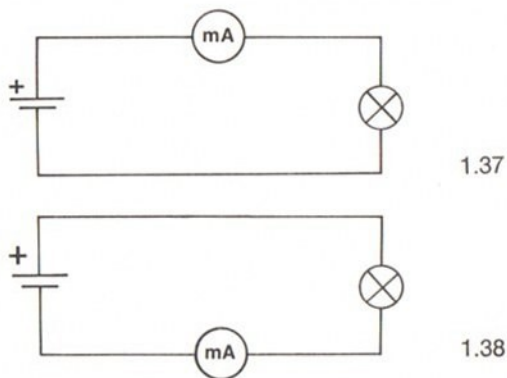
De voltmeter moet dus tussen twee punten worden geschakeld. Bij het meten van de spanning van een batterij of een trafo is het allemaal heel eenvoudig (zie fig. 1.6). Maar het vergt even nadenken wanneer het gaat om de aansluiting van de meter die de spanning op een lamp moet meten welke we aan- en uit kunnen schakelen. In dat geval moeten we de meterbussen niet op de batterij aansluiten maar parallel met de kontakten van de lamp. De wijzer van de voltmeter zal alleen dan uitslaan wanneer de lamp brandt. Fig. 1.33 geeft het schema, fig. 1.34 een van de vele stekkerplannen die mogelijk zijn. In tegenstelling daarmee is de schakeling van fig. 1.35, waarbij de voltmeter de spanning aangeeft van de batterij – onafhankelijk van het feit of de lamp aan of uit is.

We zien op de voltmeter dat de spanning van de batterij of de trafo iets kleiner wordt wanneer we één of meer lampen aan doen. Waarom dit zo is, komt in hoofdstuk 7.3 aan de orde.

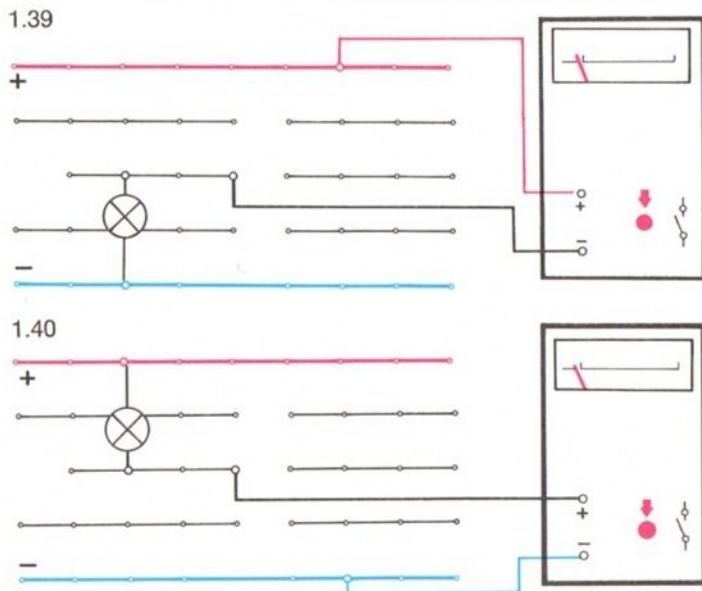
1.4.2 Het meten van de stroomsterkte

Nu gaan we de stroom meten die door de lamp loopt. Waarschijnlijk weet u al dat de stroom van de (+) pool van de batterij (of een andere stroombron) naar de lamp loopt, er doorheen gaat en dan naar de (-) pool van de stroombron vloeit. Om deze reden heet de schakeling van een energiebron (b.v. een batterij) met één of meer energieverbruikers (lampen b.v.) een „stroomkring“ (zie fig. 1.36).





Om een spanning te meten wordt de voltmeter parallel geschakeld. Bij de meting van de stroomsterkte nemen we de meter in de stroomkring op.



Principe

Een stroom kunnen we alleen meten door de stroomsterktemeter in de stroomkring op te nemen. Het principe zien we in de figuren 1.37 en 1.38. In het ene geval ligt de stroomsterktemeter tussen de (+) pool van de batterij en de lamp en in het andere geval tussen de lamp en de (-) pool van de batterij. Beide schakelingen zijn gelijkwaardig.

De stroomkring moeten we op de plaats waar de meter er tussen komt, onderbreken. Dit kenmerkende onderscheid tussen stroomsterktemeting en spanningsmeting, moeten we steeds in de gaten houden.

De ft-meter schakelen we voor de stroomsterktemeting volgens fig. 1.39 of fig. 1.40. Het verschil tussen beide schakelingen is: in de eerste schakeling wordt de (+) bus met de (+) pool van de batterij of de trafo verbonden, terwijl de (-) aansluiting van de meter naar de lamp gaat.

In het tweede geval is de (-) aansluiting van de meter met de (-) pool verbonden. De lamp is aangesloten op de (+) aansluiting van de meter. In het omgekeerde geval zou de wijzer naar links uitslaan.

Om te beginnen slaat de wijzer helemaal niet uit! We moeten eerst de rode knop indrukken. De drukknop geeft een beveiliging tegen permanente overbelasting van de meter bij een foutieve schakeling (op de functie van de knop wordt nog in hoofdstuk 6.7.2 teruggekomen).

Ook als we de rode knop niet indrukken, is de stroomkring toch gesloten. Als de wijzer tot ver voorbij de 10 uitslaat, moeten we de schakeling nalopen. Slaat de wijzer naar links uit, dan is de aansluiting van de polen niet goed. De kabels in de (+) en de (-) van de meter moeten we dan verwisselen.

Meetbereik 100 mA

De ampère is een eenheid voor de stroomsterkte, vandaar dat we vaak van ampèremeter spreken. Zoals op de bovenkant van de meter is aangegeven, „stroomt“ er bij een volledige wijzeruitslag een stroom van 0,1 A (ampère) = 100 milli-Ampère (mA).

Hiervoor geldt de onderste schaal van fig. 1.41. De boven afgelezen waarde moet met 10 worden vermenigvuldigd. Staat de wijzer b.v. op 4, dan komt dat overeen met 40 mA. De waarde 1 op de schaal betekent 10 mA en een uitslag van 1,2 (zie fig. 1.42) geeft aan dat er op dat moment een stroom van 12 mA door de meter loopt.

Het is interessant om te meten of door elk van de lampen evenveel stroom vloeit en ook hoe groot de stroomsterkte is wanneer we twee lampen parallel geschakeld in de stroomkring opnemen.

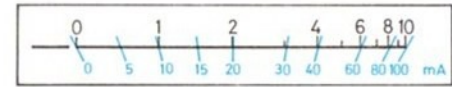
Met ook de stroom die door de ft-lampen uit de em of de hobby 3 doos loopt. Tip voor wie met de trafo werkt: zet niet de volle spanning op de lampen, ze branden dan wel fel maar tevens niet al te lang. De levensduur is veel langer bij de laagst in te stellen spanning.

Schrijf nu de gemeten waarde in tabel 1.43. Het noteren van de stroomsterkte heeft voor latere doeleinden weinig zin als we niet tegelijk de spanning meten en noteren. De meting daarvan moet apart, voor of na de stroomsterktemeting gebeuren.

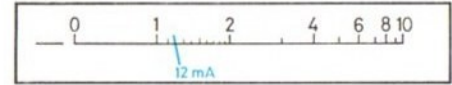
Vergroting van het meetbereik

In de aangegeven schakeling kunnen stromen van meer dan 100 mA niet worden gemeten. Hoe we het meetbereik van de stroomsterktemeter kunnen vergroten, staat in hoofdstuk 7.62.

1.41

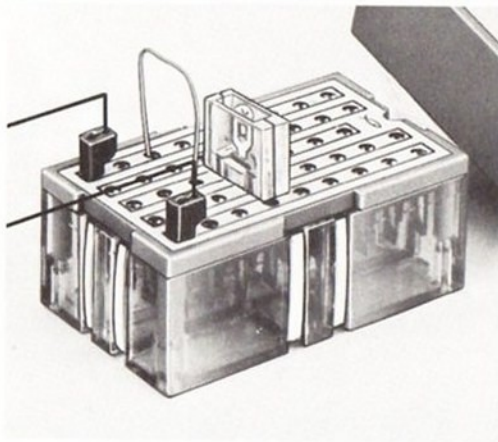


1.42

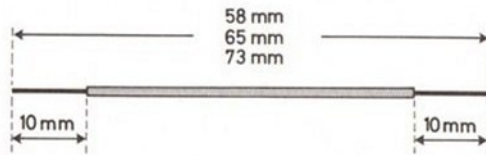


1.43

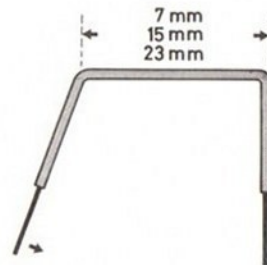
lamp nr	stroomsterkte in mA	spanning in volt
1		
2		
3		
4		
1 en 2		
ft-lampen uit de em doos		
1		
2		
3		



1.44



1.45



1.46

Rood = plus (+); blauw = min (-)

1.5 Hulpmiddelen

1.5.1 Verbindingsbruggen

Stel, dat we aansluitend op het meten van de stroomsterkte in een schakeling de spanning willen meten. De meter moet dan uit de stroomkring worden gehaald en parallel geschakeld. Het simpelste gaat dat als volgt.

We zetten een verbindingsbruggetje op het MSP tussen de aansluitpunten van de stroomsterktemeter. Deze is nu buitenspel gezet, hij staat nu namelijk niet langer in de stroomkring, maar parallel.

Met de voltmeter kunnen we nu de spanning meten op de gewenste punten. Verbindingsbruggetjes maken we van korte kabeltjes met 2 stekkers of – wat bij grotere schakelingen overzichtelijker is – van een draad uit de kassette in de doos (zie fig. 1.44). Bruggetjes maken is gemakkelijk, we hoeven alleen de isolatie aan de uiteinden te verwijderen. Het handigste is het om een kleine voorraad aan te leggen. Koperdraad van 0.8 mm diameter is het beste. In fig. 1.45 zien we de lengtes en in fig. 1.46 hoe we die moeten buigen. Deze bruggetjes zijn gemakkelijk in de bussen te zetten en ze blijven dan goed klem zitten, terwijl ze ook weer gemakkelijk los te trekken zijn. Dergelijke bruggetjes heten ook wel „kortsluitbruggen“. Door verschillende kleuren te nemen, houden we een beter overzicht.

1.5.2 Kleurgeving

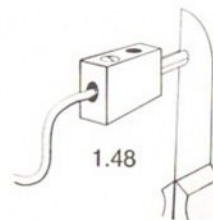
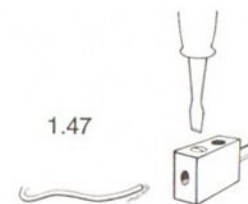
Draad met blauwe isolatie gebruiken we steeds voor verbindingen met een (-) busserij. Rode bruggen dienen uitsluitend voor verbindingen met de (+) busserij.

Alle andere kleuren gebruiken we voor bruggen tussen bussen die niet met de (+) of de (-) busserij zijn verbonden.

Voor de verbinding van het Multishakelpaneel (MSP) met de stroombron, de meter of andere grotere bouwstenen, gebruiken we alleen blauwe kabels. Draad met rode stekkers reserveren we voor de leidingen die naar de (+) busserij lopen.

1.5.3 De montage van stekkers

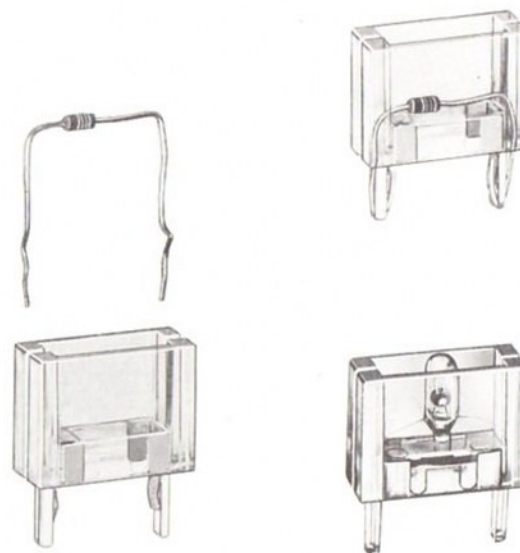
De draden van de hobbylabor en de hobbydozen moeten zeer soepel zijn. Derhalve wordt hiervoor geen massief koperdraad gebruikt, maar een bundel dunne koperdraden met een isolatie van kunststof. Voor het maken van een kabeltje dat exact op lengte is, hebben we stekkers nodig met een klemschroefje, zie fig. 1.47. Let er op dat bij het verwijderen van de isolatie met een mes of een speciaal tangetje geen koperdraadjes van de kabel worden doorsneden. Het blanke stuk draaien we in elkaar, buigen we terug en steken we in de stecker. Draai de schroef niet te vast aan! Wanneer een dergelijke stecker niet meer in de bus blijft zitten, dan buigen we met een mes de lippen van de contactstift iets uit elkaar (zie fig. 1.48). Steckers en draden zijn apart verkrijgbaar in de winkel. Een draad die we op de juiste lengte hebben gebracht, kunnen we het beste meteen even testen door hem te gebruiken voor de aansluiting van een lamp.



1.5.4 Stekkerhuis

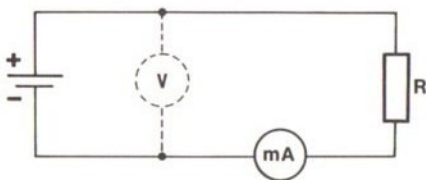
Hobbylabor bevat 6 steckerhuizen. In één daarvan zit een diode, maar deze hebben we pas later nodig. In vier andere steckerhuizen zitten gloeilampen gemonteerd omdat draadaansluitingen gemakkelijk beschadigen.

Figuur 1.49 laat zien hoe resp. een diode, een weerstand of een lamp in het steckerhuis worden gemonteerd voor het geval dat ze vervangen moeten worden wanneer we een steckerhuis zolang voor een ander doel willen gebruiken. Daarnaast kunnen we steckerhuizen ook als „kortsluiters“ gebruiken wanneer we – verderop in het boek – een aantal multischakelpanelen aan elkaar schakelen. Een kortsluitter krijgen we door in plaats van een lamp simpelweg een blanke draad in het steckerhuis te steken.

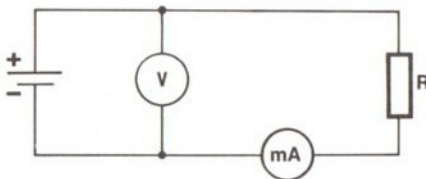




2.1



2.2



2.3

2 Stroom – Spanning – Weerstand

Dit zijn de basis grootheden van de elektriciteitsleer. Ook de hobbyist in de elektronika moet hun betekenis weten en in welke relatie ze tot elkaar staan. Tenminste, als hij werkelijk iets van de schakelingen wil begrijpen en die eventueel zelf met succes wil ontwerpen.

Al heel snel zal blijken dat de ogenschijnlijk zo droge theorie bijzonder boeiend kan zijn.

2.1 Eenvoudige metingen van weerstanden

We gaan nu op het MSP geen gloeilampen maar weerstanden onderzoeken. De doos hobbylabor bevat 10 weerstanden die alle dezelfde afmetingen hebben (zie fig. 2.1). Hun uiterlijk verschilt alleen in de kleurringen.

Proef

Steek eerst de weerstand met de kleurcode bruin-zwart-rood-goud op het MSP en meet de aangelegde spanning en de sterkte van de stroom.

Omdat het principe schema van fig. 2.2 algemeen geldig is, schrijven we voor de weerstand (weergegeven met een rechthoek) niet de kleurcode maar de hoofdletter R. Deze letter komt van het latijnse woord voor weerstand bieden = resistere.

In alle schema's is de „R“ rechtop getekend omdat er een weerstand wordt bedoeld. In het geval we een weerstandswaarde aan willen geven, dan gebruiken we een cursieve „R“.

Omdat we maar een meter hebben, kunnen we de stroomsterkte en de spanning niet tegelijk meten. In het schema is de voltmeter met de aansluitdraden daarom met een streepjeslijn getekend. Schakelschema 2.3 waar de stroomsterktemeter en de spanningsmeter beide met een volle lijn zijn getekend, is echter ook korrekt.

Wanneer we in de toekomst dergelijke schakelingen te zien krijgen, dan weten we dat we stroomsterkte en spanning na elkaar moeten meten. De schakeling voor het meten van de stroomsterkte kunnen we natuurlijk op vele manieren opbouwen. Figuur 2.4 laat er één zien. De spanning meten we volgens schakeling 2.5. We zien daarbij een brug die in de schakeling komt waar eerst de aansluitingen naar de stroomsterktemeter zaten.

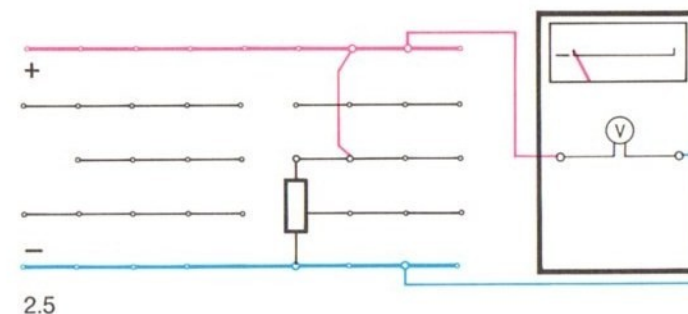
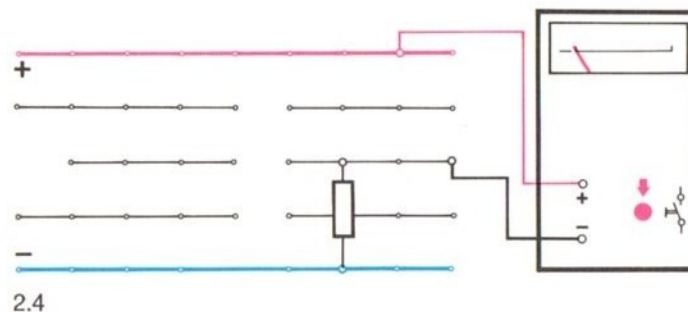
De gevonden waarden noteren we in nevenstaande tabel 2.6. Het is niet de bedoeling dat u dezelfde waarden vindt zoals die als voorbeeld zijn gegeven in de linkerkolommen. Verricht de metingen nu ook met de vier andere, aangegeven weerstanden. De overige weerstanden meten we niet, deze zouden zoals later wordt verklaard, hiervan schade kunnen ondervinden. Ook de spanning mag niet meer dan 6 V bedragen en moet bij alle proeven ongeveer gelijk zijn.

De uitkomsten

Hoewel de weerstanden dezelfde afmetingen hebben, onderscheiden zij zich in het doorlaten van een elektrische stroom. De verschillende metingen tonen zwakke schommelingen in de spanning aan. Deze kunnen echter niet de oorzaak zijn van de sterk uiteenlopende stroomsterktes die we voor de verschillende weerstanden meten.

De aard van het materiaal in de weerstanden moet dus verschillend zijn. (Dat de elementen van hetzelfde materiaal worden gemaakt, maar dat het verschil wordt verkregen door een kunstgreep tijdens het productieproces is op dit moment niet interessant).

Aanwijzing: misschien heeft u opgemerkt dat de weerstand waar de grootste stroom doorheen liep, warm werd. As we de trafo konstant de volle spanning laten leveren, brandt de weerstand tenslotte door. Werk daarom niet met de volle spanning. De andere weerstanden in de doos raken gemakkelijk oververhit. We zullen ze daarom later met een andere methode onderzoeken.



2.6

kleurcode	voorbeeld		eigen meting	
	volt	mA	volt	mA
br-zw-ro-go	6,0	6,0		
br-zw-ora-go	6,0	≈ 0,5		
ge-vio-ro-go	6,0	≈ 1,0		
ge-vio-br-go	5,9	12,0		
br-zw-br-go	5,6	50,0		

≈ betekent: ongeveer gelijk aan

Uitkomst

Voorlopig zijn we tevreden met het resultaat dat we nu weten dat er lichamen zijn waar een stroom doorheen gaat lopen als we er een spanning op zetten. De sterkte van de stroom is afhankelijk van de aard van het materiaal. Alvorens we verder gaan met de proeven volgt nu eerst een verklaring over wat stroom is en waarom een stroom „loopt“.

Het volgende hoofdstuk is kleingedrukt, omdat de kennis er van niet noodzakelijk is voor het begrijpen van de schakelingen die verderop in het boek aan de orde komen. Wie het niet interessant vindt, kan het dus rustig overslaan.

2.2 Wat is elektrische stroom?

Ieder kind weet dat een gloeilampje gaat branden als je het op een batterij aansluit. Maar wat gebeurt er nu precies?

2.2.1 Het zijn de elektronen die . . .

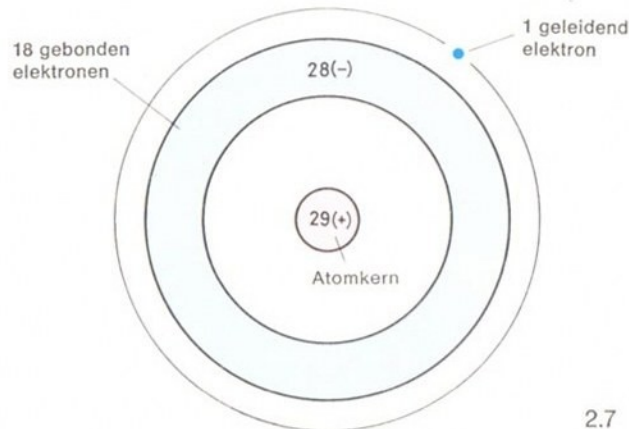
De verklaring lijkt heel eenvoudig: zoals een rivier met waterdruppels bestaat, zo bestaat een elektrische stroom uit elektronen. Moeilijker wordt het om te verklaren wat dan wel die elektronen precies zijn. En waar lopen ze dan naar toe en waar komen ze vandaan?

En hoe zien ze er uit?

Al die vragen zijn in dit boek natuurlijk niet uitvoerig te beantwoorden. Daar is een extra boek over te schrijven. Tenslotte willen we ook geen wetenschappelijk werk doornemen, maar experimenteren.

In het kort gaat het om het volgende. Alle stoffen op aarde (en zover we hebben kunnen meten ook in het heelal) bestaan uit kleine deeltjes die we atomen noemen. Vroeger meende men dat deze deeltjes niet verder gesplitst konden worden. Het waren de bouwstenen, de elementen – negentig verschillende – waaruit alle andere stoffen waren opgebouwd. Later werd ontdekt dat het atoom wel gesplitst kon worden. Op het principe van de kernsplijting berust de atoombom, evenals de energiewinning in de zgn. kerncentrales.

In fig. 2.7 zien we hoe we ons de opbouw van een koperatoom moeten voorstellen. In „werkelijkheid“ ziet het er waarschijnlijk anders uit, maar deze schematische voorstelling is voldoende om het wezenlijke duidelijk te maken.



2.7

In het midden van het atoom zit de kern met 29 (+) ladingen. Die kern is dus positief geladen.

Op een relatief grote afstand en in verschillende banen cirkelen negatief geladen elektronen om de kern. En wel net zoveel als het aantal positieve ladingen in de kern. Elk elektron heeft dus een enkele (-)lading.

Onze tekening heeft niet de juiste verhoudingen. Het elektron op de buitenste baan – het apart getekende – is duizenden keren kleiner dan de kern. Ook de afstand tussen de kern en het buitenste elektron is veel en veel groter. In een atoom is een grote „hoeveelheid niks“.

2.2.2 Vrije elektronen

Waarom is nu dat ene elektron van het koperatoom apart getekend en zijn die 28 andere alle in een blauwe ring aangegeven? De reden is dat het buitenste elektron bijzondere eigenschappen heeft. Terwijl de andere elektronen volgens bepaalde regels vast met de kern verbonden zijn, kan dat ene elektron zich naar verhouding gemakkelijk losmaken uit het atoom en zich vrij bewegen, een eigen leven gaan leiden. Dergelijke elektronen heten dan ook „vrije“ elektronen.

2.2.3 Het metaalrooster

Een ander punt nodig om te begrijpen hoe een elektrische stroom ontstaat, is het volgende. Veronderstel dat we beschikken over een „supermax-ultra microscoop – helaas is die er niet –, we leggen er een stuk blank koperdraad onder en dan blijkt de zo stevige en kompakte draad in werkelijkheid een „luchtig“ geval te zijn.

Figuur 2.8 geeft ons een beeld van hoe we ons de tralie-achtige opbouw van het metaal koper moeten voorstellen. Het is een meetkundig beeld waarin de kleine atomen elk hun vaste plaats hebben. Stel je nu voor dat we dit traliewerk – het rooster – nog eens duizenden keren vergroten. We krijgen dan iets heel merkwaardigs te zien. Tussen de tralies flitsen – volkomen ongeordend – nog veel kleinere elementaire deeltjes konstant heen en weer. We kennen ze reeds: het zijn de vrije elektronen – van elk koperatoom precies één!

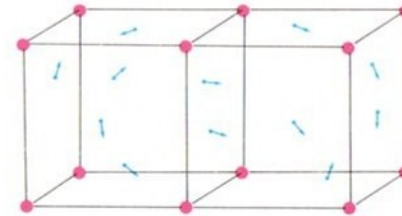
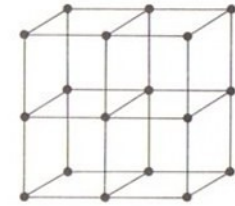
Omdat de elektronen de negatieve ladingen vertegenwoordigen zijn zij in fig. 2.9 blauw getekend. Maar waarom hebben de op hun plaats zittende koperatomen nu de kleur van een (+)lading, het rood?

Heel eenvoudig hierom: wanneer er een (-)lading ontbreekt in het atoom vlg. fig. 2.7, dan heeft de kern een (+)lading teveel en dat manifesteert zich naar buiten als positief.

Plus- en minladingen trekken elkaar aan, zoals ook de noord- en de zuidpool van een magneet dat doen. De vrije elektronen zullen dan ook niet uit de draad schieten, maar ze blijven gevangen binnen de tralies in de buurt van hun „moeder”atoom. We kunnen nu begrijpen hoe het mogelijk is dat zulke kleine elementaire deeltjes als de vrije elektronen zich door een koperdraad kunnen bewegen. Zij zijn het namelijk die de „elektrische stroom” veroorzaken wanneer het lukt om ze in een bepaalde richting door de draad te drijven!

Elektronen die in tegenstelde richtingen, doelloos heen en weer gaan, vormen uiteraard geen stroom. Omdat de vrije elektronen de elektrische stroom (onder bepaalde voorwaarden die we nog zullen bespreken) verder „geleiden”, noemen we ze ook wel, zoals in fig. 2.7, geleidingselektronen.

2.8



2.9

2.2.4 De eenheid van en het symbool voor stroomsterkte

Eenheid

Uit het voorgaande hoofdstuk weten we dat de stroom veroorzaakt wordt door de onvoorstelbaar kleine elektronen. Dergelijke kleine deeltjes kunnen we niet tellen om een stroom te meten die b.v. door een gloeilamp, een of ander element of zelfs door een heel apparaat loopt. In een watermeter worden ook niet de waterdruppels geteld die door een waterleiding lopen. Wat we bij water meten zijn de liters water die per tijdseenheid langs een bepaald punt stromen. Bij een elektrische stroom doen we iets dergelijks, namelijk de lading die zich per tijdseenheid verplaatst. De eenheid die we gebruiken voor de stroomsterkte is de ampère, waarvoor we de letter A gebruiken.

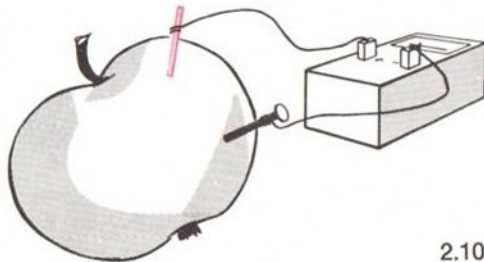
Afgeleide eenheden

$$1 \text{ A} = 1000 \text{ mA} = 1\,000\,000 \mu\text{A}$$

$$1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A} = 1000 \mu\text{A}$$

$$1 \mu\text{A} = 0,001 \text{ mA} = 0,000\,001 \text{ A}$$

Onze meter kan maximaal een stroomsterkte van 0,1 A = 100 mA meten.



2.10

In de zwakstroomtechniek, waarin we als voorbereiding op de elektronika, zijn geïnteresseerd, is 1 A al een grote stroomsterkte. Meestal wordt er met duizendsten van de ampère, met mA gerekend. Heel vaak komen er nog veel kleinere stroomsterktes voor: duizendsten van de milli-ampère, dat zijn de micro-ampères. Afgekort μA (μ is een griekse letter, spreek uit als „mu“).

Symbol

Zonder rekenen blijven we in de techniek nergens. Daarom hebben we voor het begrip „stroomsterkte“ een symbool nodig. Daarvoor is de hoofdletter I gekozen. Om een symbool – een letter in formules – goed te onderscheiden van een meet-eenheid, schrijven we alle symbolen met cursieve letters. De I daarom kursief, maar de meeteenheid A of mA rechttop.

Voorbeeld: $I = 30 \text{ mA}$.

2.3 Elektrische spanning

2.3.1 Een zelfgemaakte spanningsbron

Proef

Neem een appel (of een citroen) en steek daarin een spijker en een stuk blank koperdraad (zie fig. 2.10). In plaats van de koperdraad kunnen we ook een ft-kabel nemen en de isolatie er af halen. Eén uiteinde dat vertind is moeten we er eveneens afsnijden. De spijker en de draad worden elektroden genoemd.

Verbind nu de ijzer-elektrode (de spijker) met de (-) bus van de voltmeter en de koper-elektrode (de draad) met de (+) bus.

Uitkomst

De wijzer van de meter slaat naar rechts uit en wijst ongeveer 0,2 V aan. De appel werkt als een spanningsbron! We hebben een eenvoudig „galvanisch element“, ook wel „galvanische cel“ genoemd, gemaakt. Noteer de uitkomst in tabel 2.11.

Proef

Steek de beide elektroden op een grotere afstand van elkaar in de appel en onderzoek of de spanning verandert. Dit blijkt niet het geval te zijn.

Proef

Neem dezelfde proef nu met twee Fe (ijzer) elektroden in plaats van een Fe- en een Cu(koper)elektrode, met twee spijkers dus. Daarna proberen we het met twee koper-elektroden. De wijzer slaat nu niet uit. Met twee elektroden van hetzelfde metaal, lukt het kennelijk niet om een spanningsbron te krijgen. Probeer nu andere metalen als elektroden en stel vast of er een spanning optreedt. Daarbij moeten we steeds bijhouden welk metaal de (+) pool – de anode – en welk metaal de (-) pool – de kathode – van de spanningsbron vormt. Noteer de uitkomsten weer in tabel 2.11.

Verklaring

Wat we niet kunnen zien, is dat de zuren in de appel de oppervlakken van het ijzer en het koper veranderen. Er treedt een chemische reactie op. Alleen dan slaat de meter uit. Wanneer we in plaats van een appel een glas zuiver leidingwater nemen, dan krijgen we geen uitslag. Voor een spanningsbron hebben we namelijk niet alleen twee elektroden nodig, maar ook een zogeheten elektrolyt, zoals b.v. het zuur in een appel. Zuiver water werkt echter niet als een elektrolyt.

2.11

Objekt	Anode	Kathode	Spanning in volts
Appel	Koper IJzer Koper	IJzer IJzer Koper	
Citroen	Koper	Zilver	
Sinaasappel			

Tussen bepaalde, van elkaar verschillende metalen, ontstaat een elektrisch spanningsverschil wanneer zij in een elektrolyt worden gebracht.

Levensduur van galvanische elementen

Het is duidelijk dat de chemische samenstelling van de elektrolyt en het materiaal waaruit de elektroden bestaan de hoogte van de spanning bepalen. In de meest gebruikte galvanische elementen, de monocel, de babycel en de Mignoncel, oftewel de normale batterijen, bestaat de (+) elektrode uit koolstof en de (-) elektrode uit zink. De elektrolyt is zinkchloride en opgelost in een gelei-achtige stof, zodat er geen vloeistof naar buiten stroomt als het zinken omhulsel (de min-elektrode) lek raakt.

De chemische reactie in de cel verandert namelijk op z'n minst één elektrode en de elektrolyt; deze worden geleidelijk opgebruikt. Bij batterijen zal de zink-elektrode (het omhulsel) steeds dunner worden.

Hoe groter het oppervlak van de elektroden is, des te groter ook de stroomsterkte die de cel maximaal kan leveren. Met de dikke monocel, kunnen we dus meer lampen tegelijk laten branden dan met de Mignoncel. Onttrekken we aan beide batterijen evenveel stroom, b.v. door er hetzelfde aantal lampen op aan te sluiten, dan zal de dikke monocel het vanzelfsprekend langer uithouden.



Monocel



Babycel



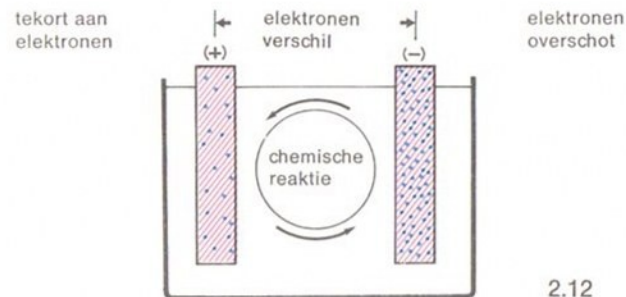
Mignoncel

2.3.2 Elektronendruk

Een lampje brandt niet vanzelf. We moeten het eerst op een spanningsbron aansluiten, zodat de vrije elektronen in de gloeidraad van de lamp op drift geraken.

Hoe gebeurt dit in een galvanisch element?

De chemische reacties die in de cel plaatsvinden zijn te ingewikkeld om hier uit te leggen. Heel in het kort komt het er op neer, dat chemische energie in elektrische energie wordt omgezet. Aan de (-)pool is een overschot aan elektronen ten opzichte van de (+)pool. Een vereffening van dit verschil is binnen de cel praktisch onmogelijk. Tussen de beide elektroden ontstaat wat we een „elektronendruk“ zullen noemen. Het drukverschil noemen we „elektrische spanning“, die we met onze meetapparatuur kunnen meten (fig. 2.12).



Een galvanisch element kan lange tijd, bij een juiste konstruktie zelfs jaren, bewaard worden.

Wanneer we een lamp of een andere stroomverbruiker aansluiten, dan volgt via de gesloten stroomkring een vereffening van het spanningsverschil. Zolang de cel niet is opgebruikt, zal de chemische reactie constant zorgen voor een overschot aan elektronen op de (-)pool. Op die manier blijft er een spanningsverschil bestaan (fig. 2.12).

Een transformator werkt heel anders. Grote generatoren in de elektriciteitscentrale wekken de spanning op, vrijwel op dezelfde manier als in een dynamo van een fiets. Zodra het wiel stilstaat, valt de spanning weg en gaat de lamp uit. Ook de netspanning in ons huis valt weg wanneer, om welke reden dan ook de generatoren in de centrale uitvallen of de verbinding wordt verbroken.

2.3.3 In welke richting loopt de stroom?

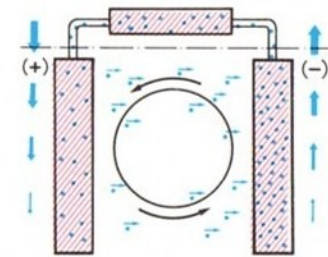
Uit onze experimenten kunnen we nog iets heel belangrijks afleiden: tussen de klemmen of polen van een energie- of spanningsbron kan heel goed een spanning heersen zonder dat er een stroom vloeit. Dat geldt b.v. voor de polen van een batterij waarop niets is aangesloten.

Zonder spanning van een energiebron kan er nooit een stroom gaan lopen. Natuurkundige onderzoeken hebben duidelijk aangetoond dat de elektronenstroom in de stroomkring bestaande uit stroomverbruikers die zijn aangesloten op een batterij of een trafo, van de (-)pool naar de (+)pool loopt. Deze stroomrichting van (-) naar (+) heet de „natuurkundige of fysische stroomrichting“ (fig. 2.13.)

Helaas waren onze voorvaders, die ook al met elektrische stroom werkten, niet op de hoogte van deze samenhang. Destijds is vrij willekeurig vastgelegd dat de stroom van (+)pool naar (-)pool loopt. Deze afspraak was gebaseerd op bepaalde technische processen die hiervoor duidelijke bewijzen leken te leveren. Deze stroomrichting noemen we de konventionele of traditionele richting.

In de elektrotechniek werkt men nog steeds met deze afspraak. Alle berekeningen en schakelingen zijn er op gebaseerd. We zullen daarom met de traditionele richting van (+) naar (-) moeten werken, hoewel we eigenlijk beter weten. (In plaats van konventionele stroomrichting spreekt men vaak van „technische“ stroomrichting).

Om verwarring te voorkomen spreken we het volgende af. We spreken van elektronenstroom als we de fysische stroomrichting (van - naar +) bedoelen. Praten we daarentegen over elektrische stroom of eenvoudigweg over stroom, dan hebben we het steeds over de technische stroomrichting (van + naar -).



2.13

Buiten de batterij loopt de elektronenstroom van (-) pool naar (+) pool. In de batterij loopt hij van (+) naar (-) pool. Zie fig. 2.13.

**Fysische stroomrichting: van (-) naar (+)
technische stroomrichting: van (+) naar (-)**

**Elektronenstroom =
fysische stroomrichting
stroom = technische stroomrichting.**

Afgeleide eenheden:

$$1 \text{ volt} = 1000 \text{ mV} = 1\,000\,000 \mu\text{V}$$

$$1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}$$

$$1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V} = 1000 \mu\text{V}$$

**Maximaal meetbereik van de meter is
10 volt.**

spanning (U) = ... V (volts)

2.3.4 De eenheid van en het symbool voor spanning

De eenheid van spanning is de volt, afgekort V. De technicus die met hoogspanning werkt, rekent meestal met het duizendvoud van een volt, de kilovolt, afgekort kV. In de kommunikatietechnieken hanteert men een kleinere eenheid dan 1 volt, namelijk de millivolt, afgekort mV.

De microvolt, afgekort μV , is weer duizend keer kleiner, dus één-miljoenste volt. Het meten van een dergelijke spanning is niet zo simpel, voor onze doeleinden is de millivolt klein genoeg.

In formules gebruiken we voor het begrip spanning een kursieve hoofdletter U .

De spanning van een batterij geven we b.v. als volgt aan: $U_{\text{bat}} = 4,5 \text{ V}$.

2.4 Elektrische weerstand

2.4.1 Geleiders en niet-geleiders

Het verschil tussen een geleider en een niet-geleider is gemakkelijk in te zien aan de hand van het vorige hoofdstuk. Een geleider laat de elektrische stroom gemakkelijk door, hij geleidt goed omdat er veel vrije elektronen zijn en de structuur van de stof de elektronen gemakkelijk doorlaat.

Een niet-geleider heeft daarentegen maar weinig vrije elektronen en een structuur die eerder een hinderpaal vormt voor de beweging van de elektronen.

Tot de goede geleiders behoren vele metalen, zoals zilver, koper, aluminium, zink en de meeste legeringen.

Isolatoren of niet-geleidende stoffen zijn porcelein, glas, keramiek, bijna alle kunststoffen en vele natuurlijke materialen, b.v. gedroogd hout. De niet-geleidende stoffen gebruiken we voor het isoleren van stroomdraden. Deze mogen uiteraard geen contact met elkaar maken.

Het koperdraad in hobbylabor is geïsoleerd met een kunststof van verschillende kleuren. Wanneer we een geleidende verbinding willen maken, dan moeten we de isolatie aan het uiteinde met een mesje weghalen.

Tussen geleidend en niet-geleidend liggen nog een groot aantal mogelijkheden. Er zijn ook stoffen die heel weinig – moeilijk gezegd – geleiden.

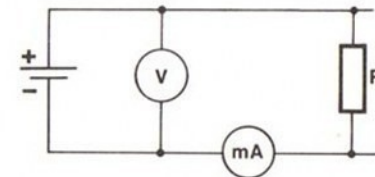
De weerstanden die we reeds in een aantal proeven gebruikten zijn bijvoorbeeld gemaakt van een speciale soort koolstof. Daarnaast zijn er ook nog de zogenaamde halfgeleiders, waarover we in hoofdstuk 11 iets willen vertellen.

De geleiding van een stof hangt af van het aantal vrije elektronen dat beschikbaar is.

2.4.2 Volgende metingen met weerstanden

We nemen de draad weer op bij de metingen, besproken in hoofdstuk 2.1 (tabel 2.6). Het ging daarbij om de stroom die door vijf verschillende weerstanden vloeide.

We gaan nu het volgende onderzoeken: wanneer in een gesloten stroomkring een spanningsbron is opgenomen, dan zal er een stroom gaan lopen. De sterkte daarvan is afhankelijk van de verschillende onderdelen in die stroomkring.



2.14

proefnr's	kleurcode R in	spanning in volts	stroomsterkte in mA
1 2 3	bruin-zwart-bruin- goud = $R_A (\dots \Omega)$	$\mu_1 =$ $\mu_2 =$ $\mu_3 =$	$I_1 =$ $I_2 =$ $I_3 =$
4 5 6	geel-violet-oranje- goud = $R_B (\dots \Omega)$	$\mu_4 =$ $\mu_5 =$ $\mu_6 =$	$I_4 =$ $I_5 =$ $I_6 =$

In het algemeen staan de indices (in dit geval de cijfers of letters achter de grote hoofdletters) lager dan de letter waar zij bij horen. Om technische redenen staan ze in dit boek op gelijke hoogte.

Proef

We onderzoeken eerst of de stroomsterkte verandert wanneer we de spanning veranderen terwijl de weerstand dezelfde blijft. De tweede vraag is natuurlijk naar het verband tussen stroomsterkte en de hoogte van de spanning. Wie een ft-trafo heeft, kan met de knop de spanning regelen. We kunnen ook de batterijhouder nemen van fig. 1.5 (op pag. 3) met drie batterijen. We weten dan precies welke spanningen we aanleggen, wat met de draaiknop niet het geval is.

In de stroomkring plaatsen we de weerstand met de code bruin-zwart-bruin-goud en we meten voor de 3 verschillende spanningen (1,5 – 3 – 4,5 V) de bijbehorende stroomsterktes. Wie met een transformator werkt, zoekt met de spanningsmeter de juiste standen van de draaiknop op en plakt daar een etiketje bij. Bovendien kan hij de proef herhalen met de weerstand code geel-violet-oranje-goud.

Om de verschillende metingen uit elkaar te houden, geven we de symbolen U (voor spanning) en I (voor stroomsterkte) zogeheten indices. Zie tabel 2.15.

De resultaten van de eerste proef krijgen de aanduiding U_1 en I_1 . Voor de tweede proef nemen we de index 2, dus U_2 en I_2 . Deze methode spaart ons een hoop moeite en tijd bij het aangeven om welke proef het gaat.

Als we ook de beide weerstanden verkort willen aangeven, dan mogen we daarvoor niet meer de cijfers 1 en 2 gebruiken. We kunnen wel spreken van weerstand R_A en weerstand R_B .

Wat doen we met de metingen?

Wat doen we met de resultaten? We hebben de metingen gedaan om iets te onderzoeken. Namelijk of er tussen aangelegde spanning en stroom een eenvoudig verband bestaat.

Meestal probeert men na te gaan of bij het groter worden van de spanning de andere grootte, hier de stroomsterkte, stijgt, daalt of gelijkblijft.

We vergelijken nu de uitkomsten van onze eerste proef met die van de tweede proef. We zien dat bij $U_1 = 1,5 \text{ V}$ en $I_1 = 14 \text{ mA}$ hoort en bij $U_2 = 2,9 \text{ V}$ en $I_2 = 28 \text{ mA}$.

Het is gemakkelijk te zien dat als de spanning twee keer zo groot wordt ook de stroomsterkte twee keer zo groot wordt. Ze hebben dezelfde vermenigvuldigingsfaktor.

Vergelijken we proef 3 met proef 1 (of 6 met 4), dan zijn U en I elk drie keer zo groot geworden. In de wiskunde heet een dergelijke verhouding van twee grootheden: recht evenredig. Het teken dat we er voor gebruiken is „ \sim “. We schrijven: $U \sim I$.

Algemeen heten dergelijke verbanden: functies. De vakman zegt: de stroom is een functie van de spanning.

Toepassing

Het gedrag van een onderdeel, zoals de weerstand bruin-zwart-bruin-goud, kunnen we nu ondubbelzinnig vastleggen. We hoeven daarvoor alleen de waarde U van de aangelegde spanning te delen door de stroomsterkte I . De verkregen waarde is de elektrische weerstand van het element.

2.4.3 Eenheid en symbool van de weerstand

Het symbool voor een weerstand kennen we al, het is een kursieve hoofdletter R . We kunnen de relatie met U en I in de volgende formule vastleggen:

$$R = \frac{U}{I}$$

Het enige wat we nu nog nodig hebben is de eenheid en een naam voor de elektrische weerstand. Het is de „ohm“ met als symbool de Griekse leter Ω (omega), ter ere van de natuurkundige Simon Ohm (1789–1854).

Het dubbele gebruik van het begrip weerstand

Het zal u opgevallen zijn dat we meestal spraken van weerstand en daarmee eigenlijk een element bedoelden, een onderdeel. Maar evengoed spreekt men in de techniek van weerstand, waarmee dan een waarde, een zeker weerstandsvermogen wordt bedoeld. Meestal blijkt uit het verband in de tekst wel of er een waarde of een onderdeel is bedoeld. Als dat niet zonder meer duidelijk is, dan moeten we het symbool Ω of R gebruiken al naar gelang wat we bedoelen.

Het Engels kent het woord „resistor“ voor het onderdeel en „resistance“ voor de waarde.

Voor een niet-veranderlijke weerstand blijft de verhouding tussen aangelegde spanning en bijbehorende stroomsterkte steeds gelijk.

Afgeleide eenheden:

$1000 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$ (kilo ohm)

$1\ 000\ 000 \Omega = 1 \text{ M}\Omega$ (Mega ohm, vaak Megohm)

$$\text{Weerstand} = \frac{\text{spanning}}{\text{stroomsterkte}}$$

De drie vormen van de Wet van Ohm:

$$1. R = \frac{U}{I}; \quad \Omega = \frac{V}{A}$$

$$2. U = R \cdot I; \quad V = \Omega \cdot A$$

$$3. I = \frac{U}{R}; \quad A = \frac{V}{\Omega}$$

2.16

onderdeel	spanning U in V	stroom- sterkte I in mA	weerstand- waarde R in Ω
weerstand			
.....			
.....			
.....			
.....			
.....			
gloeilampen hobbylabor			
.....			
.....			
gloeilampen em spoel			

2.5 De Wet van Ohm

2.5.1 Algemeen

De relatie tussen spanning, stroomsterkte en weerstand hebben we in het vorige hoofdstuk bij wijze van spreken „vanzelf“ gevonden. Zo'n 100 jaar geleden heeft Simon Ohm als eerste de relatie wiskundig geformuleerd. (Onder relatie verstaan we hier de wiskundige samenhang tussen 2 of meer natuurkundige grootheden, b.v. spanning, stroomsterkte en weerstand). Hiernaast de 3 vormen van de Ohmse Wet met de bijbehorende eenheden.

De wet is het beste te begrijpen en te onthouden door uit te gaan van de spanning die we aanleggen. Immers zonder spanning geen stroom die ergens door heen loopt en een zekere weerstand ondervindt. De formule voor de spanning luidt: $U = I \cdot R$.

De andere formules zijn hieruit gemakkelijk af te leiden. Duidelijk is ook dat we steeds de derde grootheid kunnen berekenen als we de andere twee weten.

2.5.2 Bepaling van weerstandswaarden

De Wet van Ohm kunnen we b.v. gebruiken voor de *berekening* van de weerstand in gloeilampen en onderdelen, waarvan we de waarde al een keer hebben *gemeten*. (zie hoofdstuk 2.4.3).

Proef

Wanneer u de uitkomsten niet wilt overnemen van reeds eerder ingevulde tabellen, dan verricht u de metingen voor de in tabel 2.16 vermelde onderdelen opnieuw.

Het volgende hoofdstuk bespreekt de bouw van de weerstanden zoals die in hobbylabor worden gebruikt.

2.6 Bouw van een weerstand

In radio's, televisies en de meeste elektronische apparaten zitten weerstanden, soms wel over de honderd. Ze hebben daarin verschillende functies te verrichten.

De meeste weerstanden zijn gebouwd volgens het principe dat in fig. 2.17 is weergegeven. Op een keramisch of glazen staafje wordt een filmlaag van een speciaal soort koolstof aangebracht. Dan volgt een droogproces, waarna een freesmachine een spiraal uitsnijdt in de koolstoffilm.

De lengte en de spoed van de spiraal (de afstand tussen de windingen) bepalen de elektrische weerstandswaarde. De aansluitdraden worden bevestigd op de uiteinden. Hierop komen kappen en het geheel wordt bedekt met een beschermende en isolerende laag. Tenslotte komt er een kleurcode op die aangeeft welke waarde de weerstand heeft.

2.7 De kleurcode

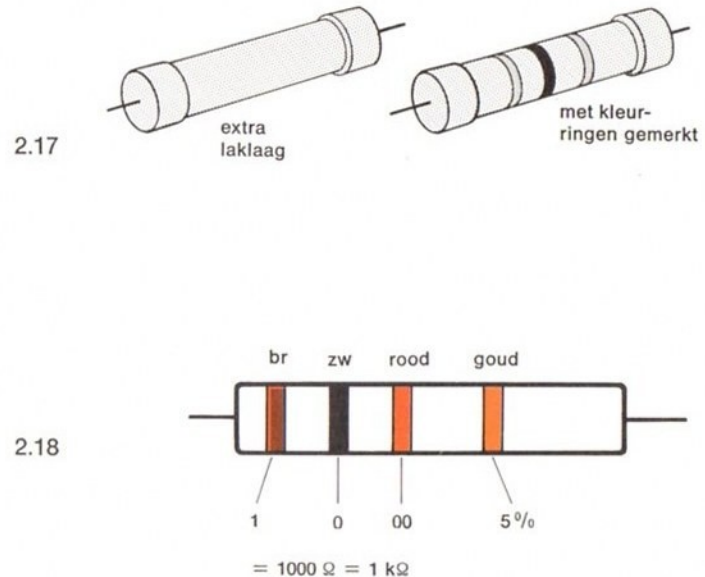
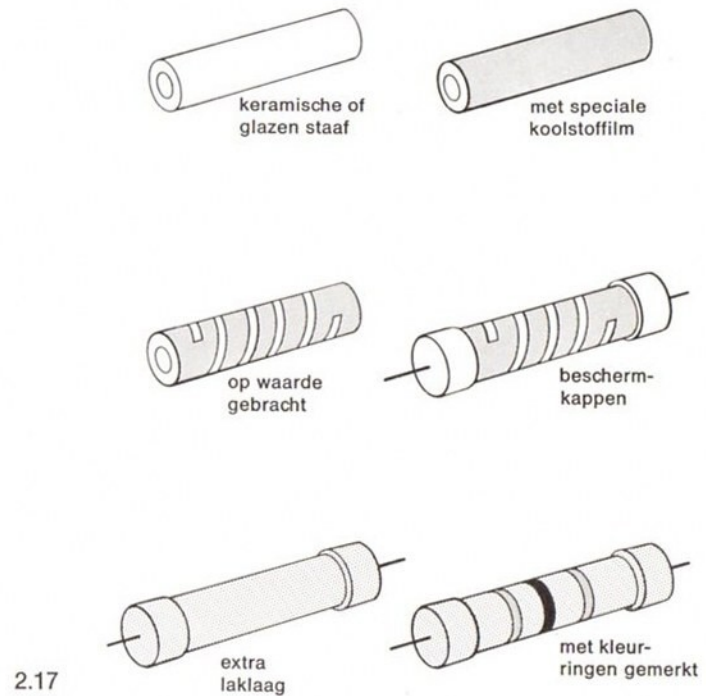
2.7.1 De weerstandswaarde

De weerstanden zouden theoretisch natuurlijk elke waarde kunnen krijgen. Maar gelukkig zijn er internationale afspraken gemaakt en werken we overal met een aantal vaste waarden. De meest gebruikelijke serie is:

1,5 – 2,2 – 3,3 – 4,7 – 6,8 – 10 (Ω , k Ω , M Ω)

Een tabel met fijnere onderverdelingen staat in het aanhangsel.

Er zijn ook weerstanden waarop de waarde en de tolerantie gedrukt staan. Het voordeel van kleurringen is dat ook de waarde van een weerstand die ergens ingebouwd zit, gemakkelijk is af te lezen. De eerste en de tweede kleurring geven elk één cijfer aan, de derde kleurring het aantal nullen daarachter. Figuur 2.18 geeft een voorbeeld.

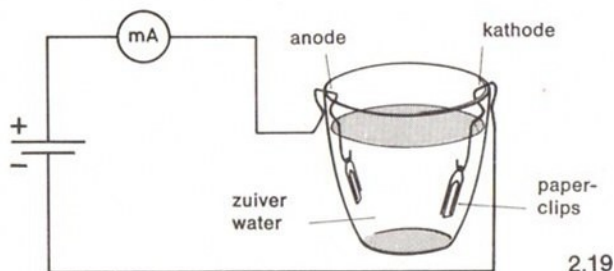


2.7.2 Tolerantie vermelding

De werkelijke waarde van de weerstand komt door de aard van het productieproces niet exact overeen met de gewenste waarde. Dergelijke weerstanden worden namelijk aan de lopende band met miljoenen geproduceerd. Daarom is er een bepaalde afwijking naar boven en beneden toegestaan, die in procenten wordt uitgedrukt. De nominale waarde is de waarde die de ringen aangeven; de preciese afwijking kan men natuurlijk niet aangeven, die verschilt per weerstand. Wel kunnen we het toegestane afwijkingspercentage vermelden. Dat heet de tolerantie (van het Latijnse woord *tolerare* = dulden).

De laatste ring, gerekend vanaf de aansluitdraad (zie de kleurcode aan het eind van het boek) geeft de tolerantie aan. De weerstanden van hobbylabor hebben een gouden ring en dat betekent een tolerantie van 5% van de richtwaarde. Voor de 100 Ω weerstand (bruin-zwart-bruin-goud) geldt nu: 5% van 100 Ω is 5 Ω . De werkelijke waarde mag dus 5 Ω boven of onder de 100 Ω liggen, anders gezegd: hij moet tussen de 95 Ω en de 105 Ω blijven.

Weerstanden met 1% of minder tolerantie zijn precisieweerstanden. Ze zijn veel duurder en worden alleen in bijzondere gevallen gebruikt, b.v. in precisie-meetapparatuur. Meestal zijn weerstanden met een tolerantie van 5% of 10% voldoende. Ze hebben resp. een gouden en een zilveren ring.



2.8 Weerstand als eigenschap van het materiaal

2.8.1 Een proef met water

Zet de proef op volgens fig. 2.19, waarbij we als spanningsbron een batterijhouder gebruiken of de trafo mot 4, die we op de laagste spanning instellen. Als elektroden nemen we een blauwe en een rode draad, elk 15 cm lang. Aan het ene uiteinde bevestigen we resp. een groene en een rode stekker. De andere uiteinden buigen we, na het verwijderen van de isolatie, om tot haken. Aan elke haak hangen we een paperclips. De afstand tussen de elektroden moet gelijk blijven. Het gemakkelijkst bereiken we dat door ze met een paperclips op de rand van het glas vast te zetten.

Wie geen doorzichtig glas heeft kan ook een kopje van porcelein of kunststof nemen. Metalen vaatwerk is echter niet geschikt. Het glas moet een diameter van ongeveer 5 cm hebben.

We schakelen nu de stroom in en lezen de stroomsterkte af (rode knop indrukken). Zoals u weet is de stroomsterkte in een stroomkring overal gelijk. De sterkte in de meter is dus gelijk aan die in het water. Het resultaat noteren we in tabel 2.20. We doen nu wat gewoon keukenzout in het water, eerst een klein beetje en daarna steeds meer, waarbij we roeren om het zout te laten oplossen.

We zien dat een klein beetje zout al voldoende is om de stroomsterkte aanzienlijk te verhogen. Voeg nu zoveel zout toe dat de meter op 60 mA komt te staan.

Om niet elke keer de rode knop in te hoeven drukken, zetten we deze vast met een ft-verende scharniersteen.

Konklusies:

1. door zuiver water loopt naar verhouding een kleine stroom. Water geleidt de stroom niet al te best.
2. het geleidingsvermogen neemt sterk toe als we keukenzout in het water oplossen.

Slotconclusie

Op grond van de Wet van Ohm kunnen we ook zeggen: de weerstand van water neemt af bij een stijgend zoutgehalte. Hetzelfde is het geval als we citroensap of zeepsop toevoegen.

2.20

proef-nr.	U in V	elektroden-afstand in cm	zout toe-voeging	I in mA	R bere- kend in Ω	G bere- kend in S

Wat G betekent komt in het volgende hoofdstuk aan de orde.

Wanneer onze huid nat is daalt zijn elektrische weerstand aanzienlijk. Dat is in het bijzonder het geval wanneer het water een wasmiddel, zeep of andere toevoegingen bevat, iets dat in de keuken of de badkamer bijna altijd zo is. Het kan daarom levensgevaarlijk zijn om zittend in de badkuip apparaten aan te raken die op het lichtnet zijn aangesloten.

Een schakelaar kan men beter ook niet met natte handen aan of uit doen. Kortom, experimenteren naast of in de badkuip is gevaarlijk en dom, ook met de uiteraard in normale omstandigheden volkomen veilige ft-trafo.

2.8.2 Geleiding en weerstand

Bij vloeistoffen rekent men in de techniek liever niet met de grootte van de weerstand maar met de reciproke. Dat is de omgekeerde waarde, de geleiding. We gebruiken hiervoor als symbool de letter G en de eenheid is de siemens, afgekort met hoofdletter S . We krijgen de formule:

$$G = \frac{I}{R}; \quad S = \frac{1}{\Omega}$$

Volgens de Wet van Ohm is $R = U : I$, in de bovengenoemde formule geldt dan:

$$G = \frac{I}{U}; \quad S = \frac{A}{V}$$

Bepaal nu de grootte van de weerstand en de geleiding van het water, vermengd met het keukenzout. De berekende waarden schrijven we in tabel 2.20.

Ga na of de geleiding afneemt of toeneemt wanneer we de afstand tussen de elektroden verkleinen.

Resultaat

We zien dat de weerstand van het water tussen de elektroden afhangt van de afstand tussen de beide elektroden.

Verminder de hoeveelheid water nu zodanig dat de elektroden nog maar gedeeltelijk in het water staan. In dat geval stijgt de weerstand en daalt de geleiding.

2.8.3 Soortelijke weerstand en soortelijke geleiding

We hebben verschillende waarden verkregen, die afhingen van de afstand tussen de elektroden en van de hoogte waartoe het glas met water was gevuld. Technici hebben natuurlijk weinig aan dergelijke maatstaven. Daarom geeft men in de techniek de weerstand van b.v. een laag koolstof of een vloeistof op een andere wijze aan.

Voor koper wordt de weerstand aangegeven van een koperdraad met een lengte van 1 m en een doorsnede van 1 mm². Deze waarde heet de soortelijke weerstand. Het symbool is de Griekse letter „ ρ “ (spreek uit als rho). De eenheid is: $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

$$R = \frac{\rho l}{A} (\Omega)$$

$$A = \text{doorsnede } r^2 \pi \text{ in mm}^2$$

$$l = \text{lengte van de draad in mm}$$

We kunnen nu uitrekenen dat een koperdraad van 90 m lengte, een diameter van 0,15 mm en een soortelijke weerstand $\rho = 0,02$ een weerstand heeft van 100 Ω . Deze waarde komt ongeveer overeen met de weerstand van de elektromagneet uit de doos. Hieruit mogen we de konklusie trekken dat de wikkeling een lengte heeft van ongeveer 90 m koperdraad met een diameter van 0,15 mm.

Een ijzerdraad van 1 m lengte en een doorsnede van 1 mm² heeft daarentegen een weerstand van ongeveer 0,1 Ω . De soortelijke weerstand van ijzer is dus

$$\rho = 0,1 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}.$$

Vraag

Hoe groot zou de weerstand R van de elektromagneet zijn als de wikkeling uit ijzerdraad bestond in plaats van koperdraad.

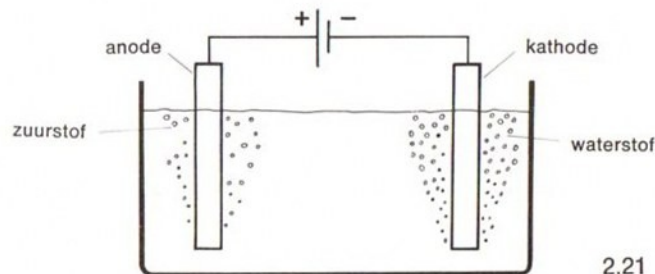
Vooraf bij het gebruik van vloeistoffen rekent men liever met de geleiding. De waarde daarvan kunnen we zien als het omgekeerde (de reciproke) van de soortelijke weerstand. Het symbool is de Griekse letter κ (spreek uit: kappa). De eenheid is $\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$.

2.9 Chemische werking van een elektrische stroom

Bij de proef met het water en het keukenzout hebben we tevens kennis gemaakt met de chemische of scheikundige werking van een stroom. Waarschijnlijk heeft u wel gezien hoe er op de beide elektroden kleine gasbelletjes ontstonden die omhoog gingen (fig. 2.21). De elektrische stroom ontbindt het water namelijk in zijn beide bestanddelen: zuurstof en waterstof.

Op de kathode, verbonden met de $-$ pool komt precies twee keer zoveel waterstof vrij als zuurstof op de anode die met de $+$ pool is verbonden. Het watermolecuul H_2O bestaat namelijk uit 2 waterstofatomen en 1 zuurstofatoom.

Er komt dus – vooral na het toevoegen van het keukenzout – nog een heel stuk scheikunde aan te pas. Wat er allemaal precies gebeurt is te ingewikkeld om op dit moment uit de leggen. Deze splitsing van het water in zijn bestanddelen heet elektrolyse. Wie dat leuk vindt kan het proces een uur z'n gang laten gaan. Wanneer er chloor in het water zit, ontstaat er een grote hoeveelheid warmte.

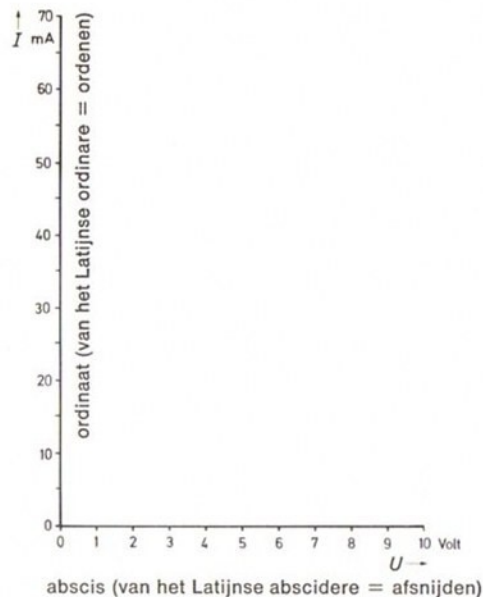


2.10 Het stroom/spanningsdiagram

De Wet van Ohm kunnen we niet alleen met een formule of een vergelijking weergeven, maar ook in een tekening vastleggen. Een dergelijke weergave heet een diagram of grafiek, waarvan we nu een voorbeeld gaan bespreken.

2.10.1 Het koördinatenstelsel

In fig. 2.22 zien we de basis van een dergelijk diagram. Het bestaat uit een horizontale en een verticale as. De horizontale lijn heet abscis en de verticale ordinaat. Omdat beide assen loodrecht op elkaar staan, spreken we van een rechthoekig koördinatenstelsel. Op beide assen is een schaal getekend.



proefnr	R grenswaarde in Ω	U in V	I in mA
1	100	$U_1 =$	$I_1 =$
2		$U_2 =$	$I_2 =$
3		$U_3 =$	$I_3 =$
berekend		$U = 5$	$I_{th} = 50$

In ons voorbeeld staat op de horizontale as de spanning in volts uitgezet en op de vertikale as de stroomsterkte in mA.

Een afstand van 5 mm komt overeen met 1 V. Afgekort: 5 mm $\hat{=}$ 1 V. Voor de stroomsterkte is een andere lengte genomen: 1 cm $\hat{=}$ 10 mA.

„Bij elkaar horen“ is in het Latijn „coördinere“. De bij elkaar behorende waarden heten daarom de stroom- en de spanningkoördinaten. Het assenstelsel waarop de waarden staan aangegeven heet koördinatensysteem.

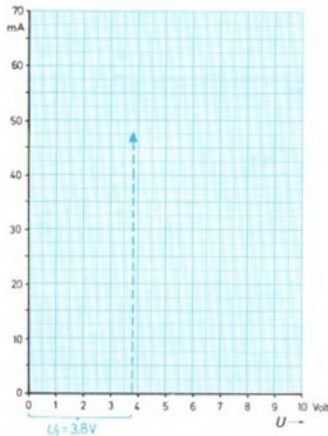
Proef

In dit koördinatenstelsel gaan we nu de resultaten opnemen van de metingen met een weerstand.

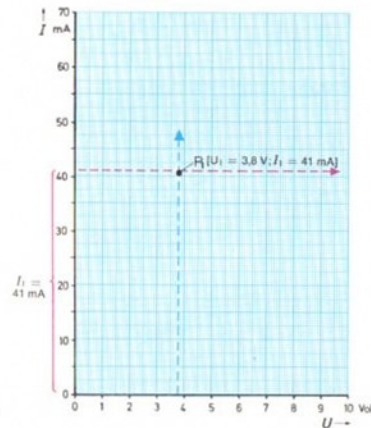
Meet opnieuw de stroomsterkte in een kring met de 100 Ω weerstand (kleurcode) en bij 3 verschillende spanningen. U kunt ook de vroeger verkregen waarden nemen.

Kies de 3 spanningen zo, dat de eerste zo laag mogelijk is en de derde zo hoog mogelijk. Schakel bij een spanning hoger dan 4 V de stroom maar voor korte tijd in, anders wordt de weerstand te warm.

2.24



2.25



Konstruktie

De gemeten waarden (tabel 2.23) moeten we nu in het diagram 2.26 op pag. 35 gaan uitzetten. Dat doen we als volgt:

- op de spanningsas (abscis) zoeken we de gemeten waarde van b.v. $U_1 = 3,8$ V op. In dit punt trekken we een loodlijn omhoog, zoals in fig. 2.24 is getekend.
- daarna zoeken we op de stroomsterkte-as (de ordinaat) de gemeten waarde van b.v. 42 mA op. Nu trekken we in dit punt een lijn loodrecht naar rechts, zoals in fig. 2.25 is aangegeven.
- beide lijnen snijden elkaar in het punt P_1 , dat dan bepaald is door de bijbehorende waarden van U_1 en I_1 , die tussen de haken staan aangegeven.

Volgens hetzelfde principe brengen we nu onze andere metingen in het diagram 2.26 en dan verkrijgen we de punten P₁, P₂ en P₃. In fig. 2.27 zijn de door ons gemeten waarden opgenomen. Deze zullen hoogstwaarschijnlijk van de uwe afwijken.

2.10.2 De weerstandsrechte

We verbinden nu de 3 punten P₁, P₂ en P₃ met elkaar en verlengen de lijn tot het 0-punt of de oorsprong van het stelsel. In ons voorbeeld krijgen we dan fig. 2.27. Ook uw eigen verbindingslijn moet er zo uitzien en zal niet een volkomen rechte lijn vormen.

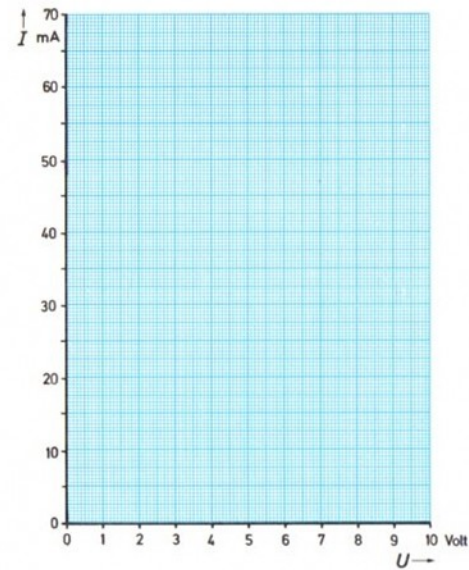
Onderzoek

We zullen nu nagaan of onze lijn theoretisch al dan niet een rechte moet zijn. We rekenen voor de 100 Ω weerstand uit wat de stroomsterkte moet zijn bij een willekeurig gekozen spanning. We doen dat met de Wet van Ohm en moeten daartoe de formule herleiden. Wat we zoeken is de stroomsterkte I , bekend zijn de aangelegde spanning U en de waarde R van de weerstand. We nemen daarom de vorm:

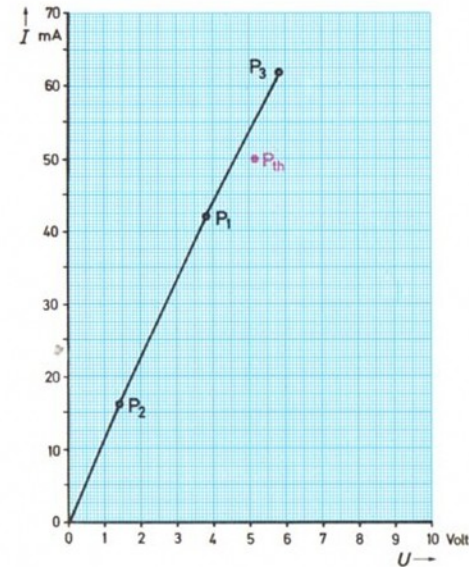
$$I = \frac{U}{R} \text{ of } I = \frac{V}{\Omega}$$

We krijgen dan voor 5 V en 100 Ω een stroomsterkte I van $\frac{5}{100} = 0,05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$. De spanning 5 V en de stroomsterkte 50 mA zetten we in het diagram 2.26. Het aldus verkregen punt noemen we P_{th}, waarmee we aangeven dat het een „theoretisch“ verkregen punt is.

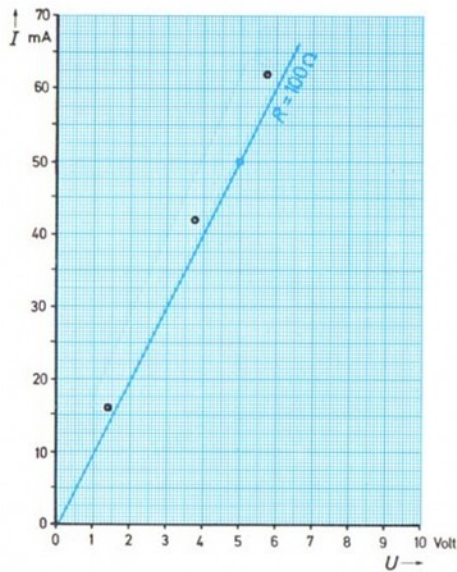
Het blijkt niet precies op de lijn te liggen die we met de gemeten waarden hebben verkregen, maar veel scheelt het niet.



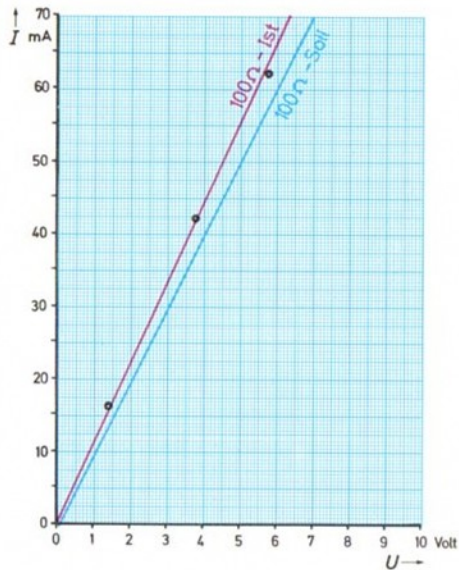
2.26



2.27



2.28



2.29

Als we niet 5 V maar 0 V in de vergelijking hadden ingevuld, dan zou het resultaat een stroomsterkte van 0 mA zijn geweest. Nogal duidelijk, waar geen spanning is kan ook geen stroom vloeien. Voor de weerstandsrechte betekent het dat die in elk geval door de oorsprong ($U = 0$ en $I = 0$) gaat.

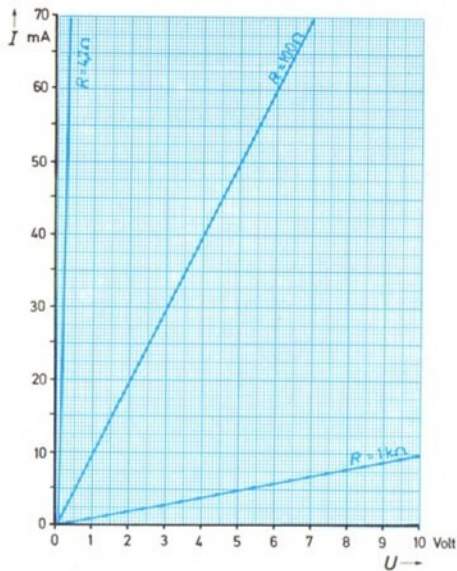
We kunnen nog veel meer punten berekenen voor willekeurig gekozen spanningen en die in de grafiek uitzetten. Noodzakelijk is het niet want al die punten moeten precies op de rechte liggen die we tussen de oorsprong (het nulpunt) en het berekende punt P_{th} kunnen trekken.

Figuur 2.28 geeft de grafische voorstelling van een 100Ω weerstand.

2.10.3 Het uitzetten van de gevonden waarden

De punten die we met de metingen hebben verkregen voor de 100Ω -weerstand liggen helaas niet precies op de theoretische rechte. Dat komt door fouten bij het aflezen, door ijkfouten in de meter of door toleranties in de waarde van de weerstand. We moeten de kromme (in feite gebroken) lijn in het diagram vervangen door een rechte lijn. Voor ons voorbeeld is dat figuur 2.29.

Een dergelijke rechte kunt u ook trekken voor de door u verkregen punten $P_1 - P_2 - P_3$. Die lijn zal in elk geval door de oorsprong gaan. Neem wel drie metingen waarvan u de waarden precies kon aflezen op de schaal. In figuur 2.26 kunt u de rechte lijn tekenen die bij de door u gemeten waarden hoort.

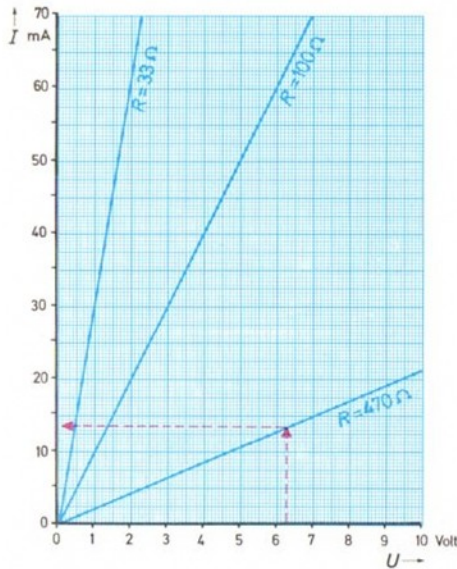


2.30

Het verkregen diagram heet naar de assen: stroom/spanningsdiagram. Bepaal tevens de weerstandsrechte voor de $470\ \Omega$ weerstand (kleurcode).

Bepaal ook hier weer de rechte lijn aan de hand van de gemeten waarden. Ook nu weer mag de lijn niet door het punt gaan dat we theoretisch berekenen met de waarde van $470\ \Omega$.

In figuur 2.30 zijn de drie rechten getrokken voor drie weerstanden aan de hand van hun theoretische waarden: $1\ \text{k}\Omega$, $100\ \Omega$ en $4,7\ \Omega$. Teken zelf de rechten voor de overige weerstanden.



2.31

2.10.4 De toepassing van het stroom/spanningsdiagram

In een stroom/spanningsdiagram kunnen we voor elke weerstand aan de hand van zijn rechte onmiddellijk aflezen hoe groot de stroom is die er door heen loopt bij een bepaalde spanning. Het diagram verschaft ons snel de juiste weerstand als we een schakelprobleem moeten oplossen.

Hoe groot is de stroomsterkte bij voorbeeld wanneer een $470\ \Omega$ -weerstand op een spanning van $6,2\ \text{V}$ wordt aangesloten?

In fig. 2.31 zien we hoe we die waarde uit het diagram aflezen. Op de spanningsas zoeken we het punt $6,2$ op en gaan dan loodrecht naar boven tot we de $470\ \Omega$ lijn snijden. Vanuit het snijpunt gaan we naar links, evenwijdig aan de spanningsas tot we de stroomsterkte-as snijden. In ons voorbeeld komen we uit op het punt $13,2\ \text{mA}$.

De weerstandsrechte in een stroom/spanningsdiagram maakt een kleinere hoek met de spanningsas naarmate de weerstand groter is en de geleiding kleiner.

Het snijpunt $6,2 \text{ V} - 13,2 \text{ mA}$ heet ook wel werkpunt.

Uit het diagram kunnen we ook de spanning verkrijgen die b.v. op een 33Ω -weerstand moet staan om een stroom van 30 mA te laten lopen. Probeer dit zelf uit te zoeken. Hoe groot is de stroomsterkte in een 100Ω -weerstand bij een spanning van $3,0 \text{ V}$?

3 Elektrisch Vermogen en Arbeid

Een energiebron geeft een bepaald vermogen af, een verbruiker neemt dat op. Dit hoofdstuk bespreekt wat dat betekent en het verband tussen elektrisch vermogen en arbeid.

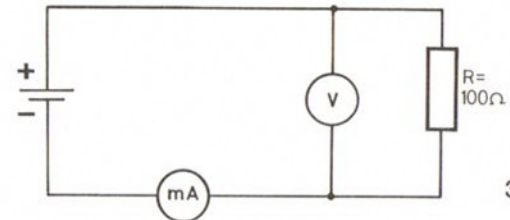
3.1 Warmte-ontwikkeling van een elektrische stroom

1e proef:

We sluiten (fig. 3.1) een $100\ \Omega$ -weerstand (kleurcode) aan op een $4,5\ \text{V}$ batterij of op de laagste spanning van de trafo. Elke 2-3 seconden raken we de weerstand even met onze wijsvinger aan. Na een seconde of 10 voelen we dat de weerstand warm wordt; twintig seconden later is hij goed warm en blijft dat tot we de stroom uitschakelen.

De elektrische stroom die door de weerstand loopt, levert een bepaalde hoeveelheid warmte. Omdat de weerstand een zekere massa heeft, duurt het enige tijd voordat een bepaalde, konstant temperatuur is bereikt. We herhalen de proef met de $470\ \Omega$ weerstand (kleurcode). Er valt nu nauwelijks enige verhitting te constateren.

Dezelfde proef doen we nu met een $10\ \Omega$ weerstand (kleurcode). Let op, na korte tijd wordt de weerstand zeer heet. Verbreek de verbinding met de spanningsbron!



3.1

Het is niet voldoende om alleen de drukknop van de meter los te laten. Zoals we weten blijft de stroom toch lopen, ook als de wijzer niet uitslaat. We moeten de weerstand uit de stroomkring halen of de verbinding verbreken: de stroomkring moet worden onderbroken.

Konklusie

Uit de proeven kunnen we konkluderen: een weerstand in een stroomkring zal warmer worden naarmate zijn weerstandswaarde lager is, hetgeen tevens inhoudt naarmate de stroomsterkte groter is.

2e proef:

nu gaan we onderzoeken of de hoogte van de spanning ook invloed heeft op de warmte die wordt ontwikkeld. We doen dat met de 100 Ω -weerstand (kleurcode). Wie geen trafo heeft doet dat met batterijen (1,5 – 3,0 – 4,5 V). De trafo stellen we achtereenvolgens in op de laagste, de middelste en de hoogste stand. De warmte-ontwikkeling beoordelen we weer met de wijsvinger. Laat de weerstand tussen 2 proeven steeds helemaal afkoelen.

Konklusie

Zoals we mochten verwachten, wordt de weerstand bij de hoogste spanning het warmst.

Eindresultaat

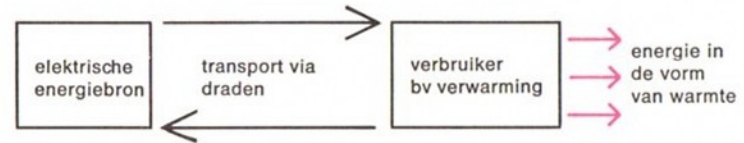
De eerste proef gaf als konklusie dat bij een grotere stroomsterkte er meer warmte wordt geleverd. De tweede proef vertelde ons dat er eenzelfde verband bestaat tussen verwarming en spanning.

Dat kan ook moeilijk anders. De stroomsterkte loopt namelijk omhoog in verhouding met de spanning volgens de Wet van Ohm. Vooropgesteld dat de weerstand hetzelfde blijft.

In hoofdstuk 3.3 zal het verband tussen vermogen, spanning en stroomsterkte exact worden besproken.

De ontstane warmte is een van de vele energievormen. Maar energie ontstaat niet zomaar uit het niets, ze moet ergens vandaan komen. Het is duidelijk: de warmte wordt geleverd door de elektrische energie, afgegeven door de batterij of de trafo. De energie verplaatst zich met behulp van de elektrische stroom door de draden en wordt voor een deel in de weerstand omgezet in warmte (fig. 3.2).

3.2



In vele huishoudelijke apparaten is dit principe toegepast: de elektrische kachel, oven en het strijkijzer b.v. In elektrische schakelingen van andere apparaten zoals radio's, televisies, telefoons e.d. is de warmte-ontwikkeling juist niet gewenst. Het is een neveneffect dat men noodgedwongen op de koop toe moet nemen.

De elektrische stroom laat de gloeidraad van een gloeilamp licht uitstralen. Hij ontleedt water in zijn bestanddelen, en zoals uit onze proeven bleek, gaat een elektrische stroom gepaard met warmte-ontwikkeling.

Kortom: een stroom kan iets leveren, een vermogen afgeven, arbeid verrichten.

3.2 Vermogen en arbeid in het spraakgebruik

In het dagelijks leven gebruiken we woorden als prestatie, vermogen en arbeid min of meer door elkaar. We zeggen: „afgelopen zondag heb ik hard gewerkt, een hoop arbeid verricht, de hele tuin omgespit. Maar de week daarvoor heb ik een veel grotere prestatie geleverd: 30 km gewandeld.“ Of: „de motor van mijn auto levert 80 pk“.

En 100 meter hardlopen in 10.3 sek. mag dan geen wereldrecord zijn, het is een heel behoorlijke prestatie.

Toch bedoelen we in al die gevallen iets anders. Omdat we elkaar met een half woord begrijpen of menen te begrijpen, laten we zo het een en ander weg in ons dagelijks spraakgebruik. Maar juist dat „een en ander“ is essentieel in de natuurkunde om precies aan te geven waar het om gaat.

Vermogen en arbeid horen bij elkaar, maar hoe? Dergelijke begrippen zijn in het dagelijks leven nogal onduidelijk. We zeggen dat de kolensjower vroeger zware arbeid verrichtte, terwijl bureauwerk tot de lichte arbeid behoort. Maar de kolensjower droeg misschien 3 uur per dag de zware zakken omhoog en het bureauwerk duurt 8 uur. Om misverstanden te voorkomen, gaan we ons voortaan van de natuurkundige definities bedienen.

3.3 Het elektrisch vermogen

Het elektrisch vermogen dat b.v. een weerstand verbruikt, wordt bepaald door het produkt van de aangelegde spanning en de stroomsterkte. De letter die we in formules voor vermogen gebruiken is de kursief geschreven hoofdletter „ P “, de afkorting van het Engelse woord „power“.

De eenheid is de watt (naar de Engelse natuurkundige James Watt, 1736-1819), afgekort „W“.

$$P = U \cdot I; \quad W = V \cdot A$$

Een lichaam neemt een elektrisch vermogen van 1 watt af wanneer er bij een spanning van 1 volt een stroom van 1 A doorheen loopt.

Met de wet van Ohm kunnen we twee formules afleiden. We kunnen U vervangen door $I \cdot R$ of I door U/R en krijgen dan voor het vermogen:

$$P = I^2 R \text{ of } P = \frac{U^2}{R}$$

3.3

proefnr	R gewenste waarde in Ω	U in V	I		P in W
			in mA	in A	
1	470				
2					
3					
4	100				
5					
6					
7	10				
8					
9					

Herhaal nu de reeds eerder gedane proeven van hoofdstuk 3.1 en bereken het vermogen dat de weerstanden hebben verbruikt voor de verschillende aangelegde spanningen. In tabel 3.3 kunnen we de resultaten noteren.

Een verwarmingselement, evenals een weerstand, neemt een zeker vermogen af zolang er een stroom doorheen loopt. Zodra de stroom wordt uitgeschakeld, houdt ook het verbruik (het afnemen van een vermogen) op.

Het element zal, afhankelijk van zijn warmtecapaciteit, nog een hele tijd warmte afgeven aan zijn omgeving.

We stellen vast:

1. Elektrisch vermogen is alleen van de energiebron naar de energieverbruiker te transporteren als de stroomkring is gesloten.
2. Het apparaat dat de stroom levert – de energiebron – zal meer vermogen moeten leveren naarmate de aangesloten weerstand een lagere waarde heeft.

3. De stroombron moet evenveel elektrisch vermogen kunnen leveren als de aangesloten verbruiker kan afnemen. In het geval dat ook de verbindingdraden elektrisch vermogen afnemen (hetgeen niet gewenst maar vaak onvermijdelijk is) zal de stroombron die ook moeten leveren.

Vragen:

1. Welke gloeilamp neemt meer elektrisch vermogen af, een 100 W of een 0,1 kW lamp? (Inderdaad de laatste notatie is wat ongewoon).
2. Hoe groot is de stroomsterkte in die lamp bij een spanning van 220 V, en hoeveel bij een spanning van 110 V?
3. Hoeveel vermogen wordt er in dat laatste geval afgenomen? Reken een en ander na, we krijgen dan een duidelijk inzicht waarom de lamp bij 110 V maar een armzalig licht verspreidt.

3.4 De elektrische arbeid

Een weerstand van 470 Ω geeft gedurende een bepaalde tijd, b.v. een uur, minder warmte af dan een weerstand van 100 Ω in dezelfde tijd en vooropgesteld dat er dezelfde spanning op staat. Daar beide weerstanden gelijke afmetingen hebben, maar de een heter wordt dan de ander, zal de heetste ook de meeste warmte afgeven. Maar hoe staan de zaken als we dezelfde spanning een uur op de 470 Ω -weerstand aanleggen en slechts 10 minuten op de 100 Ω -weerstand? Welke weerstand geeft nu meer warmte af? Maak eerst een schatting, lees daarna verder hoe we aan het exacte antwoord kunnen komen.

De totale warmte die elke weerstand heeft afgegeven komt overeen met de verbruikte elektrische energie in de tijd dat er stroom door de weerstand liep.

Het klinkt wat vreemd maar natuurkundig is de elektrische arbeid gelijk aan het verbruik van elektrische energie.

Omdat het begrip arbeid zoveel betekenissen heeft in het dagelijks spraakgebruik, zullen we voortaan het begrip elektrische energie hanteren. Energie en arbeid worden in dezelfde eenheid uitgedrukt, zie hobby 2-3. Het verbruik aan elektrische energie krijgen we door het opgenomen elektrisch vermogen (in watts) te vermenigvuldigen met de tijd dat de verbruiker (in dit geval de weerstand) op de stroombron stond aangesloten.

De verrichte arbeid is dus het produkt van het opgenomen elektrisch vermogen en de tijd dat de verbruiker was ingeschakeld. Het symbool voor alle soorten arbeid is de kursieve letter „*W*“ (afgeleid van het Engels woord „work“). Er geldt nu:

$$W = P \cdot t$$

De eenheid van elektrische arbeid is de wattsekonde ($W \cdot s =$ wattsekonde).

In de warmtetechniek en bij het opwekken van elektrische energie rekent men niet in watts maar in kilowatts of megawatts. Voor elektronici daarentegen is 1 watt vaak een veel te grote maat. Zij rekenen met het duizendste deel: de milliwatt. Afgekort mW. Wie de hoeveelheid elektrische arbeid berekent die een centrale verwarming in de loop van een winter verricht (het energieverbruik) en als warmte afgeeft, krijgt een geweldig groot getal. Wie dat leuk vindt, kan het energieverbruik in watts uitrekenen van een verwarmingselement, bij een spanning van 220 V, een stroomsterkte van 10 A en een tijd van 10 uur per dag, gedurende 5 maanden. Voor dergelijke doeleinden gebruiken we de eenheid: kWh (spreek uit: kilowattuur). De h komt van het Engelse woord hour = uur. De kWh is ook de eenheid waarmee het elektriciteitsbedrijf rekent. We betalen dus niet het elektrisch vermogen, maar wel de arbeid die verricht is, de energie die het bedrijf heeft geleverd en die wij hebben verbruikt.

Elektrische arbeid (energieverbruik) is gelijk aan het produkt van het verbruikte – of opgenomen – vermogen en de tijd dat de verbruiker stond ingeschakeld.

Afgeleide eenheden voor vermogen:

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$1 \text{ MW} = 1000 \text{ kW} = 1\,000\,000 \text{ W}$$

$$1 \text{ mW} = 0,001 \text{ W}$$

Afgeleide eenheden voor elektrische arbeid:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 1000 \text{ W} \cdot 3600 \text{ s}$$

$$= 3\,600\,000 \text{ Ws}$$

$$1 \text{ MWh} = 1000 \text{ kWh}$$

3.4

R in Ω	U in V	P in W	t in s	W	
				in Ws	in Wh
100	4,5		600		
470	4,5		3600		

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t; I = \frac{U}{R}$$

$$W = \frac{U \cdot U \cdot t}{R} = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Vermogen is de arbeid per tijdseenheid

Bereken nu de elektrische energie die een 100 Ω -weerstand in 10 min = 600 sek. verbruikt en doe hetzelfde voor een 470 Ω -weerstand in 1 uur = 3600 sek (tabel 3.4). In beide gevallen is de spanning 4,5 V. We kunnen eerst de stroom berekenen die bij deze spanning door de weerstanden loopt en dan het produkt $U \cdot I$, ofwel het elektrisch vermogen. Eleganter is het om de vergelijking voor de elektrische energie (arbeid) uit te werken en te schrijven:

$$W = \frac{U^2}{R} \cdot t$$

Kijk eens na hoeveel de rekening bedraagt voor de geleverde elektrische energie. Behalve een vast bedrag voor de aansluiting op het net en de meter, betaalt men alleen voor de geleverde arbeid = energie. Het soms gebruikte woord „arbeidsvermogen“ heeft in natuurkundige zin geen betekenis.

Vraag:

hoeveel moet er bij een tarief van f 0,10 per kWh betaald worden voor een gloeilamp van 220 V/100 W, die 10 uren brandt:

- (a) f 0,01 (b) f 0,10 (c) f 1,00.

Nogmaals: wat is vermogen?

We gaan nog even terug van arbeid naar vermogen. Door de vergelijking voor de arbeid:

$$W = P \cdot t \text{ te schrijven in de vorm } P = \frac{W}{t}$$

zien we dat het vermogen niets anders is dan de arbeid (het energieverbruik) die per tijdseenheid wordt verricht.

Een man die in 1 uur 20 zakken versjouwv, presteert meer – hij levert een groter vermogen – dan iemand die er 1 uur en 30 minuten over doet. Beiden hebben echter dezelfde arbeid verricht.

Zoals uit het laatste voorbeeld blijkt, behoort bij een vermogensvergelijking altijd een tijdsopgave waarin de arbeid wordt verricht, uiteraard een vergelijkbare arbeid! In ons voorbeeld het versjouwen van 20 zakken.

In het begin van dit hoofdstuk spraken we over iemand die de ene zondag zijn tuin had omgespit en de andere dag 30 km gewandeld. In beide gevallen was er sprake van een prestatie, het leveren van arbeid en een vermogen. Hoewel „een zondag“ nu niet bepaald een exacte maat voor de tijd is. Maar zelfs al weten we dat het in beide gevallen 10 uur is geweest, dan kunnen we nog geen

vergelijking maken die enige zin heeft. Want spitten kan wel veel zwaarder zijn dan wandelen.

En de man die op diezelfde zondag een artikel schreef? Ook hij heeft arbeid verricht. Een hele prestatie zelfs. Hij zegt dat hij de toppen van zijn vermogen heeft bereikt. Hoeveel arbeid heeft hij in natuurkundige zin verricht?

Zo zien we dat we de natuurkundige begrippen vermogen en arbeid niet zonder meer kunnen toepassen op de „menselijke arbeid“.

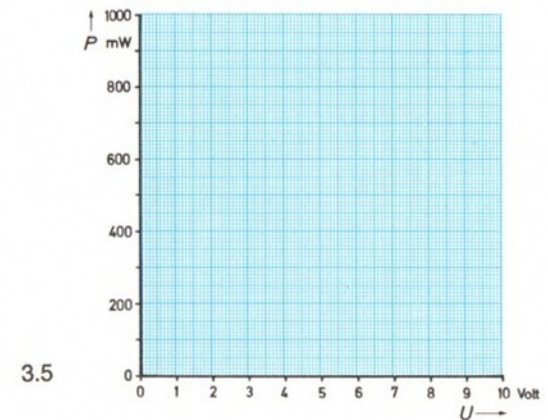
3.5 Het vermogen/spanningsdiagram van een weerstand

Hoe groot is het elektrisch vermogen van een weerstand met een nominale waarde (de waarde die er op staat aangegeven) van $100\ \Omega$?

Voor elke spanning krijgen we een andere waarde! Als we een andere weerstand nemen, b.v. $470\ \Omega$, dan moeten we ook opnieuw rekenen. Vaak is het eenvoudiger om voor de verschillende weerstanden een vermogen/spanningsdiagram te maken en zo de gezochte waarde grafisch te bepalen. Het diagram is op dezelfde manier opgebouwd als het stroom/spanningsdiagram, behandeld in hoofdstuk 2.10.

Konstruktie

Voor de spanning nemen we als maatstaf $1\ \text{V} \cong 5\ \text{mm}$ op de horizontale as. Het vermogen zetten we uit op de verticale as en als maatstaf geldt $200\ \text{mW} \cong 1\ \text{cm}$. Zie hiervoor fig. 3.5.



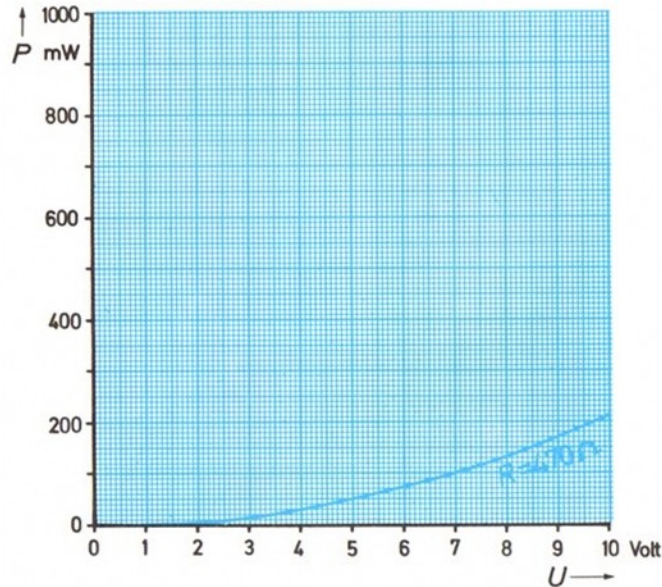
3.6

R in Ω	U in V	I in mA	P in mW
100	1	10	10
	2	20	40
	3	30	90
	4	40	160
	5	50	250
	6	60	360
	7	70	490
470	1	2,1	2
	2	4,2	8
	3	6,3	19
	4	8,5	34
	5	10,6	53
	6	12,8	77
	7	14,9	104
	8	17,0	136

Eerst tekenen we de curve voor de 100 Ω -weerstand. De berekende waarden staan al in tabel 3.6. Het enige wat we moeten doen is deze in het diagram brengen en aan de hand van de zo verkregen punten de vermogenscurve voor de 100 Ω -weerstand tekenen. Hiervoor gebruiken we diagram 3.7 dat overeenkomt met dat van 3.5, alleen is hier de lijn voor de 470 Ω -weerstand al gegeven. Ook de curve voor de 100 Ω -weerstand zal geen rechte lijn zijn maar sterk gekromd. De oorzaak is: het vermogen P neemt toe met het kwadraat van de spanning. De formule die de grondslag daarvan vormt, kennen we al van pag. 41:

$$P = U^2 \cdot \frac{1}{R} [\text{W}]$$

Bereken nu de waarden voor $R = 33 \Omega$ en teken de bijbehorende curve eveneens in fig. 3.7.



3.7

Het vermogen neemt met het kwadraat van de spanning toe.

Toepassing

Uit het diagram kunnen we nu zonder te rekenen onmiddellijk aflezen welk vermogen een 100 Ω -resp. een 470 Ω -weerstand afneemt bij een willekeurig gekozen spanning tussen 0 en 10 V. Omgekeerd kunnen we uit het diagram ook onmiddellijk de spanning aflezen die op een weerstand moet worden gezet om een bepaald vermogen te krijgen.

Hoe hoog moet b.v. de spanning zijn opdat een $100\ \Omega$ -weerstand precies $250\ \text{mW}$ aan warmte afgeeft?

Welke spanning moet er op een element met een weerstand van $33\ \Omega$ staan om datzelfde vermogen van $250\ \text{mW}$ te verbruiken en als warmte weer af te geven.

En onder welke voorwaarden kunnen we daarvoor een $470\ \Omega$ -weerstand gebruiken?

Noteer de verkregen resultaten in tabel 3.8.

3.8

R in Ω	P in mW	U in V
33	250	
100	250	
470	250	

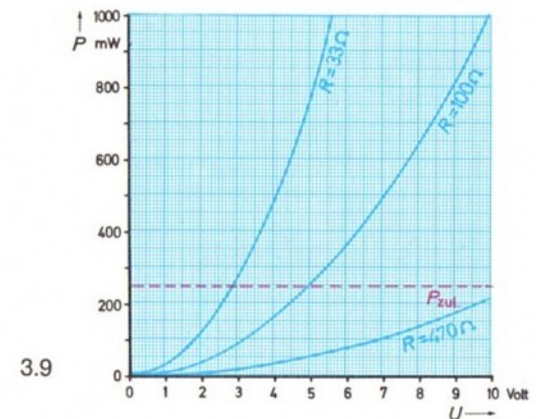
3.6 De maximale belasting

3.6.1 Berekening van de toelaatbare spanning

We weten: hoe groter het elektrisch vermogen van een onderdeel hoe meer warmte er ontstaat. Als het onderdeel groot genoeg is zodat de opgewekte warmte gemakkelijk afgegeven kan worden, dan is er niets aan de hand. Maar als het klein is en er teveel warmte ontstaat, dan brandt het door.

Voor elk onderdeel is er een grenswaarde waarboven het niet mag worden verwarmd. We gaan nu eerst eens kijken hoe een weerstand zich gedraagt bij permanente belasting.

De warmte ontstaat door omzetting van elektrische energie. Het elektrisch vermogen dat bij konstante belasting kan worden afgenomen, is begrensd. Deze grens noemen we de maximale belasting. De weerstanden van hobbylabor mogen niet zwaarder belast worden dan met $0,25\ \text{W} = 250\ \text{mW}$. Een uitzondering vormen de $4,7\ \Omega$ – de $10\ \Omega$ – en de $33\ \Omega$ -weerstand, die een max. belasting hebben van $1\ \text{W}$.



In het vermogen/spanningsdiagram van fig. 3.7 kunnen we de max. toelaatbare belasting van 250 mW als een horizontale rode lijn aangeven. We krijgen dan een fig. als 3.9. Het gebied boven de rode streep is dan verboden voor de weerstanden met deze max. toelaatbare spanning. Een konsekwentie is ook dat de aan te leggen spanning niet boven een bepaalde waarde mag komen. We mogen op de weerstanden dus alleen spanningen zetten waarbij de maximale belasting niet wordt overschreden.

In formules gebruiken we voortaan P_{toe} om deze belasting aan te geven. Om een voorstelling te krijgen van de temperatuur die een onderdeel krijgt bij een afname van 0,25 W, doen we het volgende experiment.

Proef

Uit het vermogen/spanningsdiagram blijkt dat de spanning 5 V moet zijn om een 100 Ω -weerstand 0,25 W af te laten nemen.

We kunnen de waarde van 5 V ook uitrekenen. We moeten de formule voor het vermogen dan nog iets anders schrijven:

$$P = U^2 : R \quad U^2 = P \cdot R \quad U = \sqrt{P \cdot R}$$

We krijgen dan $U_{toe} = \sqrt{0,25 \text{ W} \cdot 100 \Omega} = \sqrt{25 \text{ V}^2} = 5 \text{ V}$

$$\text{Let op: } W \cdot \Omega = V \cdot A \cdot R = V \cdot \frac{V}{R} \cdot R = V^2.$$

Het lijkt wat overdreven om ook de eenheden te vermenigvuldigen. Toch is het verstandig omdat de uitkomst een directe controle geeft èn op de juistheid van de formule èn op de uitkomst.

Stel nu met de Voltmeter de transformator precies op 5 V af. Met onze vingertoppen voelen we hoe warm de weerstand wordt. Daarmee hebben we letterlijk een „fingerspitzengefühl“ gekregen hoe warm de weerstand mag worden.

We moeten nog één ding opmerken. De max. belasting van 0,25 W geldt alleen als grenswaarde wanneer de weerstand „open en bloot“ staat. Als we de weerstand inbouwen, dan kan de warmte niet weg en dan komt de max. belasting lager te liggen. Aan de andere kant kan een weerstand voor korte tijd een kleine overbelasting verdragen.

3.6.2 De vermogenshyperbool in het stroom/spanningsdiagram

Wie veel schakelingen moet berekenen, zal niet steeds met de formules willen werken. Hij geeft de voorkeur aan een diagram. Het bepalen van weerstanden kan hij b.v. doen met het stroom/spanningsdiagram van fig. 2.30 en met het vermogen/spanningsdiagram van fig. 3.9. Gemakkelijker wordt het wanneer we beide diagrammen samenvoegen. We breiden daartoe het stroom/spanningsdiagram uit. We kunnen dan uit het diagram de stroomsterkte afleiden die bij een gegeven weerstand hoort bij een bepaalde spanning, en het elektrisch vermogen dat de weerstand onder deze omstandigheden (spanning en stroom) afneemt.

De verschillende waardes zijn te schatten of met een simpele methode precies te bepalen. De exacte waarde is maar zelden belangrijk, meestal is het genoeg om te weten of bij een gekozen werkpunt (zie 2.10.4) de max. belasting niet wordt overschreden. Zolang dat niet gebeurt, is de schakeling goed wat betreft de warmteontwikkeling.

Konstruktie

Hoe construeren we nu een dergelijke „parameter“ curve voor het vermogen? Het begrip parameter duidt de grootte aan waarvoor we kunnen zeggen: „stel dat hij zo groot is, wat dan?“.

In ons voorbeeld: „stel dat $P = 250 \text{ mW}$, hoe groot zijn dan de stroomsterkte en de spanning?“ En dat kunnen we dan in het diagram aflezen.

We beginnen met de vermogensformule in een andere vorm te schrijven: $I = P : U$. Wiskundig heet dat I wordt uitgedrukt in P en U .

Nu berekenen we voor een bepaald vermogen P als parameter de stroomsterkte uit met willekeurig gekozen spanningen. Voor P nemen we 0,25 W; voor de spanningen mogen we een waarde kiezen waarmee gemakkelijk te rekenen valt.

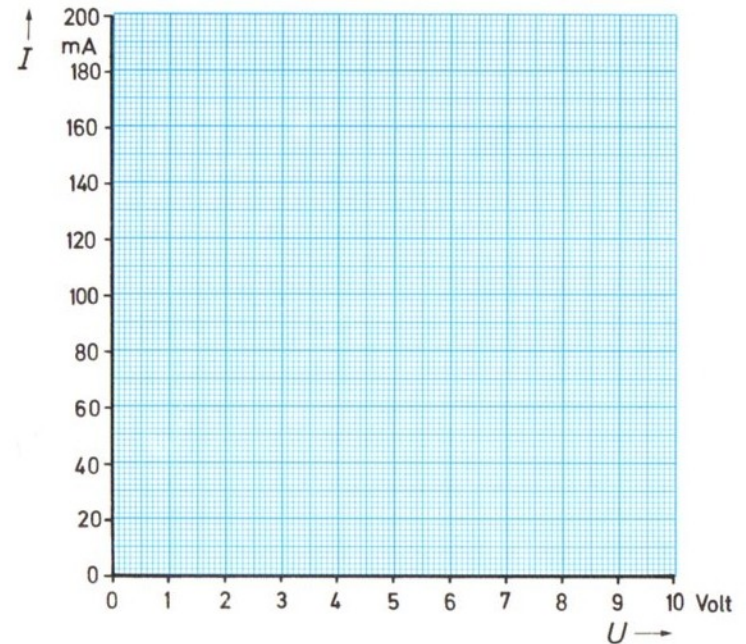
Als eerste waarde kiezen we 0,25 V. Volgens de formule is de stroomsterkte die daarbij hoort 1 A (Reken dit na, ook met de letters voor de eenheden). Nu is die keuze van 0,25 V niet zo gelukkig, want de stroomsterkte 1A komt in het stroom/spanningsdiagram niet voor – deze is te hoog. We kiezen daarom een andere spanning.

3.10

P in W	U in V	I	
		in A	in mA
0,25	1,00	0,25	250
	1,25	0,20	200
	1,67	0,15	150
	2,50	0,10	100
	3,33	0,075	75
	5,00	0,05	50
	6,00	0,04	40
	8,00	0,03	30
	10,00	0,025	25
0,50	2,50	0,20	200
	3,33	0,15	150
	5,00	0,10	100
	6,00	0,08	80
	8,00	0,06	60
	10,00	0,05	50

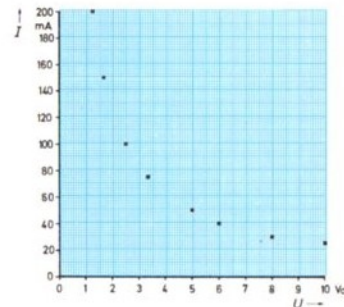
Voor 2 V krijgen we een stroomsterkte van 0,125 A. Tabel 3.10 geeft de waarde voor de spanningen van 1 tot 10 V.

Breng deze waarden nu over in het diagram 3.11 Geef de verkregen punten de letters P 1 tot P 9. Het verkregen resultaat moet overeenstemmen met fig. 3.12. Al deze punten geven stuk voor stuk het produkt $U \cdot I = 0,25 \text{ W}$ weer. Daarom mogen we ze met elkaar verbinden. We verbinden de punten natuurlijk niet met rechte lijnen. Er is geen enkele reden om te veronderstellen dat de curve juist op de willekeurig gekozen punten een knik zou maken.

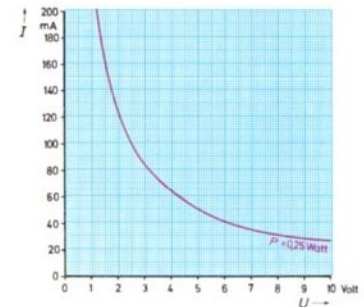


3.11

3.12



3.13



We moeten daarom een curve trekken waarin de verkregen punten precies passen. De lijn die we zo krijgen noemen we de 0,25 W-vermogenshyperbool. In fig. 3.13 is dat de rode lijn. We laten het wiskundige bewijs dat deze lijn een hyperbool is nu maar achterwege.

Alle stroomsterktes en spanningswaarden met als produkt 0,25 W moeten dus op de curve komen te liggen in het geval dat we ze in het diagram uitzetten.

Alle stroomsterktes en spanningen met een produkt groter dan 0,25 W liggen in het diagram rechts van de curve en wanneer hun produkt kleiner dan 0,25 W is, links van de curve.

Ga na of een 50 Ω -weerstand, aangesloten op een spanning van 5 V minder dan 250 mW afneemt. Bereken eerst de stroomsterkte. Bij een vermogen kleiner dan 0,25 W kunnen we een 0,25 W weerstand gebruiken. Als dat niet het geval is, zullen we een type met een hogere toelaatbare belasting moeten nemen (0,5 W-weerstand).

Bereken ook of voor een 2 k Ω -weerstand, spanning 6 V, met een stroomsterkte van . . . mA, een 0,25 W-weerstand kan worden genomen.

Teken nu zelf in diagram 3.11 naast de 0,25 W-curve, ook de 0,5 W-en de 1 W-curve.

Tabel 3.10 geeft om het wat gemakkelijker te maken, voor 0,5 W al een aantal waarden voor de stroomsterkte en de spanning. De 1 W-hyperbool mag nu geen moeilijkheden meer geven. In de drie open vakken van tabel 3.10 moeten we zelf passende waarden voor de spanning (of de stroom) invullen.

Toepassing

We kunnen nu ook voor een weerstand, waarvan de stroom- en spanningscoördinaten bekend zijn, de werkelijke vermogensafname schatten aan de hand van de hyperbolen die we in de grafiek hebben getekend. Bij voorbeeld voor het punt P_x – blauw – met de coördinaten 4 V en 90 mA.

Voorbeeld:

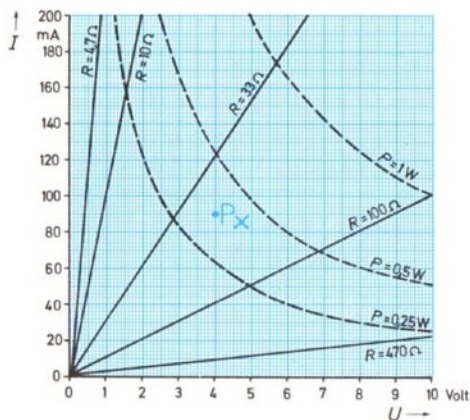
Het blauw getekende punt ligt tamelijk precies tussen de 0,25 W- en de 0,5 W-hyperbool. Het vermogen dat de weerstand afneemt zal daarom ongeveer 0,37 W zijn. Welke uitkomst geeft de berekening?

Welk elektrisch vermogen hoort bij een weerstand waar een stroom doorheen loopt van 14 mA bij een spanning van 7 V? Maak eerst een schatting en voer daarna de berekening uit. In het stroom/spanningsdiagram 3.11 met de vermogenscurven voor $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ en 1 W zetten we nu ook nog de weerstandsrechten voor 4,7 Ω – 10 Ω – 33 Ω – 470 Ω – 100 Ω uit. Het konstrueren van een weerstandsrechte is reeds in hoofdstuk 2.10 besproken. Uw resultaten moeten gelijk zijn aan figuur 3.14.

Met enige oefening kunnen we uit het volledige diagram snel aflezen of we op een weerstand met een max. toelaatbare belasting van 0,25 W een gekozen spanning mogen zetten. Als dat niet het geval is, dan moeten we een weerstand met een hogere belasting nemen of een lagere spanning aanleggen.

Vraag:

Op welke spanning kunnen we de 47 Ω -, de 10 Ω of de 33 Ω -weerstand ten hoogste aansluiten zonder de max. belasting van 1 W te overschrijden?



3.14

We hebben het stroomsterkte/spanningsdiagram met verschillende weerstandsrechten en vermogenshyperbolen nogal uitgebreid behandeld. De reden is dat we dergelijke grafieken steeds weer in de elektronika tegenkomen. Bij halfgeleiders, zoals diodes en transistors, zijn de grafieken meestal geen rechte lijnen of hyperbolen en maken de gekompliceerde verbanden het moeilijk om de coördinaten-en daarmee de curven – wiskundig te berekenen. In dergelijke gevallen wil men graag de grafische voorstelling gebruiken. Het stroomsterkte/spanningsdiagram met zijn weerstandsrechten en vermogenshyperbolen biedt een goede inleiding tot deze methode.

4 Weerstanden in serie geschakeld

We hebben met behulp van eenvoudige schakelingen het verband onderzocht tussen de drie belangrijkste elektrische grootheden. Dat verband is vastgelegd in de Wet van Ohm en de vermogensvergelijkingen.

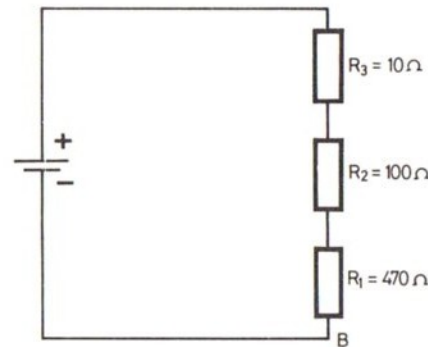
Nu bestaat een grotere schakeling uit vele onderdelen; de natuurkundige Robert Kirchhoff (1824–1887) heeft hun samenspel vastgelegd in een wiskundige vorm. We gaan de belangrijkste punten van zijn wetten voor de serieschakeling bespreken en we doen dat aan de hand van een aantal eenvoudige proeven.

4.1 Algemeen

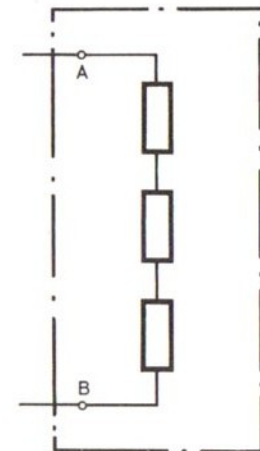
Zoals we weten noemen we achter elkaar geschakelde weerstanden een serieschakeling. Daar gaan we mee beginnen; de serieschakeling wordt veel toegepast, vooral in de elektronika. Omdat het gebied zo groot is, verdelen we het in kleine stukjes.

In fig. 4.1 zien we een stroomkring die uit 3 passieve onderdelen bestaat en uit één actief onderdeel: de batterij (of de trafo). De passieve onderdelen zijn de drie weerstanden.

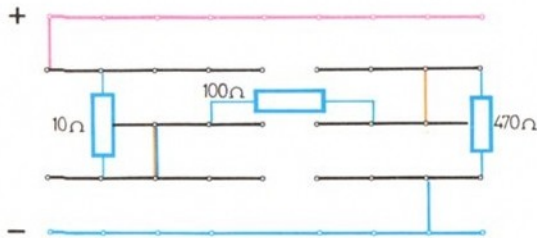
Hoe moeten we een dergelijke schakeling nu bekijken? Aan de energiebron is eigenlijk niets te zien dan dat het een kastje is. Een black box (zwarte doos) noemen ze dat in het Engels. Er zitten twee aansluitingen aan, zie fig. 4.2. We spreken daarom van een tweepool.



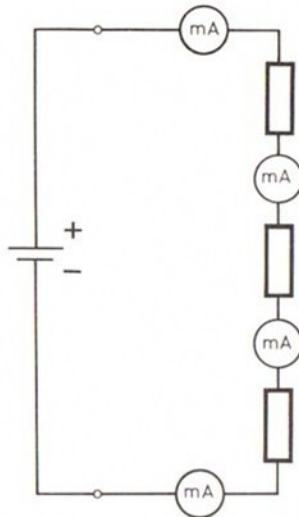
4.1



4.2



4.3



4.4

In een serieschakeling is de stroomsterkte op alle punten in de stroomkring even groot.

Bij de beschouwing van de energiebron interesseert ons op dit moment maar één ding: hoeveel stroom gaat er op het ene aansluitpunt de schakeling in en hoeveel komt er via het andere aansluitpunt weer uit. Een belangrijk punt is dat daarbij geen stroom verloren kan gaan. In feite heeft onze serieschakeling vanuit dit gezichtspunt niets nieuws te bieden.

We kunnen met de al bekende methode de stroomsterkte en de spanning meten, en daaruit de weerstand en het energieverbruik van de totale „black box“ berekenen.

Maar laten we het inwendige van een „black box“ eens wat nader bekijken, en wel één waarvan we weten dat er een serieschakeling van weerstanden in zit.

4.2 De stroom in een serieschakeling

Proef

Bouw de schakeling van fig. 4.1. Eén van de mogelijkheden zien we in fig. 4.3. De vraag is of de stroomsterkte op de verschillende punten voor en achter de weerstanden R_1 , R_2 en R_3 overal even groot is. Dat is inderdaad het geval en wie daar niet heilig van overtuigd is, kan dat op de in fig. 4.4 aangegeven punten met de ampèremeter controleren.

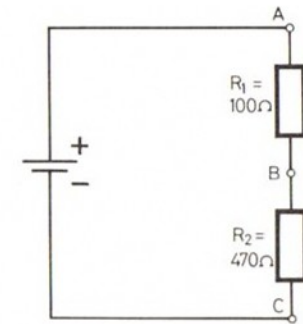
Daartoe zijn in fig. 4.3 al 4 bruggetjes aangegeven op de punten waar de meter in de schakeling moet worden opgenomen.

Resultaat

de stroomsterkte is in alle weerstanden even groot.

4.3 Deelspanningen en totale spanning

Om de verdere experimenten niet onnodig ingewikkeld te maken, verwijderen we de kleinste weerstand uit de schakeling. We krijgen dan fig. 4.5. En wat voor drie weerstanden geldt, zal in principe ook voor twee weerstanden gelden. Deze basisregel voor het vereenvoudigen kunnen we bij het experimenteren en onderzoeken van ingewikkelde samenhangen steeds weer toepassen.



4.5

Proef

We sluiten de schakeling aan op de energiebron en meten de spanning op de ingang, het punt A. We krijgen dan de batterij – of de trafospanning, die we met de letter U aangeven. De waarde noteren we in tabel 4.6.

In een serieschakeling kunnen we echter ook nog andere spanningen meten. De voltmeter slaat ook uit als we hem op de punten A en B zetten, die aan de uiteinden van de 100 Ω-weerstanden liggen.

De waarden noteren we weer in tabel 4.6.

Let tevens op waar we de minpool van de spanningsmeter moesten aanleggen om de wijzer naar rechts te doen uitslaan. Bepaal nu de spanning tussen de punten B en C. Ook hier is weer belangrijk op welk punt de minpool van de spanningsmeter moet worden aangesloten.

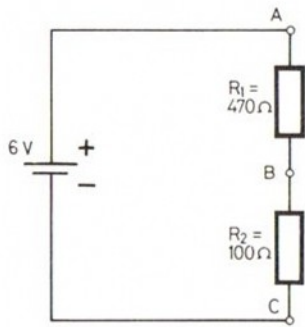
De beide laatst gemeten spanningen heten „deelspanningen“. In de techniek spreekt men van: dat er tussen twee punten in een schakeling een spanning heerst of staat, of een spanningsval optreedt.

We herhalen de metingen met een andere spanning van de energiebron, b.v. 3 of 6 V. De gemeten waarden noteren we in tabel 4.6

4.6

proefnr	Spanningen		minpool voltmeter op punt	Som van de deelspanningen $U_1 + U_2$ in V	
	totaal tus- sen A-C $= U$ in V	deelspanningen			
		tussen A-B = U_1 in V			tussen B-C $= U_2$ in V

$$R_1 = 470 \Omega; R_2 = 100 \Omega$$

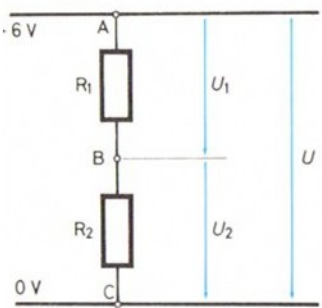


4.7

4.8

proefnr	Spanningen		minpool voltmeter op punt	Som van de deelspanningen $U_1 + U_2$ in V	
	totaal tus- sen A-C $= U$ in V	deelspanningen			
		tussen A-B $= U_1$ in V			tussen B-C $= U_2$ in V

$R_1 = 100 \Omega$; $R_2 = 470 \Omega$



4.9

We verwisselen de beide weerstanden nu van plaats. De bovenste op de plaats van de onderste en de onderste op de plaats van de bovenste, zie fig. 4.7. We herhalen de metingen en noteren de uitkomsten in tabel 4.8.

Resultaat

Wanneer we de resultaten vergelijken (tabel 4.6 en 4.8) dan zien we dat de grootste deelspanning steeds hoort bij de weerstand met de hoogste waarde. We komen hierop nog terug in hoofdstuk 4.5.

We tekenen de schakeling nu zonder energiebron, zoals in fig. 4.9. De spanning op de uiteinden van weerstand R_1 gemeten, kortweg op R_1 zeggen we voortaan, geven we aan met U_1 . Voor de meting moeten we de minpool van de voltmeter op punt B zetten. De spanning op R_2 zullen we U_2 noemen. Om die te meten moet de minpool van de meter aan C komen te liggen. Al deze gegevens staan ook in fig. 4.9. De drie genoemde spanningen zijn met pijlen aangegeven en de spits van de pijl wijst steeds naar het punt waar we de minpool van de spanningsmeter op moeten aansluiten.

In fig. 4.9 zijn de plus- en de minleiding ook anders aangegeven dan we gewend waren. Bij de leiding waarop de minpool van de batterij moet komen, staat nu 0 volt. De leiding waarop we de pluspool aansluiten is nu aangegeven met + 6 V.

Wie met batterijen van 4,5 V werkt, moet die waarde van 4,5 V er bij noteren en wie een trafo heeft, een andere waarde tot max. 9 V, al naar de instelling van de knop. We houden hier een gemiddelde waarde aan van 6 V.

Deze misschien nieuwe voorstelling van zaken geeft precies dezelfde situatie weer als in fig. 4.7!

Het is gemakkelijk te begrijpen dat de deelspanningen tezamen niet kleiner, maar ook niet groter kunnen zijn dan de totaal aangelegde spanning. Net zomin als stroom onderweg kan verdwijnen, zo kan ook spanning niet plotseling zoekraken.

Een en ander is gemakkelijk na te gaan door in tabel 4.6 en 4.8 de som van de deelspanningen te bepalen en die in de rechterkolom van de resp. tabellen te noteren.

De som van de deelspanningen is gelijk aan de totaalspanning, zoals we de spanning tussen de aansluitingen A en C noemen. Eerder spraken we van aangelegde spanning. Mocht de som van U_1 en U_2 niet precies gelijk zijn aan de totaalspanning U , dan is dit terug te voeren op onnauwkeurigheden van de voltmeter en op afleesfouten.

In een formule schrijven we het verkregen resultaat als:

$$U = U_1 + U_2$$

4.4 De totale weerstand

Hoe groot zou de totale weerstand kunnen zijn van de beide in serie geschakelde deelweerstand van 470Ω en 100Ω ?

Het antwoord is vrij eenvoudig, we denken het einde van de ene weerstand onmiddellijk tegen het begin van de volgende aan liggend, zoals in fig. 4.10 is getekend.

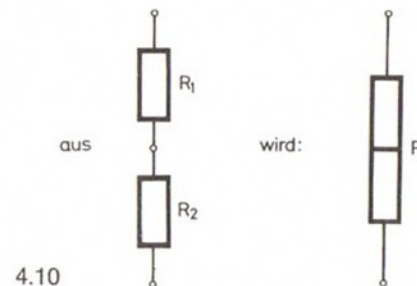
De totaalweerstand R is de som van de deelweerstand R_1 en R_2 . In formule:

$$R = R_1 + R_2$$

Proef

Ga één en ander na met een proefopstelling. Zet twee weerstanden waarvan we de waarde bij benadering kennen, in serie.

In een serieschakeling is de som van de deelspanningen gelijk aan de aangelegde totaalspanning.



De totaalweerstand in een serieschakeling is gelijk aan de som van de deelweerstand.

Er geldt:

$$U = U_1 + U_2$$

en

$$I = I_1 = I_2$$

Volgens de Wet van Ohm is

$$U = I \cdot R \text{ en } U_1 = I \cdot R_1$$

$$\text{en } U_2 = I \cdot R_2$$

De eerste vergelijking ($U = U_1 + U_2$)
schrijven we nu:

$$I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 = I (R_1 + R_2).$$

Beide leden van de vergelijking delen we
door I en we krijgen:

$$R = R_1 + R_2.$$

We meten de aangelegde totaalspanning en de stroomsterkte I in de hele schakeling. Reken daarna met de Wet van Ohm de totale weerstand uit. Ga ook alle vier de combinaties na die mogelijk zijn met de twee weerstanden van resp. 100Ω en 470Ω .

Ontwerp een tabel om de meetresultaten en de berekende waarden in te noteren. Voor de wiskundig geïnteresseerden is hiernaast de afleiding gegeven voor de totale weerstand in een serieschakeling.

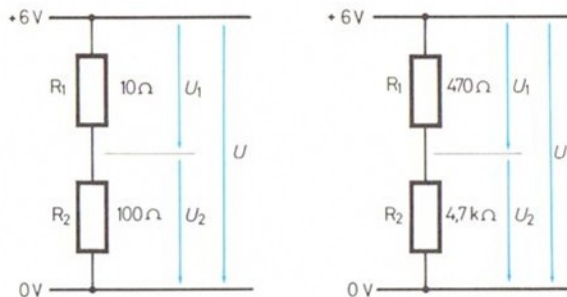
4.5 De verhouding tussen deelspanningen en deelweerstand

We gaan nu enige experimenten doen om er achter te komen hoe de verhouding tussen deelspanningen en deelweerstand ligt.

Experiment

In fig. 4.11 zien we twee serieschakelingen waarvan we de spanningen U , U_1 en U_2 meten. Die meetwaarden noteren we in de tabel 4.12. Daarna bepalen we voor elke proef de verhouding $U_1 : U_2$ tussen de deelspanningen en de verhouding $R_1 : R_2$ tussen de weerstanden. De resultaten komen weer in de tabel.

We berekenen eveneens de verhouding tussen de deelspanning U_1 en de totaalspanning U , resp. tussen de deelweerstand R_1 en de totaalweerstand R . En tenslotte bepalen we dezelfde verhoudingen voor de tweede deelspanning en de totaalspanning.



4.11

Resultaat

De metingen moeten bij benadering aan het volgende voldoen:

1. de verhouding tussen twee deelspanningen is gelijk aan de verhouding tussen de bijbehorende weerstanden.
2. hoe groot de weerstanden zelf zijn doet er niet toe, alleen hun verhouding is bepalend! In beide experimenten is de verhouding 1:10.
3. deelspanning en totaalspanning verhouden zich als de deelweerstand en de totaalweerstand. In onze voorbeelden steeds 1:11.

In een formule zien de resultaten er zo uit:

$$U : U_1 : U_2 = R : R_1 : R_2$$

4.6 Drie en meer weerstanden in serie

Principieel kunnen we niets nieuws verwachten als we niet twee maar drie of nog meer weerstanden in serie schakelen. De totaalweerstand R van een serieschakeling met willekeurig veel weerstanden R_1, R_2, R_3 enz. is de som van de aparte weerstandswaarden. De formule van de totale weerstand voor een willekeurig aantal in serie geschakelde weerstanden luidt:

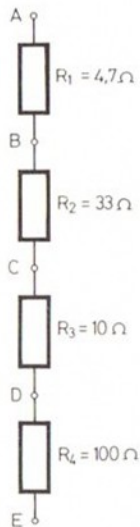
$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots$$

Als we dus drie weerstanden in serie hebben geschakeld, dan houdt de formule bij R_3 op.

4.12

Proef	1	2
R_1 in Ω R_2 in Ω R in Ω berekend	10 100	470 4700
U_1 in V U_2 in V		
U in V berekend gemeten		
$U_1 : U_2$ $R_1 : R_2$		
$U_1 : U$ $R_1 : R$		
$U_2 : U$ $R_2 : R$		

In een serieschakeling is de verhouding tussen de deelspanningen gelijk aan die tussen de deelweerstand – en de verhouding tussen deelspanningen en totaalspanning gelijk aan die tussen de deelweerstand en de totale weerstand.



4.13

De totaalspanning bestaat dus uit even zoveel delen als er weerstanden in serie staan geschakeld. De formules voor willekeurig veel deelspanningen schrijven we zo:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + \dots$$

Hebben we drie weerstanden dan eindigt de formule bij U_3 .

De stroom die door de weerstanden loopt, kunnen we met behulp van de Wet van Ohm berekenen uit de aangelegde totaalspanning U en de totale weerstand.

Wanneer het om de verhouding van alle of enkele deelspanningen tot elkaar gaat of om de verhouding tussen één deelspanning tot de totaalspanning, dan gebruiken we de formule:

$$U : U_1 : U_2 : U_3 : U_4 \dots = R : R_1 : R_2 : R_3 : R_4 .$$

Vragen:

Enige voorbeelden. Bereken eerst de totale weerstand R van de serieschakeling in fig. 4.13. Hoe groot is de deelspanning U_3 behorend bij $R_3 = 10\Omega$ (tussen C en D) wanneer tussen A en E een spanning heerst van 6 V. Hoe groot is de stroomsterkte in weerstand R_2 en hoeveel in R_4 . Hoe groot is de stroomsterkte in de draad die van de trafo of batterij naar en van de aansluitingen A en E loopt?

Op welke punten moeten we de voltmeter aansluiten om de deelspanning U_3 te meten?

Kontroleer de rekenuitkomsten door overeenkomstige metingen.

Bepaal de verhouding tussen de deelspanning U_1 en totaalspanning, eerst met een berekening en daarna met een meting. Geldt deze verhouding ook als we een hogere spanning aanleggen?

De antwoorden staan in het aanhangsel.

4.7 Elektrisch potentiaal en potentiaalverschil

Proef

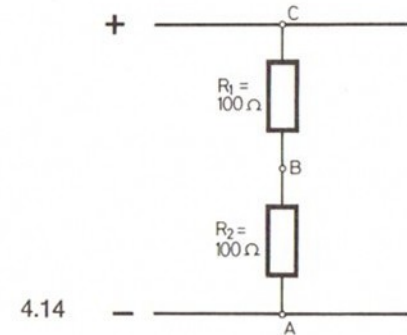
We bouwen de schakeling volgens figuur 4.14. We hoeven geen aparte maatregelen te nemen – bruggetjes opzetten – omdat we de stroomsterkte niet hoeven te meten. De batterij of de trafo sluiten we zo aan, dat de pluspool is verbonden met de +stroomstrip van het MultiSchakelPaneel (MSP). Bij de meting van de totaalspanning moeten we dan de min-aansluiting van de spanningsmeter met de min-stroomstrip (punt A) van het MSP verbinden.

We meten allereerst de totaalspanning, dat is de spanning tussen de punten A en C. Het resultaat noteren we in tabel 4.15. Daarna meten we de deelspanningen tussen resp. B en C en A en B.

Vraag: is het u opgevallen dat bij de meting van U_{A-B} de min-aansluiting van de voltmeter nu op het punt A moet worden aangesloten en niet zoals bij de voorgaande meting op B?

Wanneer u dat inderdaad heeft opgemerkt, dan hebt u het belangrijkste onderwerp van het nu volgende al begrepen. Hoewel u nu niet gauw de volgende pagina's moet overslaan. De volgende beschouwing bespreekt namelijk essentiële punten die voor het begrijpen van logische schakelingen nodig zijn.

Laten we de elektrische betrekkingen tussen de punten A–B–C eens nader beschouwen. Voor het meten van de spanning U_{B-C} moeten we de min-aansluiting van de spanningsmeter op punt B zetten. Meten we daarentegen U_{B-A} (of U_{A-B}) dan moet de plus-aansluiting op B komen, omdat de min-aansluiting nu op A dient te komen wanneer de wijzer naar rechts moet uitslaan.



4.15

U_{A-C} in V	U_{B-C} in V	U_{B-A} in V

Ter verklaring daarvan worden in de elektronica de begrippen potentiaal en potentiaalverschil gebruikt.

Geheel willekeurig, maar voor het beschrijven van de schakeling doelmatig, bepalen we een nulpunt, het nulpotentiaal. Het is zeggend het uitgangspunt van onze beschouwingen en enigszins te vergelijken met de evenaar op de landkaart. Voor de meeste schakelingen mogen we of de min-strip of de plus-strip als het punt kiezen dat nulpotentiaal voert. Het woord potentiaal komt van het Latijnse „potesse“ en betekent: kunnen of vermogen, vergelijk ook ons woord potentie.

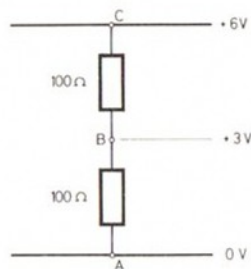
Als nulpunt kiezen we de min-strip en we schrijven daar 0 volt bij, zie fig. 4.16. We hebben een spanningsbron van 6 V, bij de plus-strip schrijven we dan „+ 6 V“. Die + 6 V gelden t.o.v. ons nulpunt. Laten we het punt C eens bekijken. Op de plus-strip staat + 6 V, het potentiaal is dan positief ten opzichte van punt A met het potentiaal 0 volt.

Heel algemeen kunnen we zeggen dat het meetpunt waarop we de plus-aansluiting van de voltmeter moeten schakelen een positief potentiaal moet hebben ten opzichte van het punt waarop de min-aansluiting komt. We mogen daarom ook zeggen – zie 4.16 – dat het punt A een negatief potentiaal voert t.o.v. punt C. In de praktijk zeggen we „het punt A is negatiever dan punt C“ of „A is negatiever dan C“.

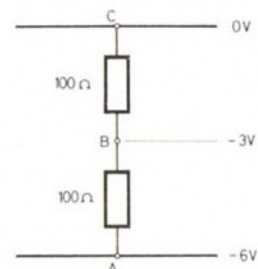
In het voorbeeld is het verschil tussen beide potentialen, het potentiaalverschil, precies 6 V. Het woordt potentiaal-verschil is in feite een ander woord voor het begrip spanning. Het punt C heeft in ons voorbeeld ook een hoger positief potentiaal dan het punt B, dat zelf t.o.v. de nulstrip weer een pluspotentiaal van 3 V heeft.

We kunnen zeggen dat punt C positiever is dan punt B of dat B negatiever is dan C.

Het potentiaalverschil tussen C en B bedraagt $+ 6 \text{ V} - (+ 3 \text{ V}) = 3 \text{ V}$. Het punt B ligt dus wat zijn potentiaal betreft tussen het punt A en C. Het punt B heeft t.o.v. punt A een positief potentiaal,



4.16



4.17

daarentegen t.o.v. punt C een negatief potentiaal! Dit is belangrijk voor het vervolg waarin we steeds weer op dit soort potentiaalproblemen zullen stuiten.

De potentiaalverschillen – de spanningen – tussen de punten A en B en de punten B en C bedragen elk precies 3 V.

Dat we de min-strip het potentiaal nul hebben gegeven, is een willekeurige keuze. We mogen evengoed aan de plus-strip het potentiaal 0 toekennen.

(Fig. 4.17) Daaruit volgt automatisch dat de min-strip nu het potentiaal -6 V krijgt en het punt B het potentiaal -3 V . Het potentiaalverschil zelf verandert niet:

$$0 - (-3 \text{ V}) = + 3 \text{ V} \text{ en}$$

$$- 3 \text{ V} - (-6 \text{ V}) = - 3 \text{ V} + 6 \text{ V} = + 3 \text{ V}!$$

We kunnen nog anders redeneren. In figuur 4.18 geven we punt B het potentiaal 0. De plus-strip heeft dan een potentiaal van +3 V en de min-strip heeft -3 V. Ook nu is het potentiaalverschil tussen plus- en min-strip weer +6 V.

Kijk maar:

$$+3 \text{ V} - (-3 \text{ V}) = +3 \text{ V} + 3 \text{ V} = 6 \text{ V}.$$

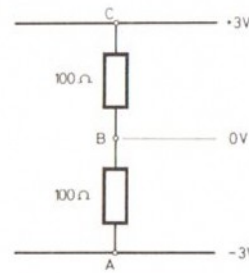
Er blijkt uit dat we de zaak van vele kanten kunnen bekijken en beredeneren, zonder met het uitgangspunt: een potentiaalverschil tussen C en A van 6 V in strijd te komen.

Al naar dat doelmatig is, mogen we dus de ene benadering of de andere kiezen. Maar niet tegelijk in één beschouwing. Toegegeven, het lijkt een beetje lastig, de laatste redenering doet erg theoretisch aan, maar in het vervolg blijkt al heel snel dat potentialen in de elektronika een belangrijke rol spelen. En wie de theorie van de potentialen niet onder de knie heeft, zal al gauw struikelen. Daarom volgen er nog enkele voorbeelden om de uitgangspunten goed in ons hoofd te prenten.

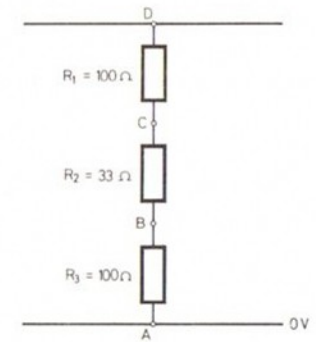
Proef

We schakelen drie weerstanden in serie en meten de potentialen die op de verschillende punten A-B-C-D liggen. Figuur 4.19 laat het principe zien. De min-strip nemen we als nulpunt in de schakeling en deze voert dus het nulpotentiaal.

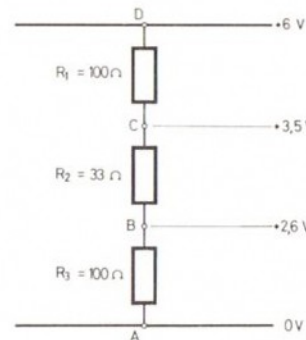
We meten nu de spanning tussen alle combinaties van twee aansluitpunten en noteren de gevonden waarden in een tabelletje. In totaal zijn er zes combinaties te maken. Om alle potentiaalverschillen te kunnen bepalen hoeven we maar drie metingen te doen, de andere dienen alleen ter controle. Om uw eigen bevindingen te kunnen vergelijken met fig. 4.20 moet de totale spanning ongeveer 6 V zijn. Met de trafo is deze spanning bij benadering in te stellen, met 4 staafbatterijtjes lukt het ook.



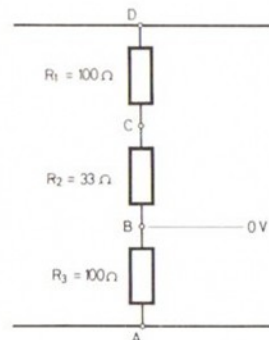
4.18



4.19



4.20



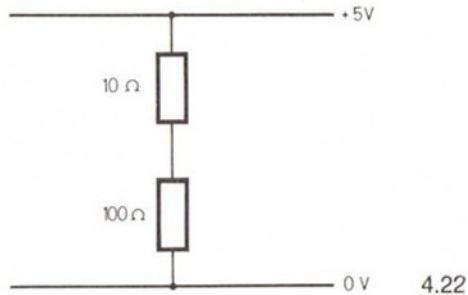
4.21

Noteer de gevonden potentialen ook in fig. 4.19.

Vraag

Welke waarden krijgen we als we de 33 Ω-weerstand vervangen door een 470 Ω-weerstand en punt C als nulpotentiaal nemen?

4.8 De verdeling van het vermogen in een serieschakeling



In een serieschakeling is het totale vermogen gelijk aan de som van de deelvermogens die de weerstanden elk apart afnemen.

In een serieschakeling zijn de deelvermogens die de verschillende weerstanden afnemen recht evenredig aan de waarden van de weerstanden.

Vraag

hoe groot zijn het totaalvermogen en de deelvermogens in een serieschakeling van $100\ \Omega - 10\ \Omega - 33\ \Omega$, waarop een spanning van $7\ \text{V}$ staat? Is deze schakeling te gebruiken als we alleen over $250\ \text{mW}$ weerstanden beschikken? En hoe zit dat als we er $9\ \text{V}$ op zetten?

Proef

We zetten, volgens fig. 4.22, een lage weerstand van b.v. $10\ \Omega$ in serie met de veel hogere weerstand van $100\ \Omega$ en sluiten de schakeling aan op een spanningsbron van $5\ \text{V}$. Welke van de weerstanden wordt nu warmer, de laagohmige of de hoogohmige?

We weten dat als de weerstanden elk apart aangesloten worden, de $100\ \Omega$ -weerstand handwarm wordt, terwijl de $10\ \Omega$ -weerstand bij konstant gebruik na korte tijd door oververhitting stuk gaat.

Resultaat

Alleen de beginner zal tot z'n verrassing ontdekken dat de $10\ \Omega$ -weerstand helemaal niet warm wordt. 't Is wel logisch, want er staat op die weerstand maar een spanning van ongeveer $0,5\ \text{V}$. Zo'n 90% van de totale spanning staat op de $100\ \Omega$ -weerstand.

Bereken en meet nu de stroomsterkte in de stroomkring en bepaal het elektrische vermogen in watt dat elke weerstand afneemt.

Stel dat niet punt A maar punt B een nulpotentiaal voert. Noteer de gevonden waarden in fig. 4.21.

Interessant is de algemeen geldige formule waarmee we de vermogensafname kunnen bepalen van verschillende weerstanden. Het deelvermogen P_1 verkrijgen we uit $U_1 \cdot I$ en P_2 uit $U_2 \cdot I$. Daaruit volgt dat de verhouding tussen de deelvermogens gelijk is aan de verhouding tussen de deelspanningen. Hetzelfde geldt voor de verhouding tussen elk deelvermogen en het totale vermogen. Omdat nu de deelspanningen zich verhouden als de bijbehorende weerstanden, mogen we schrijven:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

en

$$P : P_1 : P_2 : P_3 : \dots = R : R_1 : R_2 : R_3 \dots$$

4.9 Toepassingen van de serieschakeling

4.9.1 Samenvoegen van weerstanden

Wanneer we een weerstand nodig hebben met een waarde die niet voorradig is, dan kunnen we de waarde verkrijgen door een aantal weerstanden samen te voegen, beter gezegd in serie te zetten. Zo kunnen we met de weerstanden van hobbylabor een weerstand van ongeveer $150\ \Omega$ verkrijgen door de volgende weerstanden in serie te schakelen: $100\ \Omega + 33\ \Omega + 10\ \Omega + 4,7\ \Omega$. Meet een en ander na! Het resultaat zal niet precies $147,7\ \Omega$ zijn. De precisie van de meter is niet zo groot en bovendien hebben de weerstanden een tolerantie van $\pm 5\%$.

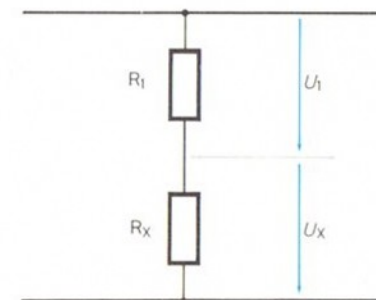
Als we een weerstand moeten hebben met een zeer preciese waarde dan neemt men normale weerstanden met een tolerantie van 5 of 10% en wordt de afwijking van de serieschakeling opgeheven met een kleine instelbare weerstand (een trimmer).

Hoe kunnen we een weerstand krijgen van ongeveer $1,5\ \text{k}\Omega$ met de hobbylabor weerstanden? En hoe een weerstand van ongeveer $15\ \text{k}\Omega$?

4.9.2 Bepaling van de weerstandswaarde

Het eenvoudigst bepalen we de weerstand door U en I te meten en dan de Wet van Ohm toe te passen. Anders wordt het wanneer we geen goede of juiste meter hebben of wanneer we een schakeling niet willen onderbreken om de meter er tussen te zetten. In dat geval werken we met de schakeling van fig. 4.23, een serieschakeling met de onbekende weerstand R_x en de bekende weerstand R_1 .

Weerstanden in serie geschakeld geven een hogere weerstand



4.23

De formule die we moeten gebruiken is bekend en luidt:

$$R_1 : R_x = U_1 : U_x.$$

We meten nu de deelspanningen – waarvoor we de schakeling niet hoeven te onderbreken – op de weerstanden. De gemeten waarden gaan in de volgende formule:

$$R_x = R_1 \frac{U_x}{U_1}$$

Proef

Bepaal nu eens de weerstand van de spoel in de hobbylabordoes. De bepaling doen we twee keer, want dan krijgen we een betere waarde. Voor de eerste meting nemen we een willekeurige weerstand als R_1 , b.v. de 470Ω -weerstand. De tweede meting doen we met een weerstand die om en nabij onze berekende waarde ligt. Hebben we b.v. 92Ω berekend aan de hand van de eerste meetresultaten dan doen we de tweede meting met een 100Ω weerstand als R_1 . We bereiken daarmee dat meetfouten van de spanningsmeter worden opgeheven.

Deze methode is bijzonder handig omdat de meting onafhankelijk is van de spanningshoogte en een meting van de stroomsterkte wordt vermeden. Anders gezegd, we hoeven niets los te maken of te veranderen in de bedrading van een schakeling.

4.9.3 Metingen van gloeilampen

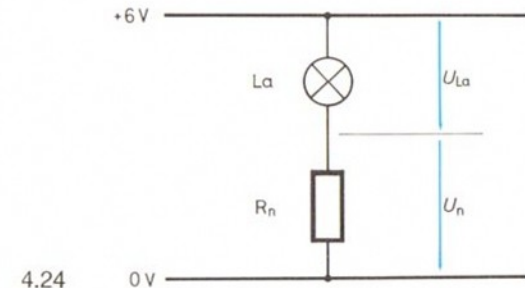
We gaan met bovenstaande methode nu de weerstand bepalen van een gloeilampje. Volgens de fabrikant „trekt“ het lampje bij 6 V. een stroom van 50 mA. Stroom trekken is een zeer beeldende uitdrukking die aangeeft hoe de elektronen door de pluspool worden aangetrokken.

Het lampje moet een weerstand R_{La} hebben van $6 \text{ V} : 0,05 \text{ A} = 120 \Omega$. Nu is dat niet meer dan een richtwaarde, lampjes willen daar nog wel eens iets van afwijken, ze worden in massa gemaakt.

We gaan nu onderzoeken of de weerstand van het lampje verandert wanneer we er verschillende spanningen op aansluiten.

Proef

Fig. 4.24 laat het stroomschema zien voor de proef. De resultaten noteren we in tabel 4.25.



4.25

R_n in Ω	U_{La} in V	U_n in V	$U_{La} : U_n$	R_{La} in Ω
470				
200				
143				
100				
43				
10				

De index „n“ bij de letter R geeft aan dat we verschillende bekende weerstanden gaan gebruiken. Ze staan in kolom 1 van tabel 4.25. U weet dat u tussenliggende waarden kunt verkrijgen door weerstanden in serie te schakelen.

De gemeten deelspanningen $U_{l\alpha}$ en U_n noteren we in kolom 2 en 3 in kolom 4 komt het quotiënt van $U_{l\alpha} : U_n$. Dit quotiënt vermenigvuldigen we met de betreffende weerstandswaarde, waarna we het resultaat in kolom 5 zetten. Probeer een diagram te tekenen van de weerstand R in afhankelijkheid van de spanning U .

Resultaat

Het resultaat is nogal verbluffend. We vinden geen konstante waarde voor de weerstand, maar wat blijkt? De weerstand van de lamp wordt hoger als de spanning stijgt.

Konklusie

Het lijkt er op alsof de weerstand van de lamp afhankelijk van de spanning is. Een konklusie die voor de hand ligt, maar niet geheel juist is. De weerstand van elke gloeilamp hangt namelijk van de temperatuur af. Wat we bij onze normale weerstanden zoveel mogelijk vermijden, is bij gloeilampen juist gewenst: heet worden, stijgen in temperatuur.

De wolframdraad bereikt bij volle helderheid een temperatuur van ongeveer 2000°C . Als de glasbol niet luchtledig was, dan zou de draad onmiddellijk een verbinding aangaan met de zuurstof in de lucht. Scheikundig heet dat oxyderen en in het dagelijks spraakgebruik: verbranden!

Alle metalen hebben de eigenschap dat hun weerstand stijgt bij verwarming. Er zijn echter metaalkombinaties – legeringen – waarbij dat niet het geval is. Ook zijn er halfgeleiderstoffen waarvan de weerstand daalt bij verwarming. In hobbylabor 2 zullen we er kennis mee maken.

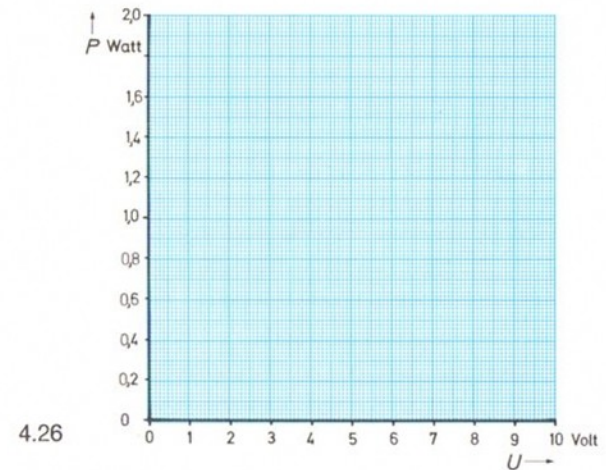
Ook de diepere samenhang tussen weerstand en temperatuur komt in dat deel aan de orde. Halfgeleiders zijn, tot groot leedwezen van de elektronici, zeer temperatuurgevoelig. Bij de experimenten met hobbylabor 1 speelt die temperatuurafhankelijkheid niet zo'n grote rol.

Ook bij een spanning van 0,2 V loopt er een stroom door het lampje maar daar is niets van te zien, het geeft geen licht. Stijgt de spanning dan wordt de wolframdraad steeds warmer, begint te gloeien (warmteontwikkeling door stroom) en straalt tenslotte een helder licht uit.

Gaan we de spanning nu nog hoger maken, dan wordt het kristalrooster van het draadje door de grote elektronenstroom verbroken, de draad smelt en breekt. Het lampje is stuk.

Hoeveel energie neemt het lampje eigenlijk af? Aan de hand van de nominale spanning en de nominale stroomsterkte is de maximaal toelaatbare belasting gemakkelijk te berekenen. Probeer een vermogen/spanningsdiagram op te zetten voor een lampje uit hobbylabor en voor de lampen uit em en hobby 3.

Fig. 4.26 geeft de grafiekindeling daarvoor.



4.9.4 Voorschakelweerstand in de spanningsmeter

Een andere term voor spanningsmeting is meting van de elektroendruk. Maar hoe doe je dat? Een bandendrukmeter is niet zo heel erg geschikt. Trouwens, we moeten de druk meten van een „bewegende“ stroom zonder dat we de sterkte van de stroom veranderen. Dat kan natuurlijk niet, elke meting grijpt in op het proces dat we willen meten. Waar het om gaat is een zo klein mogelijke verstoring. Elk meetapparaat verbruikt natuurlijk een weinig energie, er moet enig vermogen worden toegevoerd anders zou de wijzer niet kunnen uitslaan. Niets voor niets. Een heel klein beetje van de elektronenstroom waarvan we de druk willen weten, hebben we nodig om door de voltmeter te laten lopen. Of en welke invloed dat op een schakeling heeft, onderzoeken we later.

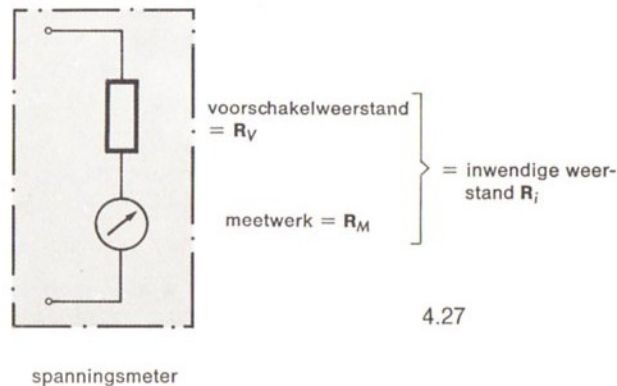
In elk geval staat vast, principieel gezien, dat de spanningsmeting een stroomsterktemeting is. Wanneer de schaalverdeling van de meter in volts wordt geïjkt, dan is de stroom die door de meter loopt een maat voor de spanning – het potentiaalverschil – die tussen de beide punten heerst waarop de meter is aangesloten. De spanningsmeter heeft een draaibaar gelagerde wijzer. Als er veel stroom loopt, dan slaat de wijzer ver naar rechts uit, loopt er weinig stroom dan is de uitslag veel minder.

In hoofdstuk 13 zullen we zien hoe de uitslag van de wijzer tot stand komt. Deze berust op de elektromagnetische werking van de stroom.

In elk geval heeft ook de meter zelf een meetbare elektrische weerstand. De meting daarvan zal als waarde tamelijk nauwkeurig 1500Ω aangeven. We noemen dat de meetweerstand met als symbool: R_M . Een „volle uitslag“ wil zeggen dat de wijzer tot de 10 uitslaat. Dat is het geval wanneer door de meter een stroom van $0,333 \text{ mA} = 333 \mu\text{A}$ vloeit.

We kunnen met de Wet van Ohm uitrekenen ($U = I \cdot R$) dat er een dergelijke stroom loopt wanneer er op het meetwerk zelf een spanning van $0,5 \text{ V}$ wordt gezet. De ft-spanningsmeter kan echter spanningen van 10 V meten. Hoe kan dat?

De oplossing is heel simpel: in serie met het meetwerk is een weerstand geschakeld, zie fig. 4.27. Het is de voorschakelweerstand R_V , zo geheten omdat hij voor het meetwerk staat.



4.27

De voorschakelweerstand zou natuurlijk even goed „nashakelweerstand“ kunnen heten, omdat het voor de stroom niets uitmaakt of hij eerst door de voorschakelweerstand moet en dan door het meetwerk, of net andersom.

Hoe groot moet de voorschakelweerstand zijn?

Er zijn methoden om dat te bepalen. Ten eerste: als door het meetwerk een stroom van $0,333 \text{ mA}$ moet lopen als de wijzer vol uitslaat, dan geldt het volgende: $U = 10 \text{ V}$ daarbij moet de totale weerstand zijn:

$$R = R_M + R_V = 10 \text{ V} : 0,000333 \text{ A} = 30\,000 \Omega = 30 \text{ k}\Omega$$

Deze weerstand R geven we aan met R_i , de inwendige weerstand die dus de som is van de voorschakelweerstand en de weerstand van het meetwerk. De waarde van de voorschakelweerstand bedraagt:

$$R_V = R - R_M = 30 \text{ k}\Omega - 1,5 \text{ k}\Omega = 28,5 \text{ k}\Omega$$

Bij de tweede methode gaan we uit van de deelspanningen. Voor de volle uitslag van de wijzer moet op het meetwerk een spanning van $0,5 \text{ V}$ staan (fig. 4.28).

(Let op: van het meetwerk zelf is slechts één aansluiting van buitenaf bereikbaar).

In fig. 4.28 is het meetwerk aangegeven met de weerstand R_M . De volle uitslag ontstaat bij 10 V en dat betekent dat op de voorschakelweerstand R_V een spanning van 9,5 V moet staan. De algemeen geldige vergelijking voor de verhouding van deelweerstand en deelspanningen luidt: $R_1 : R_2 = U_1 : U_2$.

De vergelijking lossen we op naar R_V en we substitueren (vullen in): $R_V - R_M - U_V$ en U_M :

$$R_V = R_M \cdot \frac{U_M}{U_V}$$

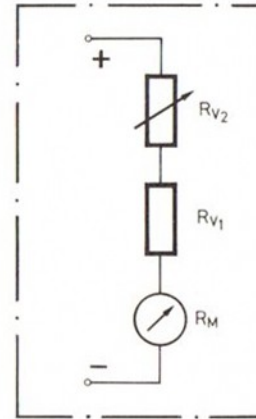
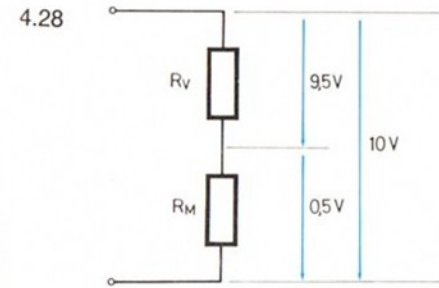
We krijgen dan $R_V = 1,5 \text{ k}\Omega \cdot \frac{9,5 \text{ V}}{0,5 \text{ V}} = 1,5 \text{ k}\Omega \cdot 19 = 28,5 \text{ k}\Omega$

In de voltmeter is de 28,5 k Ω voorschakelweerstand gesplitst in twee weerstanden (zie fig. 4.29). De reden daarvoor is dat bij de productie elk meetwerk wat betreft z'n eigen weerstand en de volle uitslag iets verschillend is. De voorschakelweerstand wordt daarom in tweeën gedeeld. De vaste weerstand R_{V1} is iets kleiner dan de berekende theoretische waarde. De waarde van de extra weerstand R_{V2} wordt bij de ijking van de voltmeter exact afgestemd (zie hoofdstuk 4.9.1). Een andere mogelijkheid is het inbouwen van een regelbare weerstand (komt later nog aan de orde) of de waarde wordt met een meting bepaald, waarna een weerstand met de juiste waarde wordt ingebouwd.

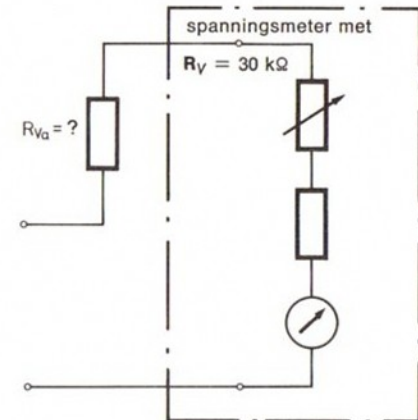
Gevoeligheid van de voltmeter

De waarde van de inwendige weerstand R_i bedraagt in onze voltmeter ca 30 k Ω bij een meetbereik van 10 V. Een spanningsmeter die bij hetzelfde meetbereik een inwendige weerstand van 10 k Ω heeft, zou tijdens de meting drie keer zoveel stroom afnemen als onze spanningsmeter. Dat zou onder bepaalde omstandigheden grotere meetfouten kunnen veroorzaken, waarover later meer. Een spanningsmeter met een 100 k Ω inwendige weerstand en een meetbereik van 10 V, zou iets minder dan een derde van de stroom gebruiken die onze voltmeter afneemt (bij dezelfde uitslag van de meter).

Om verschillende meters met elkaar te kunnen vergelijken, wordt de gevoeligheid uitgedrukt in ohm per 1 V bij volledige uitslag. Bij de ft-voltmeter met $R_i = 30 \text{ k}\Omega$ en de volle uitslag van 10 V, is de gevoeligheid 3 k Ω /V. Nog anders gezegd, als we de voltmeter willen ombouwen tot een volledige uitslag bij 1 V, dan zou de waarde van de inwendige weerstand 3 k Ω moeten zijn.



4.29



Vraag

Welke „uitwendige“ voorschakelweerstand R_{V0} (zie fig. 4.30) moeten we voor de spanningsmeter zetten om een volle uitslag te krijgen bij een spanning van 20 V?

4.9.5 De spanningsdeler

Voor vele doeleinden zijn spanningen nodig die we niet met één of meer batterijen kunnen krijgen of met de transformator. Neem b.v. een spanning van 1,0 V. Met behulp van een simpele serie-schakeling bestaande uit twee of meer weerstanden kunnen we de 4,5 V spanning van een batterij zo opdelen dat op één van de in serie geschakelde weerstanden de gewenste spanning staat. In het voorbeeld moet op deelweerstand R_1 een deelspanning U_1 van 1,0 V staan. Op de tweede deelweerstand moet dan een tweede deelspanning van 3,5 V komen.

We krijgen nu met de vergelijking:

$$R_1 : R_2 = U_1 : U_2$$

voor ons voorbeeld:

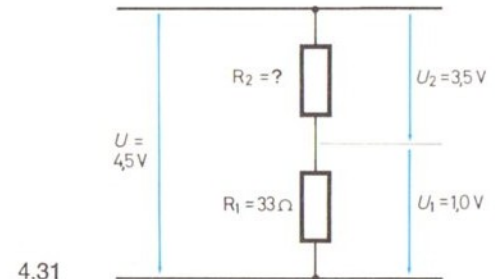
$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}$$

Proef

Kiezen we voor de weerstand R_1 volgens fig. 4.31, de 33 Ω -weerstand, dan moet $R_2 = 33 \Omega \cdot \frac{3,5 \text{ V}}{1,0 \text{ V}} = 105 \Omega$ zijn.

De hobbylabordoos heeft deze weerstand niet, de waarde verkrijgen we met de 100 Ω - en de 4,7 Ω -weerstand. Door de toleranties die voor de weerstanden gelden en de onvoldoende nauwkeurigheid van de aanwijzing op de meter, is het min of meer toeval als de voltmeter exact 1,0 V aan zou wijzen.

Meer over spanningsdelers vinden we in het tweede deel van het volgende hoofdstuk.



Vraag

Hoe moeten we de spanningsdeler maken om een spanning van 1.0 V te krijgen als we niet een batterij van 4,5 V hebben, maar een transformator die $U = 5 \text{ V}$ levert.

5 Instelbare Weerstanden en Potentiometer

Er zijn niet alleen weerstanden met vaste waarden. In elektronische schakelingen spelen ook weerstanden waarvan de waarde is in te stellen, een grote rol. Deze komen nu aan de orde.

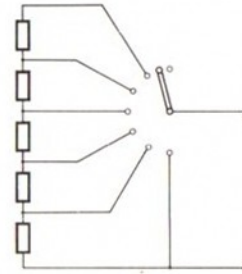
5.1 Weerstand met aftakkingen

Wellicht zult u zich bij het lezen van het vorige hoofdstuk al afgevraagd hebben of er dan geen weerstanden zijn te maken die je op verschillende waarden kunt instellen. Ze zijn er inderdaad, het zijn de instelbare weerstanden. Niet te verwarren met de regelweerstand, want die heeft een heel andere functie.

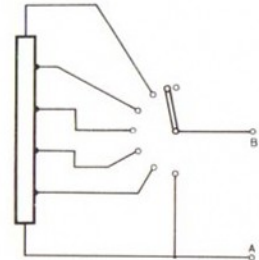
De eenvoudigste instelbare weerstand geeft fig. 5.1

Deze bestaat uit een serieschakeling van verschillende weerstanden waarvan de aansluitingspunten een draaischakelaar vormen. Al naar de stand van de schakelaar kunnen we tussen A en B een andere weerstandswaarde krijgen. Wie een ft-draaischakelaar* heeft zou een dergelijke weerstand zelf kunnen bouwen.

* Een dergelijke schakelaar is ook los bij de fisherteknik-winkelier verkrijgbaar en eveneens nuttig voor andere experimenten.



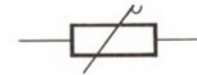
5.1



5.2



5.3



oud



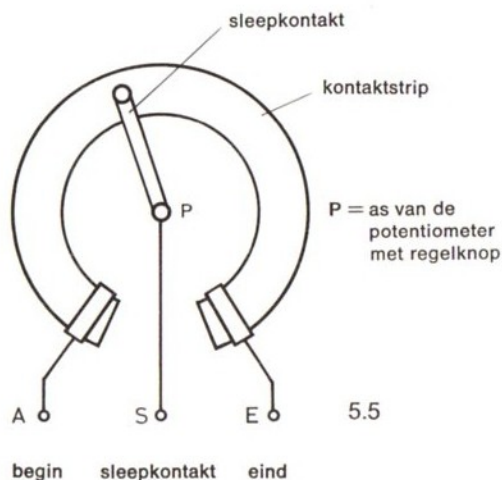
nieuw

5.4

Veel vaker wordt de uitvoering gebruikt zoals in fig. 5.2. Op een keramische staaf wordt een lange draad gewikkeld. De aftakkingen zijn metalen ringen die over het geheel zijn geschoven, zie fig. 5.3.

Het oude en het nieuwe symbool voor beide soorten instelbare weerstanden zien we in fig. 5.4. Een dergelijke weerstand is een trapsgewijs instelbare weerstand. Beide constructies zijn bijzonder geschikt voor situaties waarin grotere elektrische vermogens – al dan niet gewenst – een rol spelen.

In radio's, televisies en elektronische stuurapparatuur zijn echter traploos regelbare weerstanden nodig. Bij een radiotoestel om b.v. de geluidsterkte te regelen. Al die weerstanden berusten op het principe, weergegeven in fig. 5.5.



5.2 De potentiometer bouwsteen

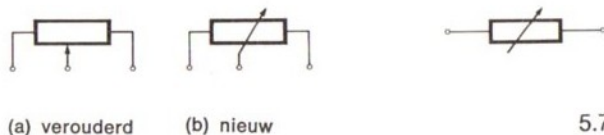
Traploze, regelbare weerstanden worden potentiometers genoemd. De technicus spreekt meestal van een potmeter. De potentiometer bouwsteen van hobbylabor heeft twee van dergelijke weerstanden. Plaats de draaiknoppen op de assen zodanig dat de knoppen naar beneden kunnen worden gedrukt. Assen en knoppen zijn zo op elkaar afgestemd dat dit alleen in één bepaalde stand mogelijk is, er kan dus niets fout gaan.

Het wijzertje van de draaiknop is nu bij elke potmeter heen en weer te draaien tussen de deelstrepen 1 en 10 van de schalen die op de voorkant zijn getekend. De schaalverdeling loopt terwille van een zo zuiver mogelijke aflezing tot halverwege onder de knop door. De knop draait met de wijzers van de klok mee.

Zoals we in fig. 5.5 zien kan een sleepkontakt over een weerstand worden geschoven. De weerstand is een koolstoflaag waarvan de breedte en de dikte afhangt van de gewenste weerstandswaarde. Voor de ene potmeter is dat 1 k Ω , bij de andere 10 k Ω . Het Ω -teken is op de voorkant weggelaten daar een en ander voor zichzelf spreekt.

Begin en einde van de weerstand, en het uiteinde van het sleepkontakt zijn resp. verbonden met de bussen A, E en S. Deze zitten bij de bouwsteen – in tegenstelling tot fig. 5.5 – boven de draaiknop zodat we er geen last van hebben bij het regelen van de weerstand.

De plus- en minbussen op de bovenkant zijn met de overeenkomstige kontaktstrippen aan de zijkant van de bouwsteen verbonden. We hebben ze op dit moment niet nodig, maar bij de schakelingen bestaande uit verschillende bouwstenen, zullen ze goede diensten bewijzen. In het volgende hobbylaborboek zullen die schakelingen veelvuldig voorkomen.



5.6

5.7

Figuur 5.6 geeft het oude en het nieuwe symbool voor een potentiometer.

5.2.1 Toepassing als regelbare weerstand

Allereerst gaan we de potentiometer als regelbare weerstand gebruiken. We nemen daarvoor de bussen S-A of E-S. In fig. 5.5 zien we hoe door draaiing van het sleepkontakt S de lengtes en daarmee hun waarden van resp. de weerstanden S-A en E-S worden veranderd.

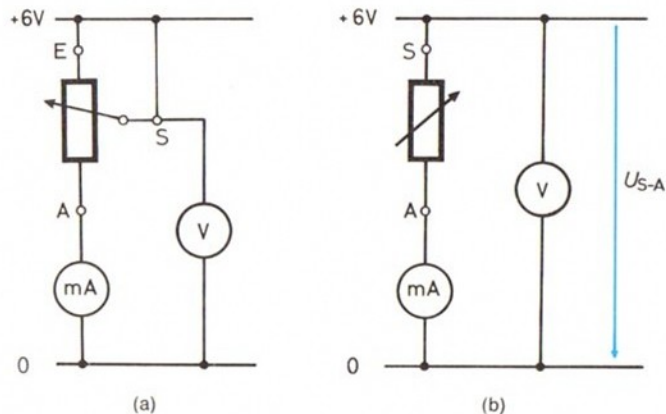
Het is ook duidelijk dat S-A en E-S bij elkaar steeds weer de totale weerstand A-E opleveren. A-E noemen we de „potentiometer weerstand“ en geven we aan met R_P . Het stuk S-A krijgt dan R_{S-A} en E-S de aanduiding R_{E-S} ; de waarde van R_{A-E} bedraagt bij onze potentiometers resp. 1 k Ω en 10 k Ω . De som van R_{S-A} en R_{E-S} bedraagt dus in elke stand van het sleepkontakt $R_P = R_{A-E} = 1 \text{ k}\Omega$ resp. 10 k Ω .

Het symbool voor een traploos instelbare weerstand staat in fig. 5.7.

We gaan nu de weerstandswaarden die bij de verschillende deelstrepen horen, bepalen met de methode van de stroom-spanningsmeting.

1e proef

Figuur 5.8 geeft twee verschillende manieren weer hoe we de metingen doen. In feite is fig. (b) niets anders dan een vereenvoudiging van tekening (a). De resultaten van potmeter $P_1 = 1 \text{ k}\Omega$ en potmeter $P_2 = 10 \text{ k}\Omega$ noteren we in tabel 5.9. In de laatste kolom zetten we de berekende waarde met de Wet van Ohm voor de weerstand $S-A = R_{S-A}$.

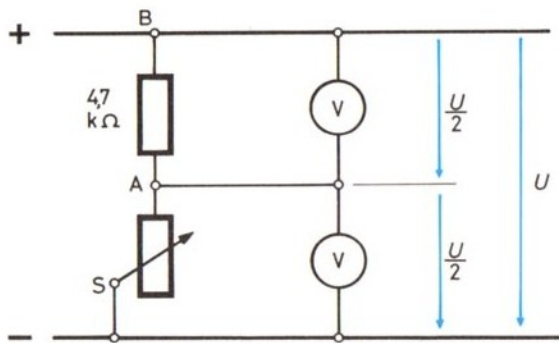


5.8

5.9

deel- streep	U_{S-A} in V		I in mA		R_{S-A} in Ω resp k Ω	
	P ₁	P ₂	P ₁	P ₂	P ₂	P ₁
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

$$R_{S-A} = U_{S-A} : I$$



5.10

Resultaat

Voor de 1 kΩ-potmeter verkrijgen we enigermate bruikbare waarden met deze methode. Maar voor de 10 kΩ-potmeter lukt dat niet omdat een nauwkeurige aflezing van de ft-stroomsterktemeter niet mogelijk is wegens de geringe stroomsterkte. We moeten daarom een andere methode gebruiken, waarvoor we de volgende proefopstelling (fig. 5.10) maken.

2e proef

We gaan de 10 kΩ-potmeter nu als instelbare weerstand in serie zetten met een 4,7 kΩ-weerstand. De draaiknop stellen we zo af dat tussen de punten S en A precies de helft van de totale spanning van 6 V staat. Een dergelijke spanningsdeler, die een spanning moet halveren, kunnen we zeer precies instellen. Met een trucje kunnen we een fout in het meetwerk uitschakelen. We schakelen de voltmeter afwisselend op de punten S en A, resp. A en B, en draaien net zolang met de knop tot beide waarden even groot zijn. Op die manier werken we ook onafhankelijk van de hoogte der aangelegde spanning omdat de delingsverhouding steeds gelijk blijft, namelijk 1 : 1.

Resultaat

Met behulp van deze methode die we „spanningshalvering“ of „spanningsvergelijking“ zouden kunnen noemen, zijn ook voor andere draaiknopstanden de waarden van de weerstand te bepalen. Iets waarop hoofdstuk 5.3.2 nader ingaat.

5.2.2 Maximale belasting

Een volgende vraag is hoeveel elektrische energie de weerstand R_{S-A} van de 10 kΩ-potmeter tijdens de laatste proef heeft afgenomen. Vooropgesteld dat we 6 V hadden aangelegd, dan is $U_R = U_{S-A} = 3$ V (fig. 5.10).

De ingestelde weerstand van de potmeter moet precies dezelfde waarde hebben als de 4,7 kΩ-weerstand. Immers, de draaiknop werd zo ingesteld dat de spanning precies de helft werd.

We kunnen nu de nevenstaande vergelijking opschrijven voor de verbruikte energie:

Op grond van de afmetingen van de potentiometer (in vergelijking met een 250 mW weerstand) zouden we zonder meer zeggen: „een belasting van 2 mW kan de potmeter best hebben“. Dat klopt, de potmeter is tot 0,25 W = 250 mW belastbaar.

We vervangen de 4,7 kΩ-weerstand door een 100 Ω-weerstand en proberen opnieuw twee gelijke deelspanningen te krijgen. Het zal niet lukken, de potmeter kan gewoon niet op 100 Ω worden ingesteld. Na het volgende hoofdstuk zult u zeggen: „dat is maar goed ook“.

5.2.3 De taak van de beveiligingsweerstand

We draaien de zaak nu om. Hoe hoog mag de stroomsterkte in de koolstoflaag van de potmeter maximaal zijn als de belasting niet boven de 0,25 W mag komen? We herleiden daartoe de vergelijking $P = I \cdot U$ naar de volgende vorm:

$$I = V \cdot \frac{P}{R} ; I = V \cdot \frac{250}{10} \cdot \frac{\text{mW}}{\text{k}\Omega} = V \cdot 25 \cdot (\text{mA})^2 = 5 \text{ mA}$$

De stroomsterkte mag dus maximaal 5 mA zijn. Bij benadering geldt dat natuurlijk ook als de potmeter wordt gebruikt als regelbare weerstand en we maar een deel van de koolstoflaag als weerstand gebruiken. In ons vorige voorbeeld van een spanningsdeler met tweemaal 100 Ω in serie en een werkspanning van 6 volt, zou er een stroom hebben gelopen van $I = 6 \text{ V} : 200 \Omega = 0,03 \text{ A} = 30 \text{ mA}$.

De koolstoflaag zou daarmee 6 keer de max. belasting te verwerken hebben gekregen en het daardoor zeker begeven hebben.

$$P_{S-A} = U_{S-A} \cdot I = U_{S-A} \cdot \frac{U_{S-A}}{R_{S-A}} = \frac{U_{S-A}^2}{R_{S-A}}$$

$$P_{S-A} \text{ is dan: } \frac{9}{4.7} \frac{\text{V}^2}{\text{k}\Omega} \approx 2 \text{ mW}$$

Er geldt:

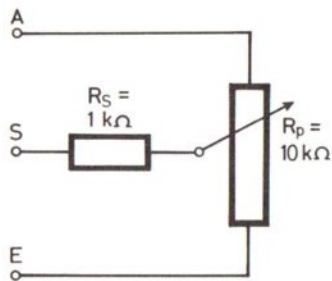
$$P = I \cdot U \text{ en } U = I \cdot R$$

We krijgen dan

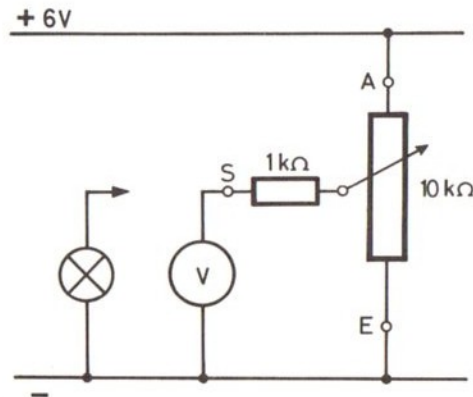
$$P = I \cdot I \cdot R = I^2 \cdot R$$

$$I^2 = \frac{P}{R}$$

$$I = V \cdot \frac{P}{R}$$



5.11



5.12

Ter beveiliging heeft fischertechnik daarom tussen het sleepcontact en de bus S nog een beveiligingsweerstand R_S van $1\text{ k}\Omega$ ingebouwd. Het werkelijke schema van de $10\text{ k}\Omega$ -potmeter staat in fig. 5.11. Duidelijk is nu ook waarom we de potmeter niet lager dan op $1\text{ k}\Omega$ kunnen instellen, terwijl de hoogst instelbare waarde niet $10\text{ k}\Omega$ maar $11\text{ k}\Omega$ is.

Bij de $1\text{ k}\Omega$ potmeter is een beveiligingsweerstand van $150\ \Omega$ ingebouwd, zodat alleen waarden tussen $0,15$ en $1,15\text{ k}\Omega$ zijn in te stellen.

5.2.4 Toepassing als spanningsdeler

We gaan nu alle drie de aansluitingen van de $10\text{ k}\Omega$ -potmeter in een schakeling opnemen, zoals in fig. 5.12 is getekend. We gebruiken de potmeter nu als regelbare spanningsdeler.

Proef

Bouw de schakeling volgens fig. 5.12 en stel de draaiknop zo in, dat de voltmeter 4 V aanwijst. Met een spanningsdeler kunnen we dus een lagere spanning dan die van de trafo krijgen en dat is interessant, want een gloeilampje heeft met die lagere spanning een langer leven.

Maar laten we eens kijken wat er gebeurt als we een lampje tussen S en E schakelen. Dezelfde proef doen we daarna ook met de $1\text{ k}\Omega$ -potmeter.

Resultaat

Het lampje brandt niet! De verklaring is niet zo moeilijk als we bedenken hoe weinig stroom er door het lampje vloeit. Anders gezegd, de stroomsterkte is veel te klein om de draad tot gloeien te brengen. Een en ander wordt behandeld in hoofdstuk 8.2. Wel willen we nu de rol van de potentiometer in een spanningsdeler nog nader onderzoeken en dat gebeurt in hoofdstuk 5.4.

5.3 Het ijken van de regelbare weerstand

We zullen nu eerst een paar betere methodes bespreken waarmee we voor elke deelstreep van de potmeter de bijbehorende weerstandswaarde kunnen bepalen. Met andere woorden, we gaan de potmeter als regelbare weerstand ijken.

5.3.1 Ijking door spanningsmeting

Voor dit doel komen we terug op de methode die we reeds in hoofdstuk 4.9.2 hebben besproken. In hoofdstuk 4.9.3 hebben we met deze methode de spanningsafhankelijkheid van de weerstand in een gloeilampje onderzocht.

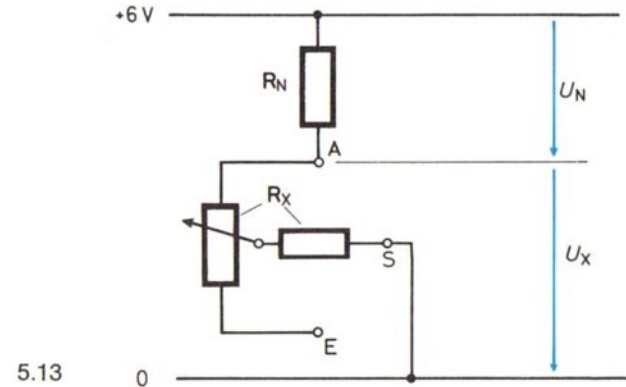
Proef

We zetten de schakeling van fig. 5.13 op, waarbij we de verschillende waarden van R_N uit tabel 5.14 halen en verder dezelfde redenering volgen als in hoofdstuk 4.9.2.

De gemeten waarden die bij elke deelstreep van resp. potmeter P_1 (1 k Ω) en potmeter P_2 (10 k Ω) horen, noteren we in tabel 5.14. Onder de tabel vinden we de reeds besproken formule waarmee we voor elke deelstreep de weerstand R_x kunnen uitrekenen. Deze noteren we in de laatste twee kolommen.

Resultaat

We gaan de resultaten nu verwerken in het diagram van fig. 5.15. Als coördinaten nemen we de deelstrepen en de weerstandswaarden



5.13

5.14

deel- streep	R_V in Ω resp. k Ω		U_N in V		U_x in V		R_x in Ω resp. k Ω	
	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2	P_1	P_2
1	100	1						
2	235	2						
3	335	3						
4	470	4,7						
5	470	4,7						
6	670	5,7						
7	825	6,7						
8	825	7,7						
9	1000	10						
10	1100	11						

$$R_x = R_N \cdot \frac{U_x}{U_N} = R_{A-s}$$

van R_x . Op die wijze verkrijgen we de punten P_1 t/m P_{10} voor resp. potmeter 1 k Ω en potmeter 10 k Ω . De verbinding van de punten levert de ijkcurve op van de regelbare weerstand R_{A-S} , vermeerderd met de waarde van de beveiligingsweerstand $R_S = 150 \Omega$, resp. 1 k Ω .

Vraag

Hoe kunnen we die ijkcurve voor R_{E-S} konstrueren zonder een meting uit te voeren?

5.3.2 IJking door spanningsvergelijking

Als we volgens fig. 5.16 twee precies gelijke weerstanden R_1 en R_2 in serie schakelen, dan is de deelspanning U_1 even hoog als de deelspanning U_2 . Dit gegeven kunnen we gebruiken voor een exacte ijking van een regelbare weerstand, ook wanneer we geen nauwkeurige voltmeter ter beschikking hebben. Ook de absolute waarde van de totale spanning speelt bij deze vergelijking geen rol; het komt er alleen op aan dat de uitslag van de wijzer bij de meting van de deelspanning U_1 precies even groot is als bij deelspanning U_2 .

Met deze methode gaan we nu nogmaals de ijkcurve voor de 10 k Ω -pompeter bepalen.

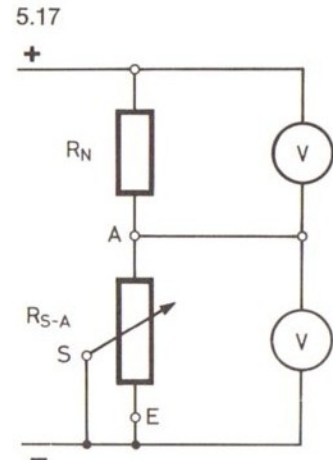
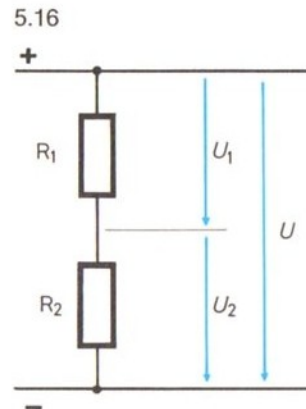
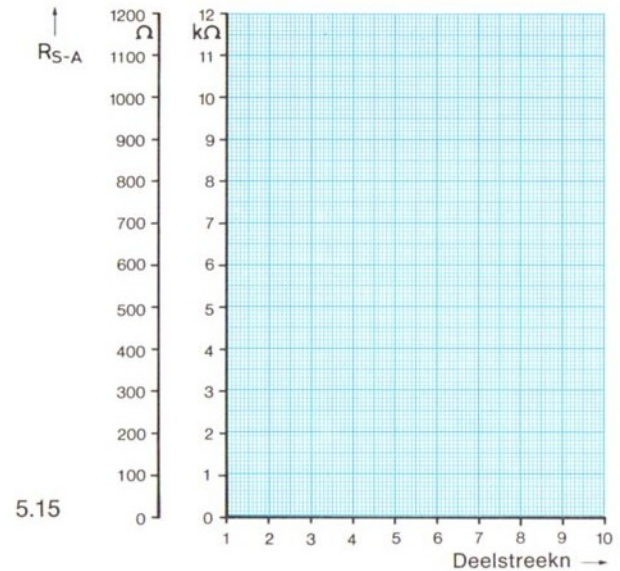
Proef

Als ijkmaat gebruiken we de weerstanden uit hobbylabor en noemen deze R_N (tabel 5.19). De tolerantie van 5% van de nominale waarde is voor onze doeleinden ruim voldoende.

Bouw de schakeling volgens fig. 5.17. De deelspanningen meten we niet met twee, maar met één voltmeter. De grap bij deze methode is dat met één meetapparaat de onvermijdelijk optredende meetfouten worden opgeheven.

Verander de regelbare weerstand nu zo, dat de voltmeter voor beide deelspanningen dezelfde waarde aangeeft.

Voor de meting moeten we de spanningsmeter afwisselend – zoals in proef 5.10 – op de beide weerstanden schakelen.

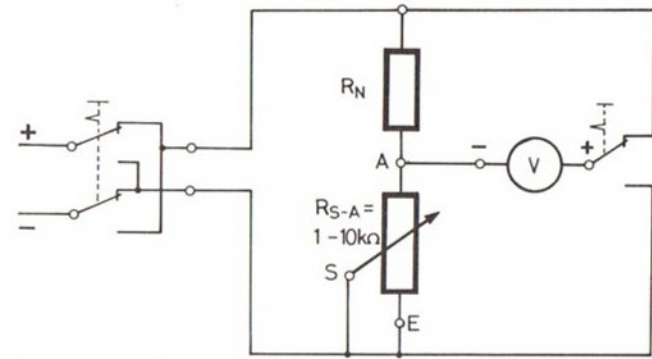


Veel sneller gaat het meten als we een ft-poolomkeerschakelaar en een drukknop gebruiken, zie fig. 5.18. Van de drukknop maken we met een stroef draaiende scharniersteen, een schakelaar. Schakel spanningsmeter en poolomkeerschakelaar zoveel mogelijk tegelijk om, dat spaart de wijzer van de voltmeter.

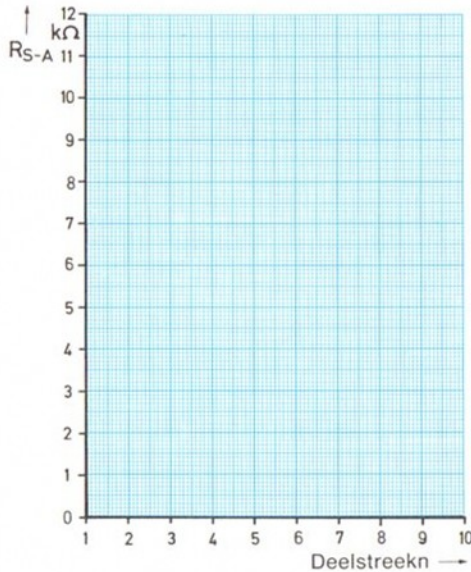
Als ijkmaat gebruiken we de weerstanden R_N als genoemd in tabel 5.19.

Konstruktie

Stel nu dat we voor de 2 k Ω -ijkmaat (2 weerstanden van 1 k Ω in serie) de gelijkstand verkrijgen als de draaiknop op 2.2 staat. Onder gelijkstand verstaan we het punt waarop de voltmeter voor beide deelspanningen exact dezelfde waarde aangeeft. Deze stand van de draaiknop noteren we in de tabel. Nadat we alle waarden hebben verkregen die voor de overeenkomstige ijkmaten een gelijkstand gaven, tekenen we een nieuw ijkdiagram. Hiervoor gebruiken we fig. 5.20. Dit diagram moet overeenkomen met de figuur die we in 5.15 hebben getekend.



5.18



5.20

5.19

R_N in k Ω ijkmaat	gelijkstand bij deelstreep
1,0	
1,1	
1,2	
1,5	
2,0	
3,0	
4,7	
6,7	
7,7	
10,0	
10,5	
10,8	
11,0	

5.4 De potentiometer als onbelaste spanningsdeler

5.4.1 Het spanningsdeler-diagram voor $U_p = 4,5\text{ V}$

We hebben de potmeter al in schakeling 5.12 als spanningsdeler gebruikt en stelden toen vast dat hij als een ideale, snel en zeer fijn afstelbare spanningsdeler is toe te passen. Tenminste, als we hem niet met een lampje of op een andere manier zwaar belasten.

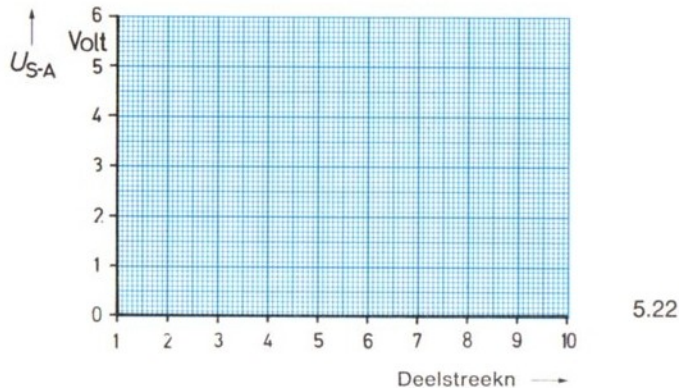
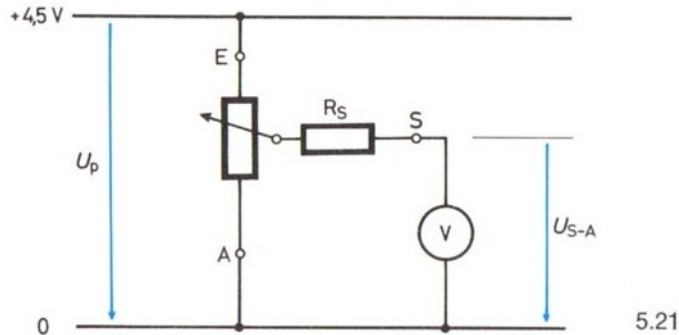
Een van de beide deelspanningen zou als (bijv. in hobbylabor 2) spanningsbron voor experimenten kunnen dienen. Nu zou het prettig zijn als we die spanning zonder meer met de knop konden instellen, zonder na elke verandering opnieuw te moeten meten of we de juiste spanning weer hebben. We gaan daarom een diagram opstellen waaruit we voor elke spanning tussen 0 en 4,5 volt direct kunnen zien op welke streep we de knop moeten zetten. Omgekeerd is dan ook voor elke willekeurig gekozen deelstreep de spanning te lezen.

De nodige gegevens voor het diagram verkrijgen we met de volgende proef.

Proef

Na elkaar plaatsen we op de beide potentiometers een spanning van 4,5 volt, volgens de schakeling van fig. 5.21. Voor elke deelstreep van de schaalverdeling meten we de bijbehorende spanning U_{S-A} . De resultaten noteren we in een tabel, waarvan we de opzet graag aan u overlaten.

Met de verkregen waarden konstrueren we voor elke potentiometer zijn curve, die de afhankelijkheid weergeeft van de deelspanning U_{S-A} en de bijbehorende deelstreep. We nemen hiervoor fig. 5.22.



Resultaat

De spanning stijgt bij beide potmeters recht evenredig met het getal bij de deelstreep. Als curve krijgen we dan ook elke keer een rechte lijn, kortweg een rechte.

Dat was ook wel te verwachten omdat ook de ijkcurves voor de weerstandswaarden rechten waren. Dat de curven knikken vertonen zit hierin, dat de potmeters niet precies genoeg zijn; bovendien kunnen er fouten optreden bij het instellen van de draaiknop en het aflezen van de spanning op de voltmeter.

Hetzelfde resultaat zouden we ook verkregen hebben door berekening, immers de deelspanningen verhouden zich tot de totale spanning als de deelweerstand tot de totale weerstand. Voor de berekening maken we gebruik van de ijkcurven 5.15 en 5.20. Hieruit kunnen we bij elke deelstreep de bijbehorende deelweerstand aflezen.

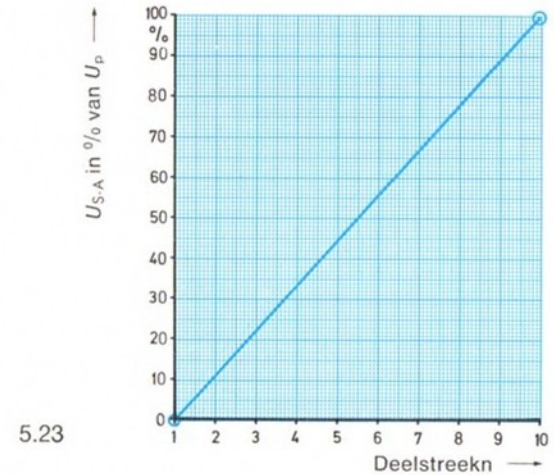
Vraag

Zoals we weten heeft de 10 k Ω -potmeter een ingebouwde beveiligingsweerstand R_S van 1 k Ω . Bij deelstreep 1 hoort daarom een weerstand van 1 k Ω . Hoe komt het dat toch bij stand 1 van de knop de deelspanning U_{S-A} de waarde nul heeft?

5.4.2 Standaardiseren van het spanningsdeler-diagram

Het mooiste zou het zijn als we een diagram hadden, waaruit we de deelspanning konden aflezen voor elke denkbare totaalspanning die we tussen E en A van een potmeter kunnen aanleggen. Dat kan als we op de spanningsas van het diagram de deelspanning U_{S-A} in procenten van de totaalspanning U_p afzetten.

Men noemt dat het standaardiseren van een diagram. We verkrijgen op deze manier een diagram dat niet langer voor een speciaal geval ($U_p = 4,5$ V) geldt, maar algemene geldigheid heeft. We leiden dus van het speciaal voor één spanning geldende spanningsdeler-diagram 5.22 een algemeen voor elke spanning U_p geldend diagram af. De as van de deelspanning U_{S-A} geeft hier geen voltages, maar percentages van de op de potmeter aangelegde totaalspanning U_p . In de



ideale (de theoretisch juiste) grafiek behoort bij 0% de streep 1 van de schaalverdeling en 100% bij streep 10. Deze beide waarden zijn in fig. 5.23 reeds getekend. De ideale karakteristiek (curve) is de rechte die door deze beide punten gaat.

Beschouwen we nu eerst deze ideale karakteristiek: misschien is het u al opgevallen dat tussen deelstreep 1 en 10 van de schaalverdeling niet 10, maar 9 intervallen (tussenstukken) liggen. Bij deelstreep 5 hoort dan ook niet de waarde 50% van U_p , maar ongeveer 45%. Als we op de klemmen S-A de helft van de aangelegde spanning op A-E willen hebben, dan moeten we de potmeter precies tussen deelstreep 5 en 6 instellen!

We gaan nu de echte karakteristiek intekenen. We nemen daarvoor van de deelstrepen 2 - 4 - 6 - 8 - 10 uit diagram 5.22 de bijbehorende deelspanningen U_{S-A} . We moeten de waarde daarvan omrekenen in procenten van de totale spanning U_p . We doen dat door de gemeten waarde U_{S-A} te delen op de gemeten batterijspanning en het resultaat te vermenigvuldigen met 100%.

Voorbeeld: $U_p = 4,5$ V en U_{S-A} bij deelstreek 6 is ongeveer 2,5 V. Dan is de gestandaardiseerde waarde van U_{S-A} in deze stand $\frac{2,5}{4,5} \cdot 100\% \approx 55\%$ van U_p .

Met de zo verkregen waarden kunnen we een gestandaardiseerd spanningsdeler-diagram tekenen.

1. Voorbeeld van een toepassing

Stel dat we op de bussen A-E een spanning van 6,3 V hebben gezet en de draaiknop staat op 4,6. In dat geval zal op de bussen S-A een spanning van 40% van 6,3 V = 2,5 V staan. Tenminste als de door u verkregen karakteristiek precies overeenkomt met de ideale karakteristiek in fig. 5.23.

2. Voorbeeld van een toepassing

We zetten op de bussen A-E van een potentiometer een spanning van 5,8 V. Stel nu dat we een spanning van 1,8 V nodig hebben. In welke stand moeten we de knop nu zetten? Reken eerst uit hoeveel procent 1,8 V van 5,8 Volt is. Dat is%.

Dit percentage vinden we op de verticale as van het diagram, van daaruit gaan we horizontaal naar rechts tot we de lijn snijden die de karakteristiek weergeeft. Vanuit het snijpunt gaan we weer loodrecht naar beneden tot we de horizontale as snijden. En dit snijpunt geeft precies het getal aan van de schaalverdeling waarop we de knop moeten zetten. In ons voorbeeld is dat de deelschreef.

Herhaal deze experimenten met verschillende spanningen en een gewenste deelspanning van 1 V. Controleer de resultaten steeds met de voltmeter.

De verkregen waarden gelden natuurlijk alleen onder voorwaarde dat de stroom die via het slepcontact S loopt „klein genoeg“ blijft zodat de spanning U_{S-A} (tussen de bussen A en S) niet beïnvloed wordt.

5.5 Verschillende karakteristieken

5.5.1 Lineaire karakteristieken

Tot nu toe hebben we de horizontale en verticale as van onze diagrammen precies zo onderverdeeld als bij een meterstaaf. De Waarde „50“ ligt 10 keer zover van het nulpunt als de waarde „5“ en de waarde „20“ heeft de dubbele afstand tot het nulpunt als die van de waarde „10“. Dergelijke schaalverdelingen heten lineair.

Een schijnbare uitzondering vormt de schaalverdeling op de potentiometer bouwsteen. Schijnbaar, want de gekozen verdeling van 1 tot 10 kunnen we rustig vervangen door 0 tot 9 en dan blijkt de schaal wel degelijk lineair te zijn.

De konklusie is dat een lineaire schaal niet per se met 0 hoeft te beginnen, maar zo nodig mag worden verschoven.

Als in een dergelijk coördinatensysteem met lineaire maatstaven de karakteristiek de vorm van een rechte heeft, dan spreekt men van een lineaire karakteristiek. Mathematisch komt dat overeen met een recht evenredige of omgekeerd evenredige verhouding van de beide met elkaar in verband gebrachte verschijnselen. Onze regelbare weerstand heeft dus in de gebruikelijke schakeling een lineaire karakteristiek (fig. 5.15 en 5.20). De weerstand tussen bus A en bus S is recht evenredig met de schaalverdeling, vermeerderd met de waarde van de 1 k Ω -beveiligingsweerstand.

Ook de karakteristiek van de deelspanning U_{S-A} in afhankelijkheid van de schaalverdeling op de potentiometer, verloopt lineair.

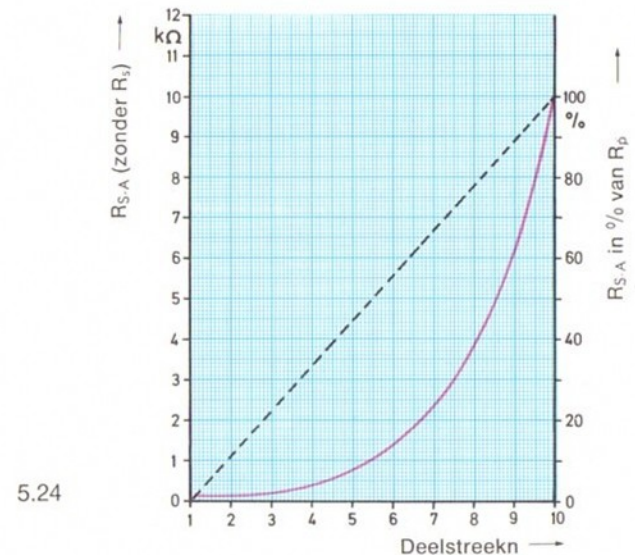
Mochten de verkregen punten niet precies op een rechte lijn liggen, dan is de oorzaak daarvan te zoeken in afleesfouten en/of onnauwkeurigheden in de meetapparatuur of de potmeter.

Een en ander is reeds in hoofdstuk 2.10 besproken.

5.5.2 Logaritmische karakteristiek

In elektronische apparatuur zitten vaak potentiometers met een zogeheten „logaritmische karakteristiek“. Dat is b.v. het geval bij de potentiometers in radio's, die dienen voor het afstellen van de geluidsterkte. Het kenmerkende van een dergelijke karakteristiek zien we in fig. 5.24.

De horizontale en verticale as zijn ook nu weer lineair verdeeld in eenheden.



Op de horizontale as is de schaalverdeling van de potentiometer uitgezet. De potmeter heeft – precies als de lineaire – een waarde van $10\text{ k}\Omega$ tussen de aansluitingen A en E. Op de verticale as is links de waarde van de weerstand R_{S-A} tussen de punten A en S aangegeven (zonder voorschakelweerstand). Rechts staat de verhouding van deelspanning U_{S-A} tot de totale spanning U_p in procenten. Dit geldt natuurlijk weer alleen voor een praktisch onbelaste potmeter. De logaritmisch verlopende karakteristiek is rood getekend. Deze geeft aan: draaien we de knop van een logaritmische potmeter van links naar rechts tot op de helft, dan zal tussen S en A, anders gezegd op het sloopcontact de weerstand slechts ééntiende bedragen van de weerstand bij een volledig naar rechts (open) gedraaide potmeter.

Een potmeter met lineaire karakteristiek heeft op de helft van de schaalverdeling ook de helft van zijn eindweerstand, de beveiligingsweerstand niet meegerekend.

Ter vergelijking is in fig. 5.24 ook de karakteristiek (met streepjes) van de lineaire potmeter getekend.

5.5.3 Andere karakteristieken

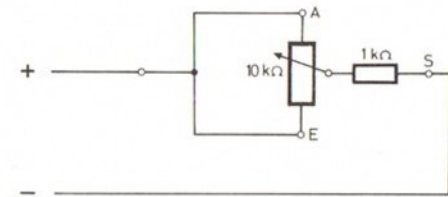
Er zijn ook andere curves die bepaalde wiskundige functies uitdrukken, zoals b.v. de „vermognshyperbool“. In hoofdstuk 12 komen de curven met een e-functie aan de orde. Een karakteristiek waarvan de vorm mathematisch lastig is vast te leggen, wordt in hoofdstuk 11 behandeld en betreft de diode.

Het volgende experiment levert een hoogst interessante karakteristiek op, die wiskundig eveneens lastig te beschrijven valt.

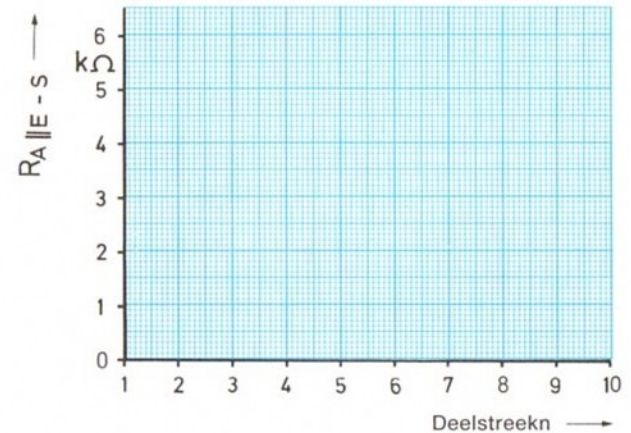
Proef

We gaan onderzoeken wat er met de weerstand van de potmeter gebeurt – afhankelijk van de stand van de knop – wanneer we de meter in een eigenaardige schakeling opnemen. We schakelen de bussen A en E parallel als het ene einde en de bus S als het andere einde van een geleider (zie fig. 5.25). We meten nu de aangelegde spanning (tussen + en -) en de stroomsterkte voor de 10 standen van de draaiknop. Hieruit kunnen we voor elke deelstreep de overeenkomende weerstand $R_{A/E-S}$ berekenen, aan de hand waarvan de karakteristiek te tekenen is in fig. 5.26. We moeten dan een kromme (gebogen lijn) krijgen, die overeenkomt met die van fig. 5.27.

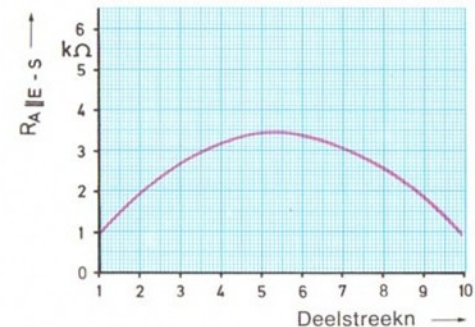
5.25

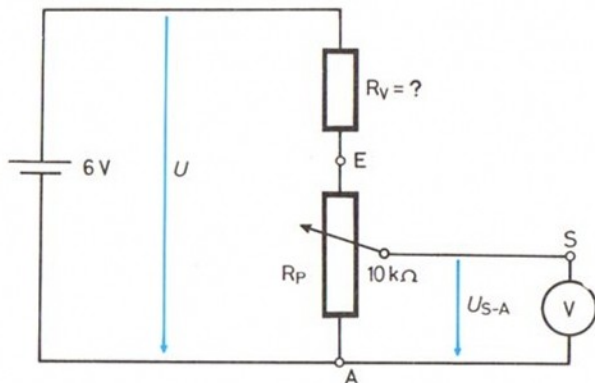


5.26

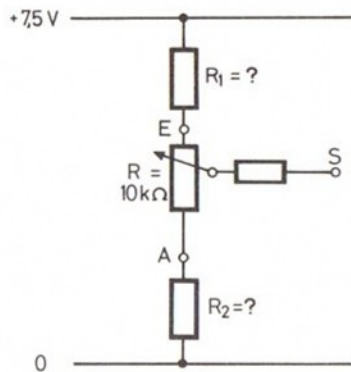


5.27

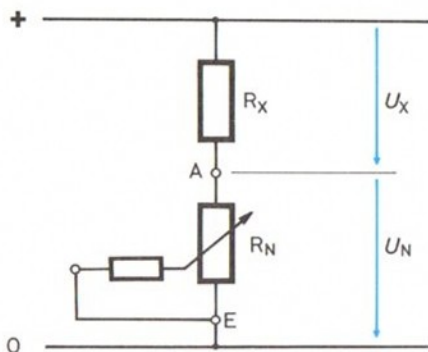




5.28



5.29



5.30

5.6 Toepassingen

5.6.1 Regelbare spanningsdeler met voorschakelweerstand

Bij de schakeling van de 10 kΩ-potmeter als onbelaste spanningsdeler (hoofdstuk 5.4) kunnen we tussen de bussen A en S een spanning van 0 tot de volle batterijspanning aftakken.

Elektronische schakelingen hebben vaak een traploos regelbare spanning nodig, die echter nooit de hoogte van de totaal ter beschikking staande spanning mag bereiken.

Stel het volgende: de batterijspanning $U = 6 \text{ V}$, maar de regelbare spanning U_{S-A} van de 10 kΩ-potmeter mag niet boven een waarde van 3 V uit komen. Hoe doen we dat?

Heel eenvoudig: met een voorschakelweerstand R_V , zoals in fig. 5.28 aangegeven.

Vragen

Hoe groot moet R_V zijn? Met de regels en formules voor de serieschakeling moet u zelf het antwoord kunnen vinden.

Hoe moet de schakeling worden als we altijd een spanning tussen de 3-6 V willen aftakken?

In dit geval kunnen we dus geen spanning lager dan 3 V instellen.

En hoe moet de schakeling worden als de totale spanning 7,5 V is en de deelspanning tussen 1,0 V en rond de 6,5 V te veranderen moet zijn? Het principe van een dergelijke schakeling staat in fig. 5.29.

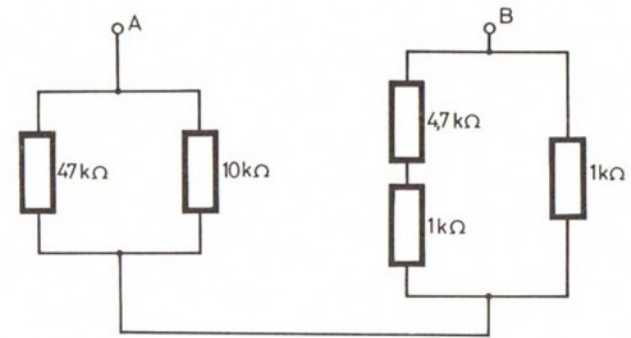
Welke waarden moeten R_1 en R_2 hebben? En op welk punt moeten we de spanning aftakken?

5.6.2 Meting van een onbekende weerstand

De methode besproken in hoofdstuk 5.3.2 is ook te gebruiken om de waarde van de weerstand te bepalen, zie fig. 5.30. In dat geval schakelen we de onbekende weerstand R_X in serie met de regelbare weerstand en draaien we de knop zo, dat beide deelspanningen even groot zijn.

We weten het punt op de schaal dat de „gelijkstand“ aangeeft. Uit het ijkdiagram van fig. 5.20 kunnen we de daarbij behorende weerstandswaarde aflezen en dat is precies de waarde die we zoeken. Er is natuurlijk wel een beperking. De waarde van R_x mag niet groter zijn dan de maximaal, en niet kleiner dan de minimaal instelbare weerstand van de potmeter. Met de 10 k Ω -potmeter kunnen we daarom alleen waarden tussen ongeveer 1 k Ω en 11 k Ω meten.

We gaan de methode met een voorbeeld testen.



5.31

Proef

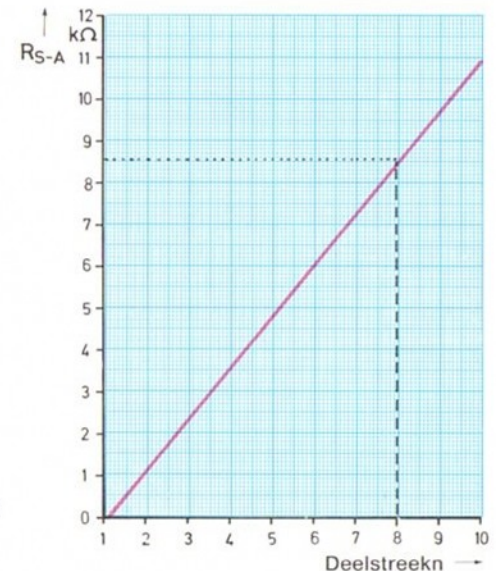
Bepaal volgens de hiervoor besproken methode de weerstand tussen de punten A en B in fig. 5.31.

Resultaat

Stel dat de „gelijkstand“ op de schaal ligt bij 8.0 en uw ijkdiagram 5.20 er net zo uitziet als fig. 5.32. Eerst zoeken we dan op de horizontale as punt 8.0. Van dit punt uit gaan we loodrecht omhoog naar de rode lijn. Vanuit dit snijpunt gaan we horizontaal naar de weerstandsas waar we de gezochte waarde vinden.

Hetzelfde doet u nu in uw eigen ijkdiagram van fig. 5.20 met de door u gevonden deelstreep, waarbij de deelspanningen gelijk zijn. De waarde die u dan vindt, mag niet teveel van ons voorbeeld afwijken.

Verzamel op dezelfde wijze de waarden van enkele zelf opgezette combinaties van weerstanden.



5.32

6 De Parallelschakeling van Weerstanden

De parallelschakeling kennen we reeds: twee of meer gloeilampen naast elkaar b.v. op een batterij aangesloten (hoofdstuk 1.3.4). In het nu volgende hoofdstuk gaan we wat dieper op de parallelschakeling in en bespreken we enkele toepassingen.

6.1 Het verschil tussen de serie- en de parallelschakeling

In fig. 6.1 zien we naast elkaar een serieschakeling en een parallelschakeling getekend. Ze spreken voor zichzelf. In serie: in een rij, achter elkaar. Parallel: naast elkaar.

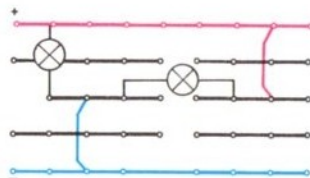
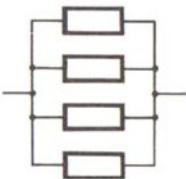
Dat naast elkaar hoeven we natuurlijk in ruimtelijke zin niet letterlijk te nemen. Parallelgeschakelde weerstanden kunnen in het bedradingschema of in de fysieke bouw van een schakeling ook dwars of achter elkaar getekend resp. geplaatst worden, zoals we in de fig. 6.2 tot 6.7 zien. Welke schema's stellen een parallelschakeling voor? En welke een serieschakeling?

6.1

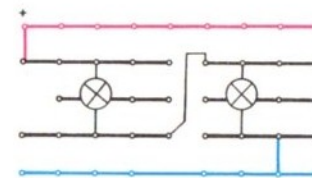
(b) parallelschakeling



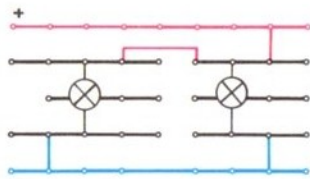
(a) serieschakeling



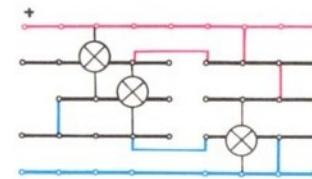
6.2



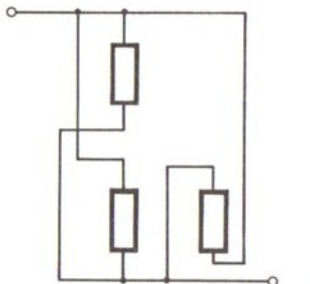
6.3



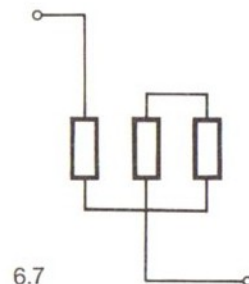
6.4



6.5



6.6



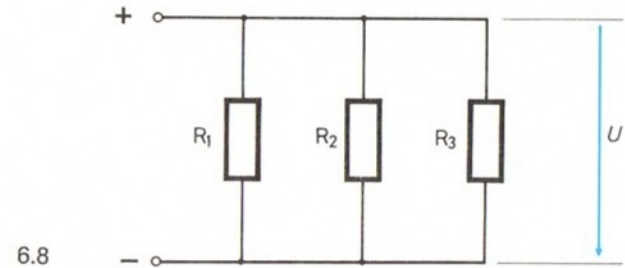
6.7

6.2 De spanning op een parallelschakeling

In fig. 6.8 hebben we het schema van fig. 6.6 iets overzichtelijker getekend. Heel duidelijk zien we nu dat op de weerstanden R_1 , R_2 en R_3 dezelfde spanning staat.

Met andere woorden: die spanning is op alle drie de weerstanden even hoog. Wiskundig: $U = U_1 = U_2 = U_3$

We kunnen dit met een proef bewijzen.



6.8

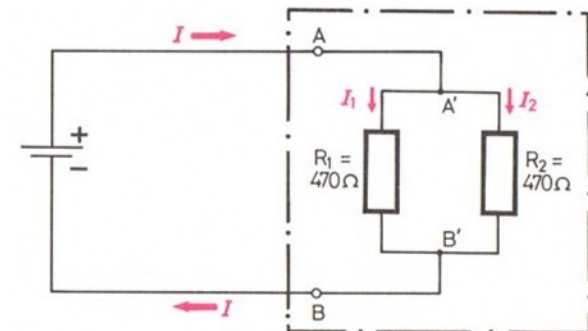
Bij een parallelschakeling van weerstanden zijn de spanningen daarop even groot.

6.3 Deelstromen en totale stroom

We beperken ons eerst even tot de eenvoudigste parallelschakeling, die met 2 weerstanden (fig. 6.9). Ook de parallelschakeling kunnen we – vanuit de batterij – zien als een „tweepool“ met de aansluitingen A en B. We kunnen de stroom I meten die er door loopt en de spanning U die er op staat. Met deze beide gegevens kunnen we weer de totale weerstand en de verbruikte energie berekenen. Principieel is dat precies hetzelfde als bij de serieschakeling.

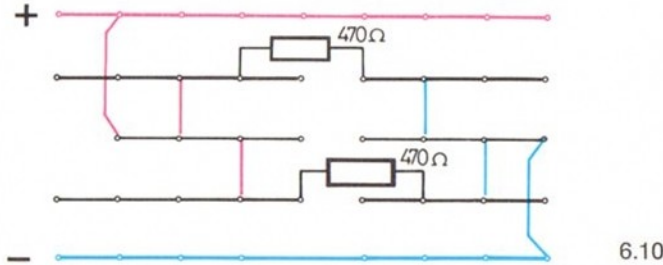
Maar nu de parallelschakeling zelf; het inwendige van de tweepool. Bij punt A komt de stroom de schakeling binnen en splitst zich in punt A' (A-accents) in de beide deelstromen I_1 en I_2 . Deelstroom I_1 gaat door de deelweerstand R_1 en de deelstroom I_2 door de deelweerstand R_2 . Beide deelstromen verenigen zich in punt B' tot de totale stroom I . Deze loopt via aansluiting B terug naar de batterij.

In een parallelschakeling zien we dus een stroomvertakking. De stromen en hun richting (van + naar -) zijn met rode pijlen aangegeven.

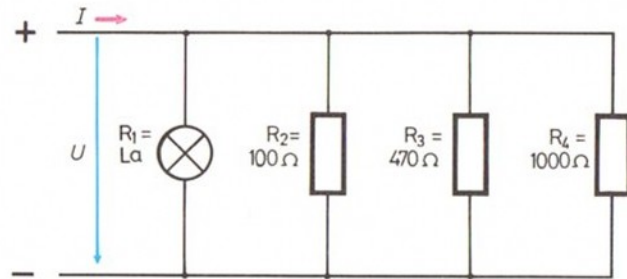


6.9

In een parallelschakeling is de som van de deelstromen gelijk aan de totale stroom.



6.10



6.11

6.12

Proefnr	U in V	I in mA	I_1 in mA	I_2 in mA	I_3 in mA	I_4 in mA
1						
2						
3						

We mogen de dikte van de pijlen als een maat voor de stroomsterkte nemen. De pijlen I_1 en I_2 bij elkaar zijn dus even dik als pijl I . Er kan immers geen stroom verloren gaan. Op grond daarvan mogen we schrijven: $I = I_1 + I_2$.

2 proeven

We kunnen ons daarvan met metingen overtuigen. We zetten schakeling 6.9 op het Multischakelpaneel (MSP) volgens fig. 6.10. In deze opstelling kunnen we alle drie de stroomsterktes gemakkelijk meten. We moeten daartoe alleen de geleider even onderbreken op de plaats waar we de stroom willen meten en de stroomsterktemeter er tussen zetten. In het schema zijn daartoe op de juiste plaatsen 6 „bruggetjes“ getekend. Vervang na de metingen de ene 470Ω -weerstand door een 100Ω -weerstand en herhaal de metingen.

Resultaat

In beide proeven is de som van de deelstromen I_1 en I_2 gelijk aan de totale stroomsterkte. Als we niet twee, maar drie of meer weerstanden parallel hadden geschakeld, dan zou het eindresultaat hetzelfde zijn gebleven: de som der deelstromen is de totale stroom. We kunnen dus schrijven:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + \dots$$

3. Proef

Overtuig u van het bovenstaande door de deelstromen te meten van fig. 6.11 en noteer de waarden in tabel 6.12.

Geldt de formule ook als we de proef met een hogere spanning herhalen?

6.4 De verhouding van deelstromen en deelweerstand

De laatste proef heeft nog iets anders aangetoond: in de stroomtak met de laagste weerstand loopt de sterkste stroom; anderzijds gaat de zwakste stroom door de tak met de hoogste weerstand. We gaan eerst eens een parallelschakeling met 2 weerstanden bekijken als getekend in fig. 6.13. We zetten er een spanning U op, door weerstand R_1 loopt dan de stroom I_1 , en door weerstand R_2 de stroom I_2 . Volgens de Wet van Ohm geldt nu:

$$U = I_1 \cdot R_1 \quad U = I_2 \cdot R_2$$

Hieruit volgt: $I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$

Hetgeen te herleiden is tot $I_1 : I_2 = R_2 : R_1$.

De stroomsterktes verhouden zich dus omgekeerd met de weerstanden. We kunnen de vergelijking ook nog anders schrijven:

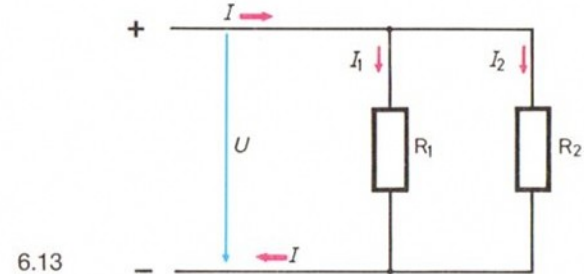
$$I_1 : I_2 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2}$$

Hoe die afleiding precies tot stand is gekomen, vergeten we nu maar. De eindconklusie is dat voor een willekeurig aantal parallel geschakelde weerstanden geldt:

$$I : I_1 : I_2 : I_3 : \dots = \frac{1}{R} : \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots$$

We herinneren ons nog van pag. 32, dat we in plaats van de reciproke $1/R$ (het omgekeerde dus) van de weerstandswaarde, ook de geleiding kunnen hanteren. De bovenstaande formule wordt dan:

$$I : I_1 : I_2 : I_3 : \dots = G : G_1 : G_2 : G_3 : \dots$$



In een parallelschakeling verhouden de stroomsterktes zich recht evenredig met de geleiding en omgekeerd met de waarden van de deelweerstand.

Verhouding van de deelstroom volgens de waarden van tabel 6.12 (3e proef)	
berekend met nominale weerstandswaarden	berekend met de meetresultaten
$R_{10} : R_2 =$	$I_2 : I_{10} =$
$R_{10} : R_3 =$	$I_3 : I_{10} =$
$R_{10} : R_4 =$	$I_4 : I_{10} =$
$R_2 : R_3 =$	$I_3 : I_2 =$
$R_2 : R_4 =$	$I_4 : I_2 =$
$R_3 : R_4 =$	$I_4 : I_3 =$
	$I_2 : I =$
	$I_4 : I =$

In een parallelschakeling is de waarde van de totale weerstand altijd kleiner dan de waarde van de kleinste deelweerstand.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

(onder de noemer brengen van $R_1 \cdot R_2$)

$$\frac{1}{R} = \frac{1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2} + \frac{1 \cdot R_1}{R_1 \cdot R_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2} \quad R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Bepaal de verhouding van de deelstromen in de parallelschakeling 6.11, aan de hand van de meetresultaten. Vergelijk die berekende verhouding met de verhouding die we verkrijgen kunnen uit de nominale waarden van de weerstanden. De nominale waarden worden aangegeven met de kleurcode.

De resultaten noteren we in tabel 6.14 (nominale weerstand van de lamp is 120Ω).

6.5 Totale geleiding en totale weerstand

Het volgende punt is de grootte van de totale weerstand in een parallelschakeling. Laten we eerst eens een willekeurig aantal parallel geschakelde weerstanden bekijken.

In een serieschakeling moeten we de weerstandswaarden bij elkaar optellen, voor een parallelschakeling moeten we dat doen met de waarden van de geleiding:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

Voor wie liever met weerstanden rekt, vervangen we G door

$$\frac{1}{R} \text{ en dan krijgen we:}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

Hieruit volgt ook dat de totale weerstand altijd kleiner moet zijn dan de laagste waarde van een deelweerstand.

Veel eenvoudiger wordt de formule als we met maar twee parallel geschakelde weerstanden te doen hebben. In dat geval geldt:

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Om te voorkomen dat we het rechterlid van de vergelijking ver-
keerd schrijven, het volgende ezelsbruggetje: in de juiste stand
vormt het rechterlid een trapezium.

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

6.6 Vermogensverdeling in de parallelschakeling

Na het voorafgaande zal het niet zo moeilijk zijn om in te zien dat
het totale vermogen gelijk is aan de som van de deelvermogens:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

Op alle deelweerstandens staat dezelfde spanning, daaruit mogen
we konkluderen dat de vermogens zich verhouden als de deelstro-
men. Deze zijn weer omgekeerd evenredig aan de weerstanden,
waaruit volgt:

$$P : P_1 : P_2 : P_3 \dots = \frac{1}{R} : \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots$$

**In een parallelschakeling is de verhouding
van de vermogens door de deelweerstandens
afgenomen, omgekeerd evenredig met
de grootte van hun weerstanden.**

Vraag

Stel dat we de 100 Ω - en de 33 Ω -weerstand parallel schakelen op de laagste
spanning van de trafo, welke weerstand wordt dan warmer?

Reken uit hoeveel warmte de 33 Ω -weerstand meer afgeeft dan de 100 Ω -weerstand.
Niet eerst uitrekenen hoeveel watt elke weerstand apart afneemt, maar
gelijk het verhoudingsgetal bepalen!

6.7 Toepassingen

6.7.1 Verlaging van de weerstand

Een weerstand die niet in de normale serie voorhanden is, kan
meestal worden verkregen met een serieschakeling van de losse
weerstandens. Vaak is het echter gunstiger om de gewenste weer-
stand samen te stellen door een aantal weerstanden parallel te
schakelen. Dit is b.v. het geval wanneer in een schakeling met ver-
scheidene weerstanden de waarde van één daarvan tijdelijk moet
worden verkleind.

In een niet nader omschreven schakeling zit b.v. een 100 Ω -weerstand.
Stel, dat we deze waarde tijdelijk tot 90 Ω willen verkleinen
om uit te proberen hoe de schakeling dan werkt. De schijnbaar een-
voudigste oplossing is de vervanging door een serieschakeling van
47 Ω + 33 Ω + 10 Ω , maar dat is niet mogelijk want we beschik-
ken niet over de 47 Ω weerstand. Bovendien zal het waarschijnlijk
niet zo gemakkelijk zijn in een complete schakeling een weerstand
te verwisselen. Om al deze redenen is het gemakkelijker uit te
rekenen welke weerstand we parallel moeten schakelen met de 100
 Ω -weerstand om een uiteindelijke waarde van 90 Ω te krijgen.

Parallel geschakelde weerstanden geven een lagere weerstandswaarde.

6.15

Ingebouwde weerstand R_1 in Ω , k Ω , M Ω	Door parallel-schakeling van R_2 in Ω , k Ω , M Ω	Totale weerstand R in Ω , k Ω , M Ω
1	$\frac{1}{3} \cdot R_1$	$\frac{1}{4} \cdot R_1$
1	$\frac{1}{4} \cdot R_1$
1	$\frac{2}{3} \cdot R_1$	$\frac{2}{5} \cdot R_1$
1	$1,0 \cdot R_1$	$0,5 \cdot R_1$
1	$1,5 \cdot R_1$	$0,6 \cdot R_1$
1	$2,0 \cdot R_1$	$0,67 \cdot R_1$
1	$3,0 \cdot R_1$... $\cdot R_1$
1	$4,0 \cdot R_1$	$0,80 \cdot R_1$
1	$6,0 \cdot R_1$... $\cdot R_1$
1	$10,0 \cdot R_1$	$0,91 \cdot R_1$
1	$20 \cdot R_1$... $\cdot R_1$
1	$50 \cdot R_1$... $\cdot R_1$
1	$100 \cdot R_1$	$0,99 \cdot R_1$
1	$1000 \cdot R_1$	$0,999 \cdot R_1$

De formule voor het berekenen van de gezochte weerstand R_x , ontstaat door herleiding van de reeds bekende vergelijking voor de totale weerstand:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

We vervangen R_2 door R_x en krijgen dan:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R} - \frac{1}{R_1}$$

hieruit leiden we overeenkomstig hoofdstuk 6.5 af:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R}{R_1 - R}$$

In het voorbeeld is de voorhanden weerstand $R_1 = 100 \Omega$ en de gewenste waarde $R = 90 \Omega$. Met deze gegevens kunnen we de waarde van de parallel te schakelen weerstand berekenen:

$$R_x = \frac{100 \cdot 90}{100 - 90} = \frac{9000}{10} = 900 \Omega$$

In plaats van een 900Ω -weerstand is zonder meer 1000Ω voor R_x te nemen. Reken zelf na dat bij $R_1 = 100 \Omega$ en $R_x = 1000 \Omega$ de nieuwe waarde $90,9 \Omega$ wordt. Die fout van $0,9 \Omega$ – liever gezegd afwijking of tolerantie – op een waarde van 90Ω mag worden verwaarloosd.

Bij het experimentele zoeken naar de beste schakeling zal de elektronikus vaak een ingebouwde weerstand willen vervangen door één met een lagere waarde. Elke keer zou hij daartoe de parallel te schakelen weerstand moeten uitrekenen als de ingebouwde weerstand zo en zoveel procenten kleiner zou moeten worden. Daarom werkt hij met diagrammen. We volstaan met een kort overzicht, waartoe tabel 6.15 dient.

De voorhanden weerstand, de ingebouwde, geven we aan met R_1 , de daarmee parallel te schakelen met R_2 en de uiteindelijke of totale weerstand met R .

De tabel lezen we als volgt: Stel $R_1 = 1 \Omega$ en $R_2 = 1$. R_1 , dus eveneens 1Ω , dan wordt de totale weerstand R van de parallelschakeling $0,5 \times R_1 = 0,5 \Omega$ (regel 4 in de tabel). Dezelfde verhouding van R_1 en R komt er uit als R_1 niet 1Ω is, maar een willekeurige andere waarde en parallel wordt geschakeld met een weerstand van dezelfde grootte. Reken na hoe groot R wordt als we 2 weerstanden van elk 1000Ω parallel schakelen.

Schakelen we parallel met R_1 een weerstand die vier keer zo groot is, dan blijkt uit de berekening de totale weerstand R te zijn $0,80 \times R_1$. Stel de ingebouwde weerstand b.v. op 250Ω , dan zou in dat geval $4 \cdot 250 = 1000 \Omega$ parallel

worden geschakeld. Het uiteindelijke resultaat is dan $0,8 \cdot R_1 = 0,8 \cdot 250 = 200 \Omega$. Noteer in de tabel de ontbrekende waarden.

De nu complete tabel gaan we gebruiken voor het eigenlijke doel, namelijk het snel op kunnen zoeken van de weerstand R_2 als R_1 en de gewenste totale weerstand R gegeven zijn.

Voorbeelden

Stel een weerstand moet de helft worden (wiskundig $R = 0,5 R_1$) dan moeten we volgens de tabel een weerstand van $1 \cdot R_1$ parallel schakelen. Dat betekent: de parallelschakeling met een even grote weerstand.

Maar als een weerstand R_1 10% kleiner moet worden ($R = 0,90 R_1$)? De tabel geeft nu niet direct de oplossing. In de kolom voor R is de waarde 0,90 R_1 niet te vinden. Als we 0,91 R_1 nemen, is de fout of afwijking niet bijzonder groot. We moeten dan een weerstand van 10 R_1 parallel schakelen. (In het voorbeeld $R_1 = 100 \Omega$ hebben we dat al een keer gedaan. Als een 470 Ω -weerstand 10% naar beneden moet, oftewel 0,90 van z'n oorspronkelijke waarde moet krijgen, dan schakelen we een weerstand van $10 \cdot 470 = 4700 \Omega$ parallel).

Stel een weerstand van 470 Ω moet 25% lager worden. dat betekent terugbrengen tot 75% van de oorspronkelijke waarde. Uit de tabel lezen we af, dat we een R_2 van $3 R_1 = 3 \cdot 470 = 1410 \Omega$ parallel moeten schakelen. Meet dit na.

Vragen

Welke weerstand moeten we parallel met een 1 k Ω -weerstand schakelen om een parallelschakeling van 250 Ω te krijgen?

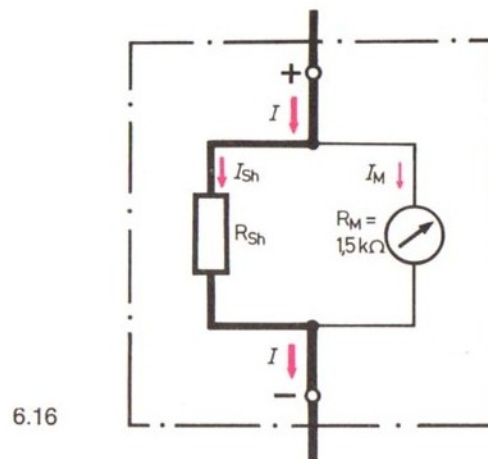
En welke met 4,7 Ω om de weerstand (ongeveer) 3,5 k Ω groot te maken?

Een weerstand van 1000 Ω moet door een parallel te schakelen weerstand worden verlaagd tot 750 Ω . Welke parallelweerstand nemen we?

6.7.2 De shunt

Het zal nu wel duidelijk zijn waarom een stroomsterktemeter in serie moet liggen met de andere elementen van de stroomkring. Door de ampèremeter moet de hele stroom lopen. Allemaal goed en wel, maar het betekent dat het ingebouwde meetwerk van de ft-spanningsmeter niet te gebruiken is. Maar met een trucje lukt het om het meetwerk dat bij een stroom van 0,333 mA = 333 μ A een volledige uitslag geeft, als stroomsterktemeter te gebruiken met een maximum van 100 mA. De truc is heel eenvoudig: we delen de stroom die op de (+)bus de meter binnenkomt en die bij de (-)bus weer verlaat in twee deelstromen.

De voor de volledige uitslag niet benodigde stroom leiden we met een parallelweerstand langs het meetwerk. Aftakken, leiden langs, delen, zijn vertalingen voor het Engelse werkwoord „to shunt“. De technicus noemt de weerstand die het grootste deel van de stroom langs de gevoelige meter voert: de shunt. In formules gebruiken we het symbool R_{Sh} . Fig. 6.16 toont een dergelijke shunt die parallel met het meetwerk loopt.



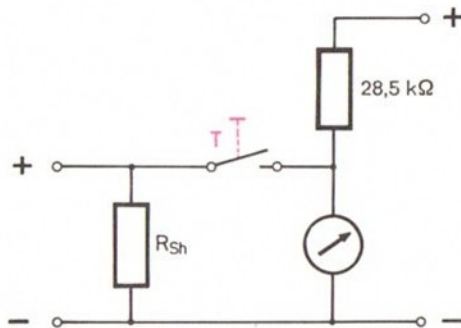
Schakelen we nu de stroomsterktemeter in een stroomkring en treden er b.v. spanningsveranderingen op, dan zal ook de stroomsterkte veranderen. Het gevolg is dat ook de deelstromen I_{Sh} en I_m overeenkomstig sterker of zwakker worden. Daarmee biedt de door het meetwerk vloeiende stroom I_m een overeenkomstig verkleind, maar getrouw beeld van de totale stroomsterkte.

Hoe groot moet nu de shunt voor de ft-meter zijn als de wijzer bij 100 mA volledig dient uit te slaan?

Zoals reeds eerder gezegd, bedraagt de inwendige weerstand R_m van het meetwerk ongeveer $1,5 \Omega$ en de stroomsterkte die nodig is om de wijzer volledig te doen uitslaan, heeft een waarde van $0,333 \text{ mA}$. De shunt moet dus zo groot zijn, dat er bij een volledige wijzeruitslag een stroom doorheen vloeit van $100 \text{ mA} - 0,333 \text{ mA} = 99,667 \text{ mA}$. Het resultaat van een berekening is dat de shunt een weerstandswaarde van ongeveer 5Ω moet hebben.

$$\frac{R_{Sh}}{R_M} = \frac{I_M}{I_{Sh}} ; R_{Sh} = R_M \cdot \frac{I_M}{I_{Sh}}$$

$$R_{Sh} = 1,5 \text{ k}\Omega \cdot \frac{0,333 \text{ mA}}{99,667 \text{ mA}} \approx 5 \Omega$$



6.17

Deze wordt parallel met het meetwerk geschakeld als we de rode knop indrukken. Fig. 6.17 toont de schakeling. Deze knop is noodzakelijk omdat we de meter ook gebruiken in serie met de $28,5 \text{ k}\Omega$ -voorschakelweerstand voor het meten van spanningen en daarbij mag de parallelweerstand niet in de stroomkring zijn opgenomen.

In fig. 6.17 zien we dat bij aansluiting van de stroomsterktemeter reeds een stroom door de shunt loopt zonder dat de wijzer uitslaat (zie hoofdstuk 3.1). Uit de tekening blijkt ook dat de (-)bus voor de stroomsterktemeting en de (-)bus voor de spanningsmeting naar hetzelfde punt in de schakeling voeren. Het voordeel is, dat we slechts 1 meetkabeltje hoeven om te schakelen als we afwisselend stroomsterktes en spanningen willen meten.

6.7.3 Vergroting van het meetbereik

Vaak is het bereik tot 100 mA van de ampèremeter niet groot genoeg. Zonder veel problemen kunnen we het bereik vergroten tot 1 ampère. Het is duidelijk dat we daarvoor de shunt moeten veranderen. Deze moet nog kleiner worden. Hiernaast zien we de berekening hoe groot de waarde van de nieuwe shunt voor 100 mA en voor 1 A dient te zijn. Theoretisch is het mogelijk de shunt voor 100 mA en voor 1 A verwisselbaar te konstrueren of dat met een schakelaar van de ene op de andere kan worden omgeschakeld zoals dat bij meters met meer meetbereiken het geval is. Voor onze doeleinden hebben we genoeg aan een tweede shunt, die we de uitwendige shunt zullen noemen.

Deze is parallel geschakeld met de inwendige shunt van 5 Ω. Zoals de nevenstaande berekening laat zien, moet de hele shunt (dus inwendige en uitwendige) een waarde hebben van ongeveer 0,5 Ω.

De inwendige shunt is 5 Ω, de parallel te schakelen weerstand moet dan ongeveer 0,6 Ω zijn. Dit kunnen wij in tabel 6.15 vinden. In fig. 6.18 zien we dat we de uitwendige shunt in de (+) en (-) bussen van de stroomsterktemeter moeten steken. Op de voorkant van de meter is daarom met streepjes het symbool getekend voor een weerstand met de aanduiding „1 Amp“.

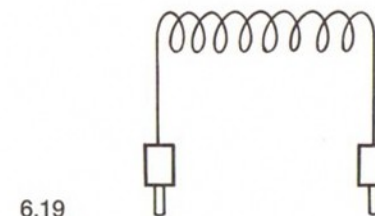
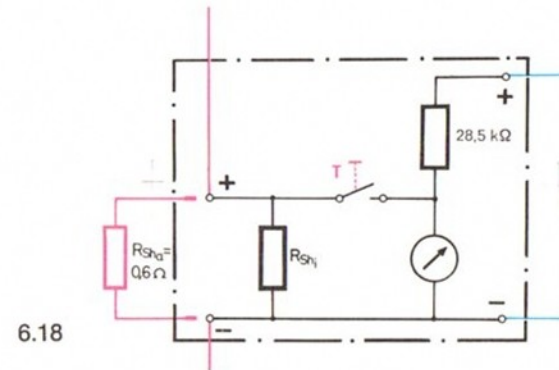
De uitwendige shunt maken we zelf (zie fig. 6.19).

In de kassette van de hobbylabordoos zit een blanke draad, dit is een zogeheten weerstandsdraad. Eén meter daarvan heeft een weerstand van 2,45 Ω. Deze waarde is, vergeleken met een koperdraad van dezelfde lengte, krankzinnig hoog. Om een waarde van 0,6 Ω te krijgen hebben we – volgens nevenstaande berekening – een stuk van ongeveer 25 cm nodig.

Het zal niet moeilijk zijn met de besproken formules een shunt te berekenen en te maken voor een meetbereik met een volledige wijzeruitslag bij 2 A. Plak een klein etiketje op de shunts met de aanduiding van hun meetbereik.

$$R_{sh \text{ totaal}} = 1500 \Omega \cdot \frac{0,333 \text{ mA}}{999,67 \text{ mA}} = 0,499 \Omega$$

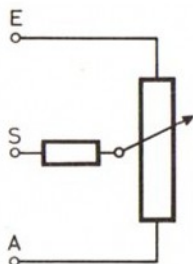
Totale shunt voor 1 A $\approx 0,5 \Omega$



$$2,45 \Omega \cong 100 \text{ cm}$$

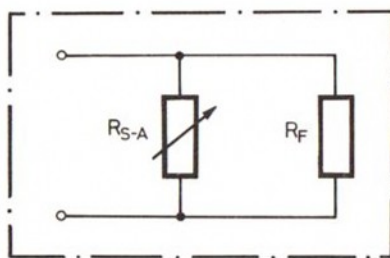
$$1 \Omega \cong 100 \text{ cm} : 2,45 = 40,82 \text{ cm}$$

$$0,6 \Omega \cong 0,6 \cdot 40,82 \text{ cm} = 24,5 \text{ cm}$$



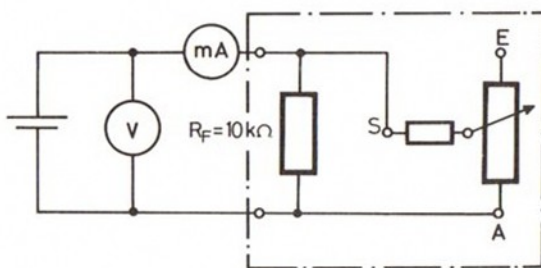
6.20

6.21



$$R_{St} = R_{S-A} \parallel R_F$$

6.22



6.23

Stand van de draaiknop	voor $R_F = 10 \text{ k}\Omega$		
	U in V	I in mA	R in $\text{k}\Omega$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

6.7.4 Parallelweerstand bij de regelbare weerstand

We hebben reeds gezien hoe we de potentiometer bouwstenen als regelbare weerstand konden gebruiken. Zonder onderbrekingen konden we de waarde instellen van $0,15 \text{ k}\Omega$ tot $1,15 \text{ k}\Omega$, resp. van $1 \text{ k}\Omega$ tot $11 \text{ k}\Omega$ (fig. 6.20). Na wat besproken is over de parallelschakeling ligt het voor de hand de hoge weerstand van de $10 \text{ k}\Omega$ -potmeter naar beneden te drukken door een daartoe geëigende vaste weerstand R_F parallel te schakelen. Dat kan b.v. als in fig. 6.21 is weergegeven. De vaste waarde R_F en de instelbare waarde R_{S-A} leveren met elkaar de eindwaarde van de regelbare weerstand R_{St} . Deze parallelschakeling kunnen we als een tweepool in elke willekeurige schakeling opnemen.

Proef

We bouwen schakeling 6.22 en meten voor de berekening van de weerstandswaarden allereerst de stroomsterkte en de spanning als de knop resp. geheel naar links en naar rechts gedraaid staat. De resultaten noteren we in tabel 6.23.

Alle aangegeven standen daartussen zijn natuurlijk ook zonder meer te meten. De vraag is of we misschien aan minder waarden genoeg hebben. Wie de overtuiging heeft dat de bijbehorende karakteristiek (of curve) een rechte is, heeft in feite genoeg aan de waarden van stand 1 en 10. Wie er niet zeker van is, meet bovendien nog een keer in het midden van het instelbereik, laten we zeggen stand 5,5.

Als dit punt op de rechte verbindingslijn tussen stand 1 en 10 ligt, dan nemen we aan dat onze veronderstelling juist is. Maar als de waarden van stand 5,5 niet op de rechte liggen, dan moeten we alle 10 de punten meten. Het is inderdaad eenvoudiger om u zelf met wat rekenwerk te overtuigen. Zet de waarden van tabel 6.23 uit in diagram 6.24. De curve die we zo krijgen, is het „ijkdiagram“ van de nieuwe potentiometer.

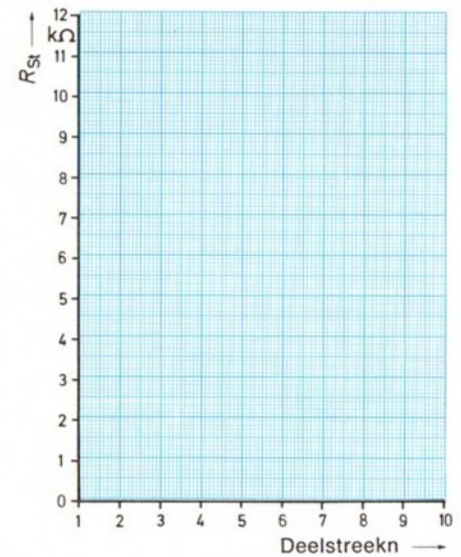
Resultaat

Zoals verwacht, wordt de totale weerstand van de regelbare weerstand R_{st} kleiner door het parallel schakelen van een vaste weerstand R_F .

Slotconklusie

Met behulp van geschikte weerstanden die we parallel schakelen zijn de waarden van regelbare weerstanden binnen bepaalde grenzen te verkleinen. Voltooi het ijkdiagram met de karakteristieken voor de parallel geschakelde vaste weerstanden $R_F = 4,7 \text{ k}\Omega$ en $R_F = 1 \text{ k}\Omega$. Zet naast elke curve de bijbehorende waarde, zodat we later uit het diagram de parallel te schakelen weerstanden kunnen aflezen.

6.24



7 Energiebronnen

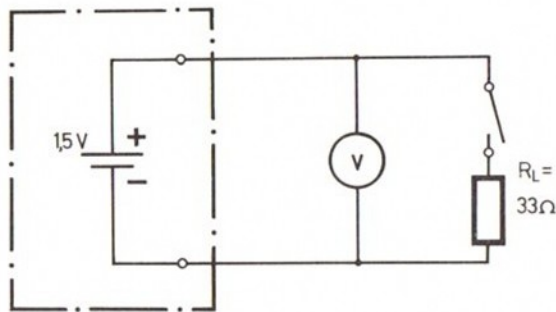
Wat de „energieleveranciers“ betreft zijn er nogal wat vragen waar we tot nu toe niet aan toe zijn gekomen. Waarom daalt b.v. de klemspanning wanneer een energieverbruiker een batterij of een trafo zwaar belast? De klemspanning is de spanning die we op de polen van de energiebron meten als deze niet wordt belast. Dit hoofdstuk zal precies op bovenstaande vraag en andere problemen ingaan.

7.1 Algemeen

Voor de volgende proeven moeten we drie batterijen aanschaffen – een mono-, een baby- en een mignoncel (zie pag. 22).

Wie zich tot de kernpunten wil beperken, kan volstaan met de babycel en de trafo. Wie op dit moment niet over batterijen beschikt, slaat dit hoofdstuk over en neemt het later alsnog door.

Wie van plan is binnenkort een grotere stroom- en spanningsmeter met verschillende instelbare meetbereiken aan te schaffen kan eveneens dit hoofdstuk overslaan tot hij in het bezit is van deze zogeheten universeelmeter. Lees alvorens een dergelijk meetapparaat te kopen, eerst het hoofdstuk „kernpunten bij de koop van universeelmeters“ in het aanhangsel.



Babycel

7.1

7.2 Oriënterende metingen

Proef

Bouw schakeling 7.1; wie geen drukknop heeft kan het in- en uitschakelen ook doen door een bruggetje in de bussen te steken en het er weer uit te halen. Als spanningsbron gebruiken we bij onze eerste proef een babycel, die b.v. uit de batterijhouder is te halen.

Houd de wijzer van de meter in het oog en schakel afwisselend de 33 Ω -weerstand in en uit. We stellen dan vast dat de wijzer iets verder uitslaat als de weerstand niet is ingeschakeld. Hoe groot is dat verschil nu in volts uitgedrukt?

De technicus zegt: „hoe groot is het spanningsverschil (verschil tussen twee spanningen) tussen de nullast en een belasting met 33 Ω ?“. Het woord spanningsverschil kan hier gemakkelijk verward worden met „potentiaalverschil“. We zullen daarom voor spanningsverschil het woord „spanningsverlies“ hanteren. Waarom blijkt uit het volgende.

De meetresultaten noteren we in tabel 7.2. Voor de nullastspanning U_0 is een aparte kolom. De nullastspanning – het woord zegt het al – is de spanning die de meter aanwijst als er op de batterij niets aangesloten is. (De geringe belasting door de inwendige weerstand van 30 k Ω van de voltmeter, laten we buiten beschouwing).

In kolom U_1 noteren we de gevonden spanningswaarden als de belasting 33 Ω is. In de volgende kolom staat ΔU_1 . Dit driehoekje is de Griekse letter delta (Δ) en betekent: verschil. In deze kolom noteren we het verschil tussen de beide gemeten waarden U_0 en U_1 .

7.2

Belasting R_L in Ω	geen	33		10		4,7	
Bron	U_0 in V	U_1 in V	ΔU_1 in V	U_2 in V	ΔU_2 in V	U_3 in V	ΔU_3 in V
baby-oud cel nieuw							
mono-oud cel nieuw							
mignon-oud cel nieuw							
stand midden trafo begin draaiknop eind							

Aanwijzing

In onze eerste proef is niet een exacte bepaling van de „absolute“ spanningswaarden het hoofddoel, maar gaat het veel meer om de grootte van ΔU_1 . We herhalen daarom onze proef met schakeling 7.1 een aantal keren door het indrukken van de knop om zo nauwkeurig mogelijk het verschil te kunnen bepalen.

We vervangen de 33 Ω -weerstand door een 10 Ω -weerstand en herhalen de proef. Laat de 10 Ω -weerstand niet langer ingeschakeld staan dan strikt noodzakelijk is om de spanning af te lezen. Anders ontwikkelt de weerstand te veel warmte.

Tot slot doen we dezelfde proef voor de 4.7 Ω -weerstand (heel kort!).

Resultaat

Het was te verwachten dat het spanningsverlies ΔU met stijgende belasting (kleiner wordende belastingsweerstand R_L) toeneemt. Dit verschijnsel kennen we al, alleen de benaderingswijze is nieuw. We weten uit de praktijk dat elke keer als we een tweede gloeilamp of een motor parallel schakelden met een reeds aangesloten gloeilamp, de helderheid van die lamp verflauwde. De spanning daalde.

Andere uitdrukkingen voor dit verschijnsel zijn: de spanning valt terug, valt weg of de spanning zakt in elkaar.

Het verschijnsel treedt niet alleen op bij batterijen en trafo's, ook wanneer we eerst één lamp in de kamer aan hebben en dan tegelijk alle lampen en andere stroomtrekkers (verbruikers) aanzetten, zien we de lamp even verflauwen.

Het volgende punt is dat dit ΔU eigenlijk een ongewenst verschijnsel is. Wie meer lampen aandoet, heeft juist meer licht nodig en wil niet dat de lampen minder helder gaan branden. We noemen ΔU het spanningsverlies of de verliesspanning.

Uitbreiding van het experiment

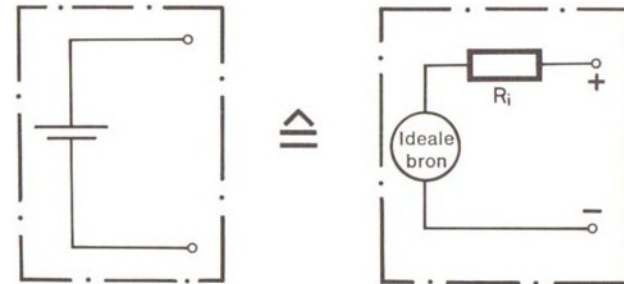
We gaan nu eens kijken of een monocol die veel groter is dan een babycol, dezelfde kwaal vertoont. En wat doet de veel kleinere mignoncel. Wie bijzonder geïnteresseerd is, kan in zijn onderzoek ook nog de kwaliteitsverschillen betrekken tussen de batterijen. Er zijn goedkope batterijen voor zaklantaarns en duurdere voor transistorradio's e.d. Tenslotte is er ook nog „heavy duty“ kwaliteit voor elektrische motoren. Verricht in elk geval nog enige metingen met $R_L = 4,7 \Omega$, wel kort houden!

7.3 Inwendige weerstand van energiebronnen

We noemden een batterij of een trafo – al naar het ons het beste uitkwam – een energiebron, een spanningsbron of een stroombron. In de volgende beschouwing praten we kortweg over „bron“.

Uit de proeven is gebleken dat alle bronnen ditzelfde „belastingsgedrag“ vertonen. Hoe is dit gedrag nu te verklaren? We zullen ons daartoe niet verdiepen in de chemische processen in batterijen. Dat is vooral een probleem voor de elektro-chemicus. Wij hebben meer aan een benadering waarmee we, zo eenvoudig mogelijk, een beeld kunnen geven van het gedrag van de bronnen als we elektrische stroomkringen behandelen en berekenen. Voor ons doel is een eenvoudige weergave meer dan voldoende.

Een dergelijke simpele voorstelling van zaken zien we in de rechterhelft van fig. 7.3.



7.3

We denken ons een ideale bron (Ideaal Q), die bij elke willekeurige belasting steeds dezelfde spanning houdt. Met de bron is een weerstand in serie geschakeld die van buitenaf niet is te veranderen. Deze heet daarom de inwendige weerstand R_i van de bron. De combinatie vormt een tweepool.

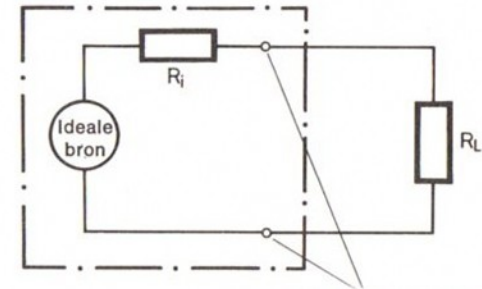
De verbinding tussen de ideale bron en de inwendige weerstand is natuurlijk niet te verbreken of op een andere manier voor ons toegankelijk. In dat geval zouden we een greep kunnen krijgen op een ideale bron, maar die bestaat helaas niet. De tweepool kan elektrische energie afgeven. We noemen hem daarom een „aktieve tweepool“ in tegenstelling tot de „passieve tweepool“ die geen energie afgeeft, b.v. twee in serie geschakelde weerstanden.

We nemen nu het volgende aan: „elke echte bron is voor te stellen als een ideale bron met een voorgeschakelde inwendige weerstand“. Deze hypothese gaan we nader onderzoeken. In gedachten zetten we een gesloten stroomkring op, bestaande uit een ideale bron, een inwendige weerstand R_i en een belastingsweerstand R_L . Zie fig. 7.4. Deze figuur veranderen we in een vorm die we al kennen, namelijk die van de spanningsdeler, zoals getekend in fig. 7.5.

De steeds gelijkblijvende spanning van de ideale bron U is gelijk aan de som van de beide deelspanningen U_i en U_L . Deze laatste spanning is de enige die we ook echt kunnen meten. Dat gebeurt op de beide aansluitingen die we tot nu toe als (+) en (-)pool hebben leren kennen bij de batterij of de trafo. Omdat de belasting (lampen, motoren, weerstanden) op deze beide aansluitingen vaak met klemmen (of klemmetjes) wordt aangesloten, heten ze aansluitklemmen. Meestal spreekt men kortweg van klemmen. De spanning die er op staat hebben we met U_L aangegeven, we kunnen die ook de klemspanning U_{kl} noemen. Maar wat moeten we nu eigenlijk met dit hele verhaal over inwendige weerstand als we toch niet weten hoe hoog de spanning van de ideale bron is? Toch helpt dit uitgangspunt ons. We weten namelijk dat de verhouding van de deelspanningen U_i en U_L gelijk is aan de verhouding tussen de deelweerstand R_i en R_L .

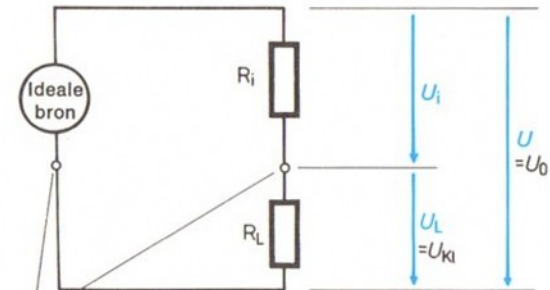
Daar is iets mee te doen, zult u denken. Als we R_L 1000 of 100 keer zo groot maken als R_i , dan wordt de deelspanning U_i zo klein vergeleken met U_L , dat we die kunnen verwaarlozen.

Dat is juist en b.v. het geval wanneer we de voltmeter in plaats van de belastingsweerstand op de klemmen zetten. De spanning



7.4

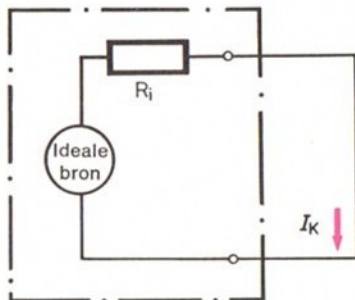
klemmen van de tweepool



7.5

klemmen

batterij



7.6

die de voltmeter aanwijst, is praktisch de spanning van de „ideale“ spanningsbron. Deze hoeft namelijk voor de meting niets te doen, er wordt nauwelijks energie verbruikt. We zouden kunnen zeggen, de energieleverancier staat in „z'n vrij“, op de klemmen staat de nullastspanning.

Maar voor de beschrijving van een werkelijke bron moeten we ook de waarde van de inwendige weerstand R_i weten. Hoe komen we aan die waarde?

Het extreme (uiterste) geval van belasting van onze bron schijnt dat te zijn, waarbij R_l nul is. De bron wordt kortgesloten. In fig. 7.6 is dit weergegeven, door de stroomkring loopt nu de grootste mogelijke stroom met als enige weerstand R_i . Als we nu de stroomsterkte meten, kunnen we met de Wet van Ohm de waarde van R_i uitrekenen.

Alvorens we ons afvragen hoe we de meting moeten doen, een kleine zijspgong: welk elektrisch vermogen levert een batterij in een schakeling volgens fig. 7.6? U zult dat misschien niet zonder meer willen geloven: geen! We weten dat er een spanning is, dat er een stroom loopt – en toch geen energieverbruik? Er wordt wel een elektrisch vermogen afgenomen, maar alleen door de inwendige weerstand R_i . Maar daar kunnen we niet bij komen. Tussen de voor ons toegankelijke klemmen ligt praktisch geen weerstand, we hebben de bron namelijk kortgesloten. Dat betekent dat er tussen de klemmen ook geen spanning kan optreden, maar waar geen spanning heerst kan ook geen vermogen worden afgenomen dat b.v. in warmte wordt omgezet.

7.7

Bron		U_o in V	I_K in A	R_i in Ω
baby- cel	oud			
	nieuw			
mono- cel	oud			
	nieuw			
mignon- cel	oud			
	nieuw			
trafo stand v/d draaiknop	begin			
	midden			
	eind			

Laten we nu de meting van de kortsluitingsstroom I_K ter hand nemen. We doen dat voor verschillende batterijen en voor de trafo in de laagste, de middelste en de hoogste stand. De resultaten noteren we in tabel 7.7. Gebruik in elk geval de zelfgemaakte shunt voor het 1 A-meetbereik.

Nu – zo denkt u misschien – kunt u ook de waarde van R_i nauwkeurig verkrijgen. Maar we mogen niet vergeten dat ook de ampèremeter een inwendige weerstand heeft. Deze bedraagt – als we met het 1 A-bereik werken – ongeveer $0,5 \Omega$. Om heel precies te zijn: we moeten ook nog de weerstand van de verbindingskabeltjes en de overgangswaerstand tussen stekkers en bussen in aanmerking nemen.

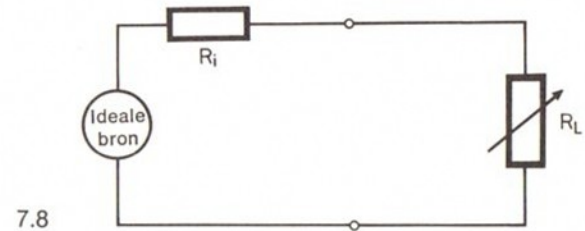
In elk geval verschaft de meting van de stroomsterkte ons een redelijke benadering van de werkelijke grootte van R_i en daar hebben we voldoende aan. Reken R_i uit, in zoverre de kortsluitstroom is te meten en noteer de gevonden en berekende waarden in tabel 7.7.

Wie de waarde van de inwendige weerstand exact wil bepalen, moet een andere methode gebruiken, die reeds besproken is in hoofdstuk 5.21. We schakelen een daartoe bruikbare, regelbare weerstand op de klemmen, zie fig. 7.8. De karakteristiek van de weerstand kennen we. We veranderen R_L net zolang in waarde tot U_L precies de helft van de vooraf gemeten nullastspanning U_o is. Nu moet R_L ook even groot zijn als R_i . Deze methode is voor ons alleen theoretisch interessant, de instelweerstand waarover we beschikken heeft nl. een kleinste waarde van 1 k Ω . De batterijen hebben – gelukkig – een inwendige weerstand in de grootte van minder dan 1 Ω tot enkele Ohms. We moeten ons helaas met een wat minder elegante, maar te realiseren methode behelpen. Bereken de waarde van R_i met behulp van de metingen verzameld in tabel 7.2 en de formule:

$$R_i = R_L \cdot \frac{\Delta U}{U_L}$$

Noteer de waarden in tabel 7.9 en bepaal het gemiddelde. Op deze wijze hebben we de gemiddelde waarde voor de inwendige weerstand van een energiebron verkregen.

Veel belangrijker is het dat we met de proeven een inzicht hebben gekregen waarom bij de keus van een ongeschikte energiebron er steeds moeilijkheden ontstaan met het op peil blijven (konstant houden) van de spanning wanneer de grootte van de belasting verandert. Helaas hebben alleen „ideale“ spanningsbronnen een inwendige weerstand $R_i = 0$ en die zijn er van nature niet.



7.9

Belasting R_L in Ω	33	10	4,7	Gemiddelde waarde R_i in Ω
Bron	R_i in Ω	R_i in Ω	R_i in Ω	
Baby- cel				
oud nieuw				
Mono- cel				
oud nieuw				
Mignon- cel				
oud nieuw				
Trafo stand draaiknop				
begin midden eind				

7.4 Konstante spanning

Nu zegt het op zichzelf niet zoveel dat een energiebron een kleine of een grote inwendige weerstand heeft. Waar het om gaat is de verhouding tussen inwendige weerstand en de belastingsweerstand.

Als we voor onze proeven met fishertechniek een 6 V auto-accu nemen, dan mogen we zijn inwendige weerstand verwaarlozen, omdat die bijzonder klein is. Als we er meer lampen, een motor e. d. op aansluiten, dan zal toch de spanning konstant blijven. Maar in de auto is het anders. Zet eerst de koplampen aan en start daarna de motor. Nu speelt de inwendige weerstand wel degelijk een grote rol. Vooral als de motor koud is, zal de startmotor zoveel stroom van de accu eisen, dat de lampen niet genoeg krijgen. Ze gaan zwakker branden.

Startmotor en lampen aan de ene kant en de inwendige weerstand aan de andere kant vormen een spanningsdeler (zie fig. 7.5). Het gaat dus niet om de absolute grootte van de inwendige weerstand, maar om de relatieve, de verhouding tot de belastingsweerstand. Als de inwendige weerstand veel kleiner is dan de belastingsweerstand (wiskundig: $R_i \ll R_l$) staat bijna de hele bronspanning op de belastingsweerstand. De spanning blijft bijna konstant zolang we de belastingsweerstand niet zeer veel kleiner maken.

Met behulp van elektronische schakelingen wordt apparatuur gebouwd die er voor zorgt dat de klemspanning onafhankelijk van de belasting is. Dit geldt echter alleen voor het bereik dat op het apparaat is aangegeven, b.v. tussen 0 en 3 A.

7.5 Konstante stroomsterkte

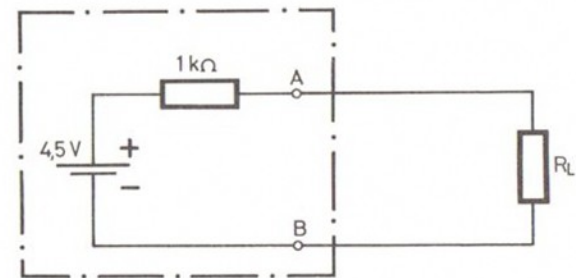
Voor vele doeleinden is een bron nodig met precies het tegenovergestelde effect als dat van de konstante spanningsbron. Men wil dan dat steeds dezelfde (of bijna dezelfde) stroom door een scha-

keling loopt, ongeacht het feit of de weerstand verandert. Hoe kan dat? Daartoe wordt de inwendige weerstand van een spanningsbron kunstmatig verhoogd. Een andere mogelijkheid is met elektronische elementen een trafo te bouwen die een konstante stroom levert.

Proef

Als bron nemen we een 4,5 V batterij of de trafo die we op de hoogste spanning zetten. We nemen nu de 1 k Ω -weerstand als kunstmatige inwendige weerstand op in de schakeling van fig. 7.10. De aansluitingen A en B beschouwen we als de klemmen van de stroomkonstante (konstante stroombron). Achtereenvolgens schakelen we de weerstanden van 100 Ω , 33 Ω , 10 Ω en 4,7 Ω op de klemmen en meten we de stroomsterkte. Wat gebeurt er als we de stroomkonstante kortsluiten?

Noteer de gemeten waarde in een zelf te ontwerpen tabelletje. In alle gevallen zal de stroomsterkte nagenoeg gelijk zijn. Dit is gemakkelijk in te zien, de genoemde weerstanden zijn zeer klein in verhouding tot de kunstmatige inwendige weerstand R_i van 1 k Ω .



7.10

stroomkonstante

Belangrijk is ook dat dit apparaat kortsluiting „vast“ is; als de klemmen A-B worden kortgesloten, dan is de stroomsterkte maar 10% groter dan bij een belasting met $100\ \Omega$.

Het zal u niet ontgaan zijn dat het grootste deel van de spanning die de „ideale“ stroombron levert op de inwendige weerstand staat, anders gezegd het grootste spanningsverlies vindt over deze weerstand plaats. De spanning die tussen de klemmen A en B staat, moet dan natuurlijk veel kleiner zijn. Dit geldt natuurlijk alleen als de belastingsweerstand klein zijn in vergelijking met de inwendige weerstand. Elektronische stroomkonstanten werken anders, daar verandert automatisch de waarde van de inwendige weerstand R_i of de spanning van de 'ideale' bron, afhankelijk van de belastingsweerstand die wordt aangesloten.

Maar ook hier geldt: alleen wanneer R_L belangrijk kleiner is dan R_i blijft de stroomsterkte konstant.

7.6 Welke energiebron is de gunstigste?

Voor onze experimenten lijkt een energiebron die een konstante spanning afgeeft het beste. We kunnen dan het hele probleem van de spanningsveranderingen bij een wijziging van de belasting, vergeten. Wanneer we even afzien van kostbare elektronische apparaten, dan is een 6 V auto-accu een heel goede spanningsbron. Maar wat gebeurt er als we de klemmen of een deel van de aangesloten schakeling – al dan niet opzettelijk – kortsluiten? De schakeling begint te „roken“.

In een dergelijk geval is een konstante stroombron natuurlijk veel doelmatiger. De kortsluitingsstroom is namelijk niet veel groter dan de normale stroomsterkte bij belasting!

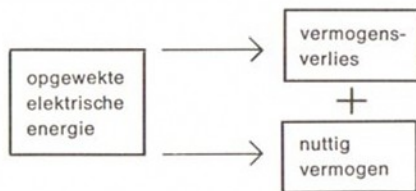
Om deze redenen moet men helaas bij de keuze van de energiebron altijd een compromis sluiten tussen de beide elkaar uitsluitende eisen. Voor experimentele doeleinden is een fischertechnik trafo b.v. heel geschikt. In het geval van kortsluiting kan er weinig gebeuren. Hetzelfde geldt voor batterijen. Accu's daarentegen zijn niet geschikt. Als nadeel is er het feit dat de spanning verandert als men de belasting wijzigt.

7.7 Vermogensverlies van een energiebron

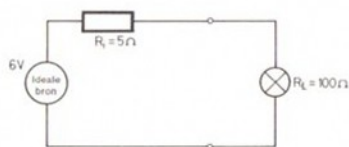
Misschien is het u al opgevallen bij de vorige proef of bij de kortsluitingsmeting dat de bron in het geheel geen of maar zeer weinig elektrisch vermogen naar buiten afgeeft, hoewel er in de stroomkring een sterke stroom liep. Van de hoge nullastspanning U_0 op de klemmen bleef maar weinig over.

De spanning U_i die op de inwendige weerstand komt te staan, kunnen we als „verloren spanning“ beschouwen, want we hebben er niets aan. Het ermee overeenkomend elektrisch vermogen is vermogensverlies en te berekenen met R_i en de spanning U_i . Het vermogen gaat in het inwendige van de batterij of de trafo verloren. Bij de batterij wordt het voor een deel en bij de trafo praktisch geheel in warmte omgezet.

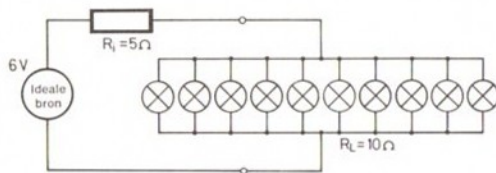
Het vermogen verbruikt door de inwendige weerstand van een energiebron heet vermogensverlies.



7.11

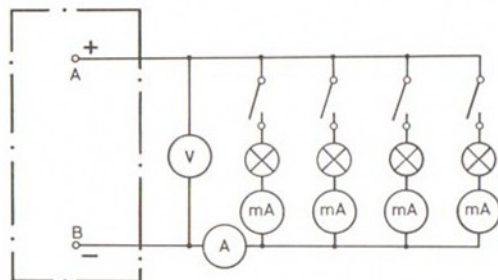


7.12



7.13

trafo of batterij



7.14

Elektrische stroomkringen bouwen we niet om een zo hoog mogelijk vermogensverlies te laten ontstaan. Als we een lamp op een batterij laten branden, dan willen we een zo'n klein mogelijk verlies in vergelijking met het nuttig vermogen, dat door de lamp wordt omgezet in licht en warmte.

Ook hier is niet de absolute grootte van het vermogensverlies belangrijk, maar de verhouding tussen verlies en nuttig vermogen (fig. 7.11). We nemen nu een actieve tweepool, b.v. bestaande uit 4 batterijen met totaal $U_o = 6 \text{ V}$ en $R_i = 5 \Omega$. Hierop sluiten we een passieve tweepool aan. Er zijn nu twee uitersten denkbaar. Ze zijn reeds eerder besproken:

$$R_i \gg R_L \text{ of } R_i \ll R_L$$

In woorden: R_i aanzienlijk groter dan R_L of R_i aanzienlijk kleiner dan R_L .

Fig. 7.12 geeft het tweede geval weer. Hier is het spanningsverlies (0,3 V) klein en het mag tegenover de klemspanning (5,7 V) zonder meer worden verwaarloosd. Het nuttig vermogen dat van de klemmen wordt afgenomen is $P_N = U_L^2 / R_L = 5.7^2 : 100 = 0,32 \text{ W}$. Het vermogensverlies is daarentegen $0,3^2 : 5 = 0,02 \text{ W}$.

In gedachten schakelen we nu – fig. 7.13 – 10 van dergelijke lampen (elk 100Ω) parallel aan de bron, de totale weerstand is 10Ω . Hoe hoog is de klemspanning en hoe groot is het vermogen dat de lampen afnemen? En het verlies? We kunnen uitrekenen dat elk van de lampen nog maar een nuttig vermogen van $0,16 \text{ W}$ afneemt. Terwijl 1 lamp $0,32 \text{ W}$ afnam. Het nuttig vermogen (rendement) per lamp daalt met het toenemen van het aantal lampen (zie ook hoofdstuk 6.6).

Maak zelf een tabel voor het noteren van de spanning op de klemmen A en B, de gemeten stroomsterktes en de berekende rendementen.

7.8 Weerstandsaanpassing

In de vorige proef zagen we dat het nuttig vermogen per lamp wel daalt met toenemend aantal, maar dat tevens het totale nuttige vermogen toeneemt.

Maar we weten ook dat het nul wordt als we $R_L = 0$ maken, anders gezegd als we de klemmen kortsluiten.

Op grond daarvan komen we tot de volgende redenering.

Stel dat we in fig. 7.13 steeds meer lampen parallel schakelen, dan zal bij een bepaald – nog onbekend – aantal lampen het totale nuttige vermogen niet meer toenemen, maar gaan dalen. Oneindig veel lampen hebben een weerstand $R_L = 0$ en dan zou er geen nuttig vermogen meer worden afgegeven. Op welk punt is nu het maximum vermogen van de batterij af te nemen? Met behulp van een truc kunnen we dit punt bepalen.

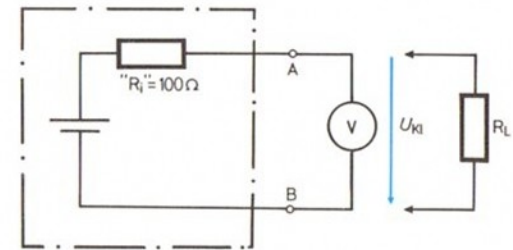
Proef

Een ideale spanningsbron voor dit experiment is een batterij of een trafo waarvan we de inwendige weerstand vergroten tot $100\ \Omega$. Daardoor speelt de werkelijke inwendige weerstand van een paar ohm geen rol meer. In fig. 7.15 is een en ander weergegeven. De eigen inwendige weerstand van de batterij of de trafo wordt verwaarloosd en is ook niet getekend.

Meet nu eerst de nullastspanning U_o . Dan bepalen we de klemspanning U_{kl} en de stroomsterkte I voor de in Tabel 7.16 aangegeven belastingsweerstand R_L .

We berekenen nu voor de elk op hun beurt aangesloten belastingsweerstand hoe veel nuttig vermogen P_N zij van de klemmen A en B hebben afgenomen.

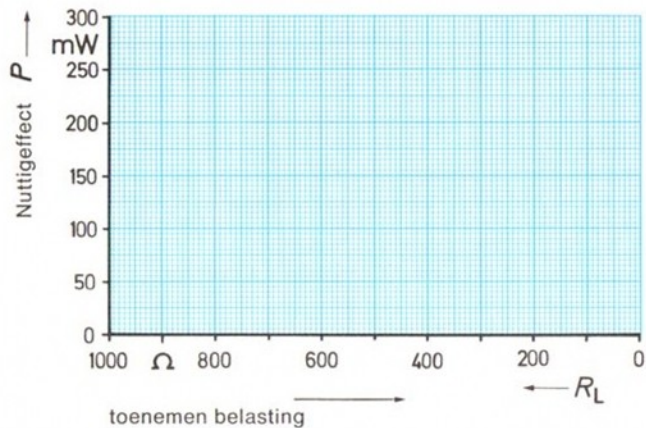
7.15



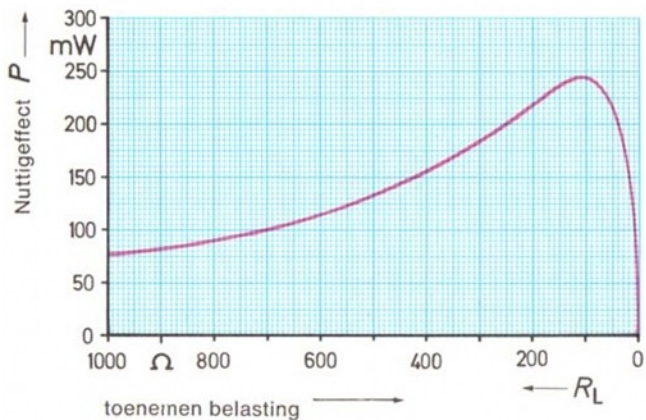
Bron met $100\ \Omega$ inwendige weerstand

7.16

R_L in Ω	U_{kl} in V	I in mA	$P_N = U_{kl} \cdot I$ in mW
0	$U_o =$	0	0
10			
33			
48 (33 + 10 + 4,7)			
82 (100 470)			
91 (100 1000)			
100			
110 (100 + 10)			
133 (100 + 33)			
200 (100 + 100)			
320 (470 1000)			
1000			



7.17



7.18

De resultaten zetten we in diagram 7.17 uit.

We moeten dan een grafiek krijgen als in fig. 7.18 getekend. De hoogte van de curve zal alleen met de hoogte in fig. 7.18 overeenstemmen, als u toevallig een nullastspanning van 10 V heeft gekozen.

Probeer in fig. 7.18 de vermogenscurve te tekenen van een ideale spanningsbron met een $R_i = 0$.

Een dergelijke bron bestaat niet en bij enig nadenken over de curve die we zouden moeten tekenen blijkt dat ook, want bij het kortsluiten van de bron zou de stroom oneindig groot worden.

Resultaat

Uit het diagram blijkt dat de batterij zijn hoogste nuttige vermogen afgeeft wanneer de belastingsweerstand precies even groot is als de inwendige weerstand. Deze toestand noemt men de „weerstandsaanpassing“ en die is gelijk aan de „vermogensaanpassing“.

Misschien vindt u al deze beschouwingen niet zo zinvol, want wie belast een energiebron nu zo zwaar dat op de klemmen nog maar de helft van de nullastspanning staat? Zolang we met gloeilampen e. d. werken is dat wel zo. Hoewel de werking van de smeltzekering in het huisnet met het voorafgaande gemakkelijk is te begrijpen.

In de elektronika is de vermogensaanpassing juist bijzonder belangrijk. In hobby-labor 3 zal dan ook de nu wat theoretisch aandoende weerstandsaanpassing uitgebreid – en praktisch – aan de orde komen.

7.9 De veroudering van batterijen

Nieuwe batterijen hebben in het algemeen een kleine inwendige weerstand. Bij kortsluiting loopt er een zeer hoge kortsluitingsstroom I_K zoals we hebben gezien. Bij monocellen voor elektrische motoren kan de stroomsterkte tot boven de 10 A oplopen.

In het begin van het boek is al even aangestipt dat de spanning, die de vrije elektronen dwingt zich in één richting te bewegen, door chemische reacties in een batterij wordt opgewekt.

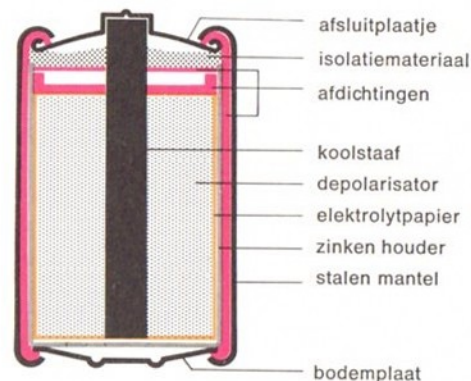
De stoffen die aan de reactie deelnemen, worden daarbij „verbruikt“. Het gevolg daarvan is weer dat de weerstand die de elektronen op hun weg door de batterij moeten overwinnen, steeds groter wordt.

Met andere woorden: de inwendige weerstand stijgt tijdens de levensduur van de batterij. Bij transformatoren is dat niet het geval, hun inwendige weerstand blijft konstant. Hoe langer een chemische spanningsbron wordt gebruikt – dat betekent belast – des te groter wordt de inwendige weerstand R_i .

Wie in de voorgaande hoofdstukken de metingen heeft gedaan voor oude en nieuwe batterijen zal dat zelf al aan de cijfers hebben kunnen zien. Als de batterij erg oud is dan meten we nog maar een kleine nullastspanning. Ook een auto-accu die bijna leeg is, kan nog wel het rode en het groene lampje op het dashboard doen branden, maar heeft niet genoeg energie meer om de startmotor in beweging te krijgen.

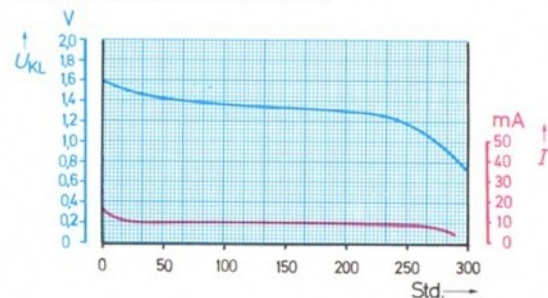
De technicus interesseert het niet zozeer waarom dat zo is, hij probeert er het beste van te maken.

Daarom wil hij graag weten hoe de spanning afneemt en de inwendige weerstand stijgt in de loop der tijd. Dat kan door belasting, of alleen als gevolg van de tijd, de veroudering. Het gemakkelijkst is een en ander in een grafiek af te lezen. Fig. 7.20 toont een dergelijk diagram voor een babycel, waarop een belastingsweerstand van 150Ω werd aangesloten. De klemspanning en de stroomsterkte werden permanent gemeten. Mocht u de proef zelf willen herhalen: de verkregen waarden kunnen iets afwijken van het diagram.



7.19

belasting met 150Ω , 6 uur per dag



7.20

Ter wille van de eenvoud is in diagram 7.20 niet alleen het verloop van de klemspanning “tegen de tijd” uitgezet, maar ook dat van de stroomsterkte. „Tegen de tijd” betekent dat op de horizontale as van het coördinatensysteem de tijdseenheden staan en op de loodrechte as de waarden van de spanning en de stroomsterkte.

Ter onderscheiding is de spanningsgrafiek met z'n schaalverdeling blauw getekend. Voor de stroomsterkte zijn beide rood gehouden. De schaalverdeling voor de stroom is niet links, maar rechts geplaatst.

Uit het gekombineerde diagram van spanning en stroomsterkte blijkt dat de spanning aan het begin iets afneemt en dan het grootste deel van de levensduur van de batterij bijna konstant blijft. (Er zijn batterijen die dit in nog veel sterkere mate hebben).

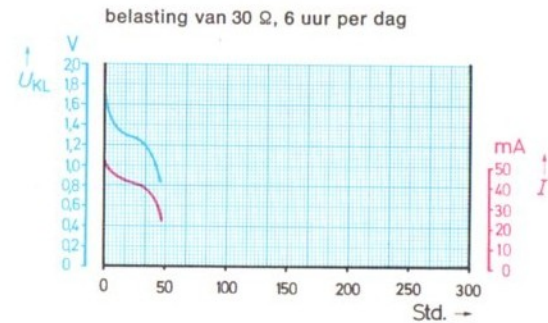
Ook de stroomsterkte blijft een aantal uren nagenoeg hetzelfde. Tenslotte dalen spanning en stroom snel – de batterij is op.

De belasting was 150Ω in diagram 7.20, naar verhouding loopt er weinig stroom. Blijft de grafiek hetzelfde als we de weerstand veel lager en daarmee de belasting veel hoger maken? Figuur 7.21 laat zien wat er gebeurt als de weerstand $R_l = 30 \Omega$. De klemspanning is – zoals te verwachten – iets lager, daar de stroomsterkte groter is en het spanningsverlies over R_l hoger. En hoe staat het nu met het vermogen? Waar het om gaat is eigenlijk niet het elektrisch vermogen – het produkt van spanning en stroomsterkte – maar veel meer wat de batterij nu presteert. Maar dat is het ook niet precies. Eenvoudig gezegd komt het hier op neer. We willen graag weten of één lamp inderdaad 10 keer zo lang brandt als 10 parallel geschakelde lampen van hetzelfde type.

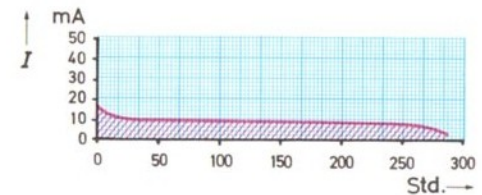
(De vraag is of in beide gevallen de nuttige arbeid die de batterij verricht gelijk blijft).

We weten, dat de elektrische arbeid het produkt is van spanning, stroomsterkte en tijd. We vergeten de berekening even, die is nogal lastig, omdat de grafieken van spanning en stroom geen rechte lijnen zijn.

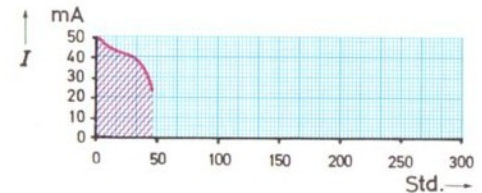
7.21



7.22



7.23



We beperken ons even tot het produkt van stroomsterkte en tijd. De stroom meten we in ampères (A), de tijd in uren (h). Het produkt is ampère-uren, afgekort „Ah“. Deze aanduiding vinden we niet op batterijen, maar wel op accu's. Voor batterijen rekenen we met kleinere eenheden, in plaats van Ah werken we met milliampère-uren = mAh.

En dan zien we iets prettigs: om de milliampère-uren te verkrijgen, hoeven we niet te rekenen. Ze zijn zo uit het diagram af te lezen. Het oppervlak onder de stroomsterkte-curve is een weergave van het produkt van mA en uren. In fig. 7.22 en 7.23 is het oppervlak weergegeven.

Wie het resultaat van de vergelijking van beide vlakken wil weten: bij de zwaardere belasting levert de batterij slechts 80% (waarvan?).

7.10 Testen van batterijen

Ook wie de besproken experimenten niet zelf heeft uitgevoerd, zal uit de tekst en de diagrammen wel begrepen hebben, dat de test van een batterij zonder belasting – door alleen de voltmeter op de polen te zetten – niets zegt.

Tenminste moet er een lampje worden gebruikt. Wie het echt goed wil doen moet de belasting voor monocellen anders kiezen dan voor mignoncellen. In het eerste geval moet er wellicht voor korte tijd een weerstand $4,7 \Omega$ worden aangesloten, in het tweede geval misschien 33Ω .

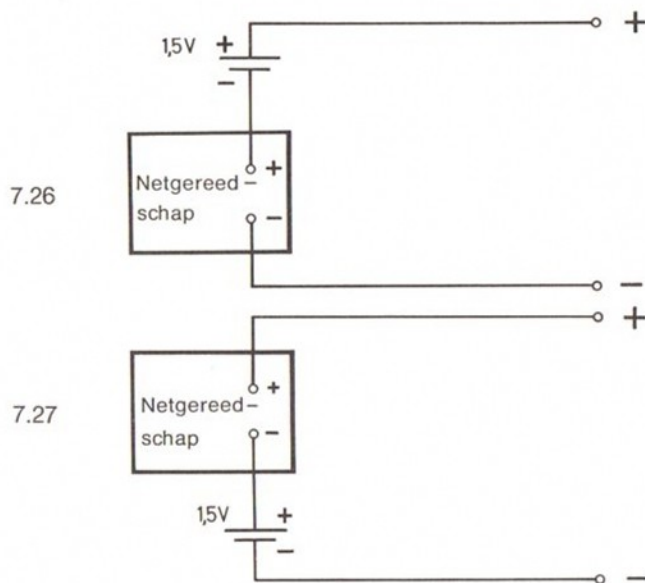
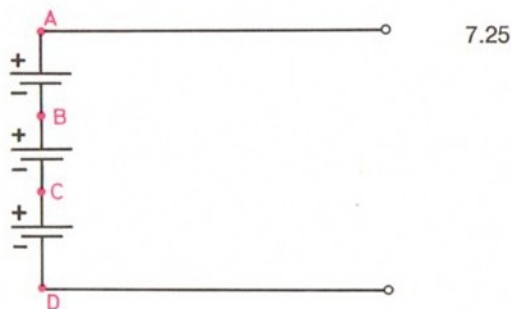
Verzamel zelf uw ervaringen met batterijen en noteer de meetresultaten van alle nieuw gekochte batterijen in tabel 7.24. U kunt dan hele gekke dingen meemaken als u nieuwe batterijen onder belasting gaat testen. Batterijen verouderen namelijk ook als ze helemaal niet worden gebruikt.

Menige winkeldochter, die nog dapper de nullastspanning gaf, ook nog de proef op de som met het lampje weerstond, blijkt bij belasting door de knieën te gaan. Koop batterijen daar, waar ze niet te lang blijven liggen.

En vergeet niet ook de beste batterij gaat op. Haal hem onmiddellijk uit de houder. Anders kan het omhulsel aangetast worden of de batterij gaat opzwellen zodat hij helemaal niet meer uit de houder is te krijgen. Dat kan ook gebeuren als de batterij per ongeluk voor langere tijd wordt kortgesloten.

7.24

soort batterij en koopdatum	U_o in V	R_L in Ω	U_{KI} in V



In een serieschakeling van energiebronnen moet steeds een (+) pool met een (-) pool worden verbonden.

7.11 Combineren van spanningsbronnen

7.11.1 Serieschakeling

Daarover hoeft eigenlijk niet veel te worden gezegd, de serieschakeling van staafbatterijen hebben we al vaak genoeg gedaan in de batterijhouder (zie fig. 7.25).

Belangrijk is dat de (+) pool van de eerste batterij wordt verbonden met de (-) pool van de volgende, (+) aansluitingen moeten steeds tegen (-) aansluitingen komen.

Ook de gelijkspanningsbussen van de trafo mogen we in serie met batterijen schakelen. Als we ons maar aan de genoemde regel houden (zie fig. 7.26 en fig. 7.27). De spanning die we in beide gevallen kunnen meten is 1,5 V hoger dan de trafo alleen levert.

Eén ding mag niet: de gelijkspanningsbussen en de wisselspanningsbussen van de trafo met elkaar in serie schakelen. Deze hebben in het inwendige van de trafo een verbinding die een dergelijke schakeling niet verdraagt.

Vragen

Misschien herinnert u zich nog de bespreking van de begrippen potentiaal en potentiaalverschil? Welk potentiaal (positief of negatief) heeft punt A in schakeling 7.25 ten opzichte van punt D, gesteld dat alle batterijen een spanning van 1,5 V hebben?

Hoe groot is het potentiaalverschil? En hoe beoordelen we punt D vanuit punt B? en punt B vanuit C?

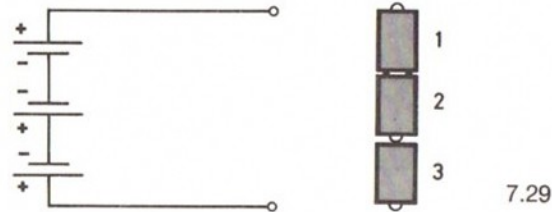
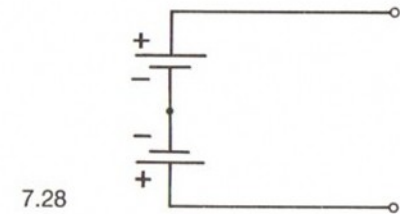
7.11.2 Gelijke polen aan of tegen elkaar schakelen

Gelijke polen tegen elkaar zal u wel eens overkomen zijn bij het inleggen van batterijen in de batterijhouder. Alle batterijen verkeerd om geeft echter alleen de verkeerde poling op de aansluitingen. In fig. 7.28 zien we het principe. Welke spanning meten we op de klemmen als we twee batterijen 1,5 V – met gelijke polen tegen elkaar schakelen? En welke spanning krijgen we als we hetzelfde doen met de trafo en een 1,5 V batterij?

Neem zelf de proeven en meet de spanning. Doe hetzelfde voor de schakeling van fig. 7.29 met 3 batterijen. Nu is deze schakeling met batterijen weinig zinvol, maar er zijn enkele toepassingen van dit principe.

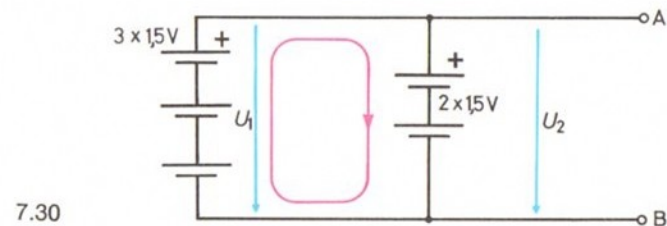
Vraag

Waar moet de (+)bus van de voltmeter in schakeling 7.29 worden aangesloten om de meter in de juiste richting te laten uitslaan. Op de (+)pool van batterij 1 of batterij 3?

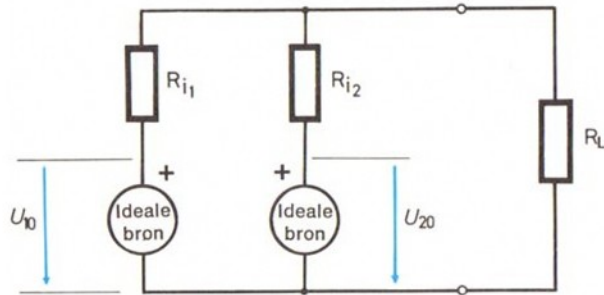


7.11.3 Parallelschakeling

De parallelschakeling van bronnen met ongelijke spanning kan heel vervelende gevolgen hebben. Wat er gebeurt zien we in fig. 7.30. De spanning van de linkse bron drijft door het spanningsverschil van 1,5 V, een stroom door de rechter bron. Dat zal natuurlijk niet de bedoeling zijn geweest van degene die deze schakeling tot stand bracht. Als nu R_{i1} en R_{i2} klein zijn, dan loopt er een behoorlijke stroom terwijl er toch op de klemmen A en B van de parallelschakeling niets is aangesloten.



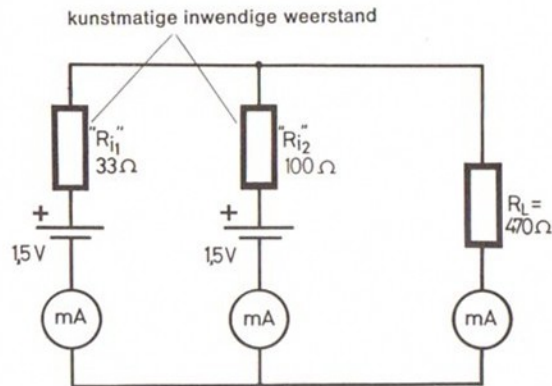
Batterijen mogen alleen parallel worden geschakeld, als hun nullastspanning U_0 precies gelijk is.



7.31

We mogen de beide bronnen alleen parallel schakelen als ze dezelfde nullastspanning hebben. Voorzichtigheidshalve is het verstandig de parallelschakeling van fig. 7.31 te verbreken als de belastingsweerstand R_L wordt uitgeschakeld. In dat geval wordt namelijk niet meer voldaan aan de voorwaarde dat $U_{10} = U_{20}$ (niet: U tien = U twintig, maar U een-nul = twee-nul. De nul betekent hier nullast). En hieraan moet de schakeling precies voldoen om te voorkomen dat er een stroom gaat lopen.

Batterijen die niet precies even oud zijn voldoen niet aan de genoemde voorwaarde. Als beide nullastspanningen precies even hoog zijn dan verhouden de stroomsterktes van batterij 1 en 2 zich omgekeerd met hun inwendige weerstanden R_i . De sterkste batterij (met de kleinste inwendige weerstand) draagt meer bij aan de totale stroom dan de zwakkere (met de grotere inwendige weerstand).



7.32

Proef

Met de schakeling van fig. 7.32 kunnen we ons van het bovenstaande overtuigen. We meten de stromen. Als de batterijen zeer lage inwendige weerstanden hebben krijgen we volkomen foutieve meetresultaten. Elke keer bij het in de stroomkring schakelen van de meter zetten we er ook een extra weerstand van 5Ω (meetbereik 100 mA) tussen en dat geeft onjuiste metingen.

7.12 Het stroom/spanningsdiagram van een bron

Stel dat we de volgende opstelling hebben: een stroomkring met een ideale bron waarvan de inwendige weerstand bekend is. Verder een stroomverbruiker bestaand uit een eenvoudige belastingsweerstand R_L . Wat we willen weten is de klemspanning en de stroomsterkte.

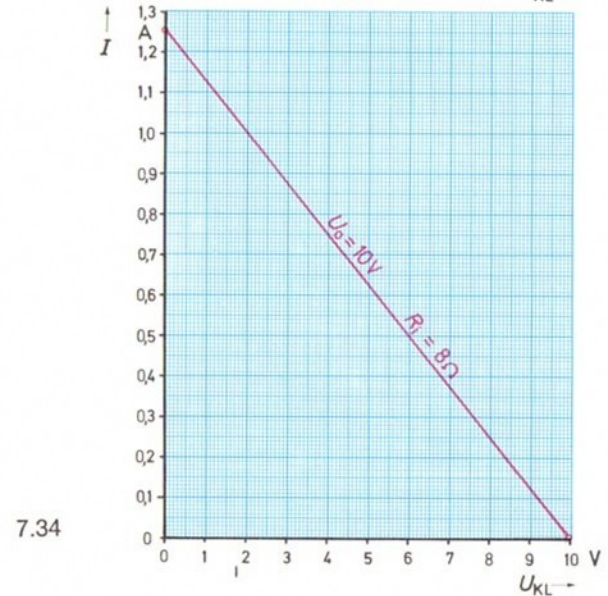
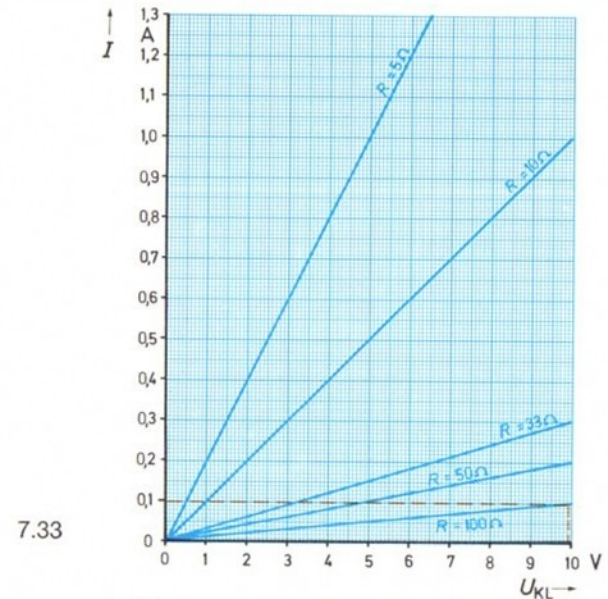
We houden niet van rekenen en daarom werken we met een stroom/spanningsdiagram.

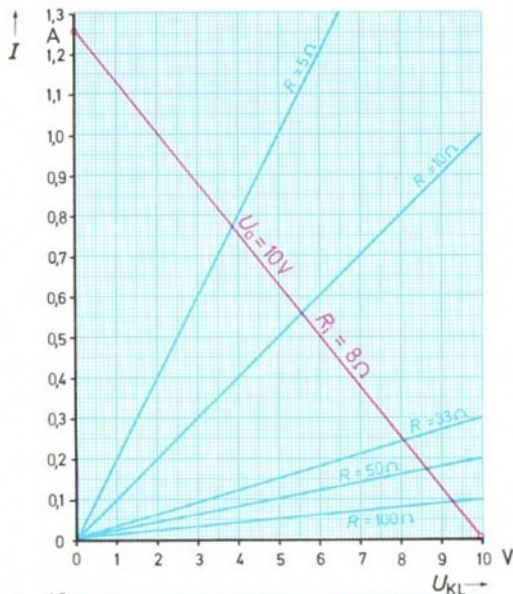
Konstruktie

Fig. 7.33 toont het stroom/spanningsdiagram zoals we dat in hoofdstuk 2.10.2 hebben leren kennen. Er zijn verschillende weerstandsrechten in getekend, het enige verschil is dat de eenheid voor de stroomsterkte anders is. Elk van de weergegeven weerstanden kan als een verbruiker op de bron worden aangesloten.

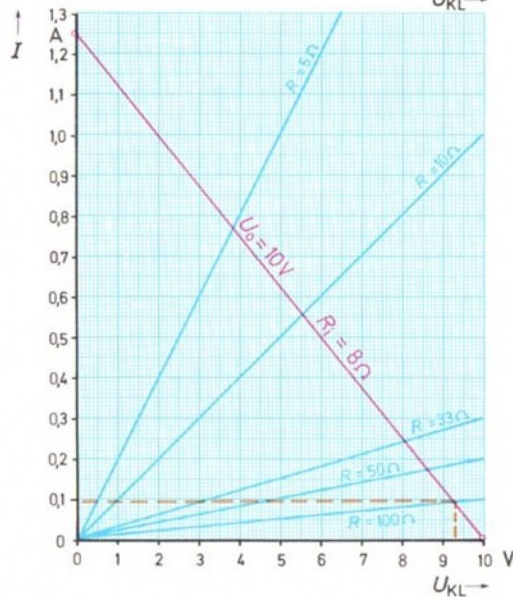
Gesteld dat we een ideale bron van bijv. 10 V hebben dan kunnen we vanuit het punt 10 V een loodrechte lijn trekken die de verschillende weerstandsrechten snijdt, vandaar naar links gaand vinden we de bijbehorende stroomsterkte. Fig. 7.33 laat deze methode zien (gele streeplijn). Voor $R_L = 100 \Omega$ is de stroomsterkte 100 mA. Hoe groot is de stroomsterkte voor $R_L = 33 \Omega$?

Helaas bestaan er geen ideale spanningsbronnen, er is zoiets als een inwendige weerstand. Toch is er wat op te vinden. We nemen de karakteristiek (de curve) van de inwendige weerstand in het diagram op en houden daar bij het aflezen rekening mee. Fig. 7.34 toont hoe de karakteristiek van een $R_i = 8 \Omega$, ongeveer die van de ft-trafo, in het diagram er uit ziet. We gaan er vanuit dat $U_0 = 10$ V. In elk geval moet de lijn dan door het punt 10 V gaan als er geen stroom loopt ($I = 0$).





7.35



7.36

Het tweede punt dat we nodig hebben om de rechte te kunnen trekken, wordt gegeven door $U_{KL} = 0$, de spanning als we de klemmen kortsluiten. $R_i = 8 \Omega$ en $U_o = 10 \text{ V}$, de stroomsterkte I_K die hierbij hoort is $10 : 8 = 1,25 \text{ A}$. Dit punt ligt op de verticale as want de klemspanning $U_{KL} = 0$. Een en ander is in fig. 7.34 getekend, beide punten zijn met elkander verbonden, zodat de rechte de karakteristiek voor de inwendige weerstand $R_i = 8 \Omega$ weergeeft. Wat zegt zo'n diagram nu? We kunnen er in aflezen hoe groot de klemspanning U_{KL} en de bijbehorende stroomsterkte zijn wanneer er een belastingsweerstand R_L op de klemmen wordt gezet. Het diagram 7.35 geldt natuurlijk alleen voor een spanningsbron $U_o = 10 \text{ V}$ en $R_i = 8 \Omega$.

In hoofdstuk 9.5 komen we nog een keer terug op deze voorstelling van een spanningsdeler bestaande uit een inwendige weerstand en een belastingsweerstand.

Toepassing

Hoe groot zijn nu de klemspanning U_{KL} en de stroom I , wanneer op de trafo (stand $U_o = 10 \text{ V}$) een belastingsweerstand van 100Ω staat.

Zoals we in fig. 7.36 zien ligt het werkpunt bij $I = 0,093 \text{ A} = 93 \text{ mA}$ en $U_{KL} = 9,2 \text{ V}$.

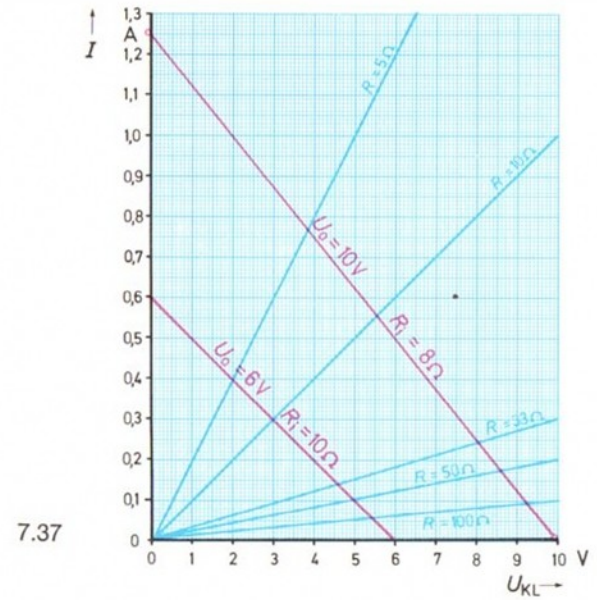
Probeer zelf de waarde te vinden voor $R_L = 33 \Omega$.

In fig. 7.37 is naast de ($U_o = 10 \text{ V}$; $R_i = 8 \Omega$) lijn ook nog de karakteristiek voor de spanningsbron $U_o = 6 \text{ V}$ en $R_i = 10 \Omega$ gegeven. Deze begint bij $U_{KL} = 6 \text{ V}$ en (omdat $R_i = 10 \Omega$) loopt vlakker.

Proef

Verzamel de nullastspanningen en kortsluitstromen voor verschillende standen van de draaiknop van de trafo of voor een 4,5 V batterij.

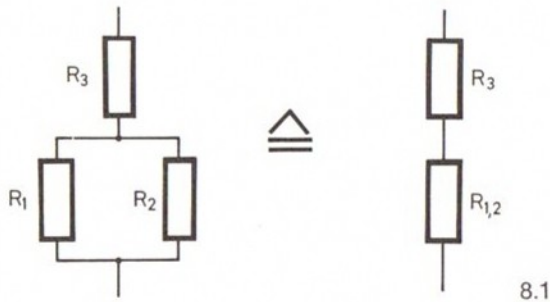
Teken de karakteristieken van de trafo of de batterij in fig. 7.37. Schakel nu op de spanningsbronnen (trafo of batterij) een weerstand van $100\ \Omega$ en bepaal dan de klemspanning en de stroomsterkte. Eerst door deze te meten en daarna door ze af te lezen uit het diagram.



8 Gemengde schakelingen

Dit zijn schakelingen waarin onderdelen in serie en parallel met elkaar verbonden zijn. Ze behoren tot het dagelijks leven van de elektronikus en we zullen ze eens wat nader bekijken.

8.1 Parallelschakeling met voorschakelweerstand



We gaan eerst een combinatie van weerstanden onderzoeken, die in de elektronika een grote rol speelt. Het gaat om de schakeling van de 3 weerstanden in fig. 8.1. Deze bestaat uit de parallelschakeling $R_1 \parallel R_2$ die met R_3 in serie staat.

Nu voegen we $R_1 \parallel R_2$ samen tot een enkele weerstand $R_{1,2}$ (R een, twee). We krijgen dan de vertrouwde spanningsdeler $R_{1,2}$ en R_3 .

Op deze manier kunnen we de schakeling berekenen; we vervangen de parallelschakeling in onze beschouwing door één enkele weerstand. In werkelijkheid blijven het natuurlijk twee weerstanden. De totale weerstand is de som van de vervangingsweerstand en de voorschakelweerstand R_3 . We gaan enkele proeven doen om te kijken hoe in een dergelijke schakeling de verhoudingen tussen de verschillende onderdelen liggen.

1. Proef

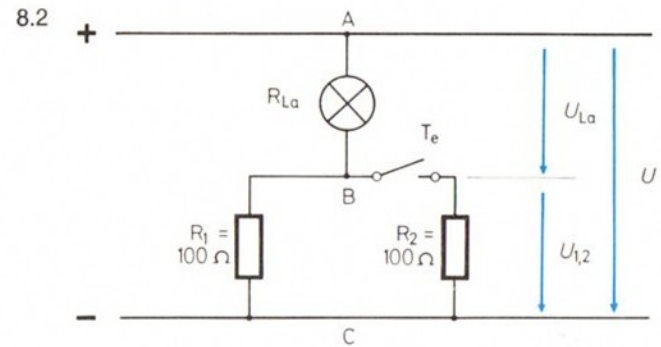
In fig. 8.2 is een lamp in serie geschakeld met een $100\ \Omega$ weerstand. Met de drukknop T_e kunnen we R_2 in de schakeling opnemen. Voor R_2 nemen we eerst een $100\ \Omega$ - en daarna een $33\ \Omega$ -weerstand. Steeds wanneer R_2 – door de knop in te drukken – wordt ingeschakeld, zal de helderheid van de lamp veranderen. Alvorens de in tabel 8.3 aangegeven metingen uit te voeren, een vraag: wordt de deelspanning tussen de punten B en C ($U_{1,2}$) kleiner of groter wanneer we de knop indrukken? Stijgt of daalt U_{La} als $R_{1,2}$ kleiner wordt?

Probeer ook het elektrisch vermogen te berekenen dat de lamp in beide gevallen afneemt en in de vorm van licht en warmte uitstraalt.

2. Proef

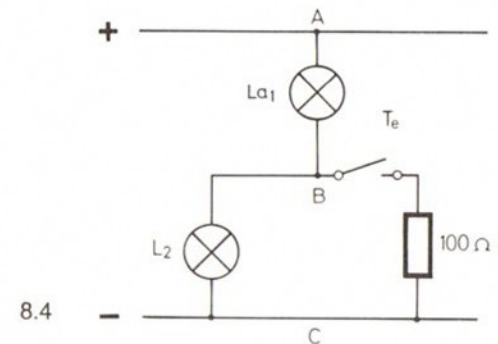
Bouw de schakeling van fig. 8.4; alvorens de knop T_e in te drukken: verandert de helderheid van één (welke?) of van beide lampen? Kruis in tabel 8.6 het antwoord aan dat volgens u het juiste is.

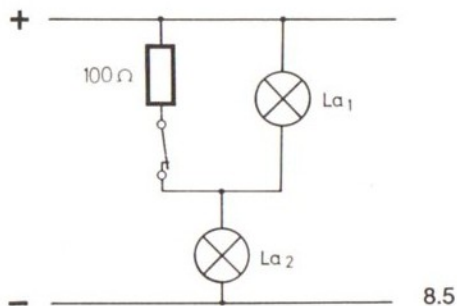
Alvorens dat te doen overleg bij u zelf: als de $100\ \Omega$ -weerstand wordt ingeschakeld zal de weerstandswaarde tussen B en C dan gelijk blijven, groter of kleiner worden? Aangenomen dat de waarde kleiner wordt, zal dan de deelspanning tussen B en C ook dalen of zal die stijgen? Wat gebeurt er met de deelspanning op lamp L_1 , wanneer de deelspanning op L_2 verandert? Wordt ze groter als de deelspanning op L_2 stijgt of juist kleiner?



8.3

R_1 in Ω :	100	100	100
R_2 in Ω :	–	100	33
$R_{1,2}$ in Ω :	100	50	24,8
U in V			
$U_{1,2}$ in V			
U_{La} in V			
I in mA			
P_{La} in mW			





8.5

8.6

Bij indrukken van de knop	in schakeling		
	8.4	8.5	8.7
er verandert niets			
alleen La ₁ verandert			
alleen La ₂ verandert			
La ₁ en La ₂ veranderen			
wordt La ₁ zwakker			
wordt La ₂ sterker			
wordt La ₁ sterker			
wordt La ₂ zwakker			
wordt La ₁ sterker			
brandt La ₁ niet			
brandt La ₂ niet			

3. Proef

De laatste proef toonde aan dat bij het inschakelen van een weerstand parallel aan een lamp, beide lampen van helderheid veranderen.

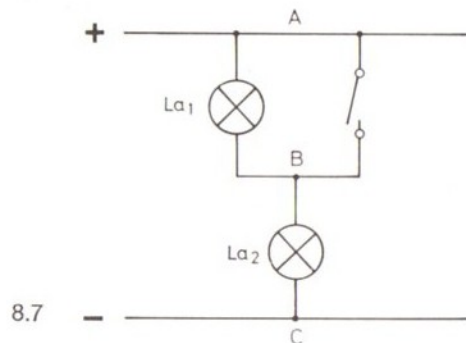
Lamp La₁ gaat feller branden en lamp La₂ zwakker. Maar hoe zit dat in schakeling 8.5 waar we een „uit“knop gebruiken. Wie geen ft-omschakeldrukknop heeft, die als aan- of uitknop is te gebruiken, kan ook de ene aansluiting van de 100 Ω-weerstand uit een bus van het MSP trekken.

Als we de knop indrukken verbreken we de verbinding en staat de 100 Ω-weerstand niet meer parallel aan lamp La₁. Kruis het antwoord in tabel 8.6 aan, dat volgens u juist is.

* Omschakeldrukknop en poolomkeerschakelaar zijn in aanvullingsdoos em 3 verkrijgbaar.

4. Proef

We bouwen nu de schakeling 8.7. Wat gebeurt er als we de aanknop indrukken? Kruis het antwoord weer in tabel 8.6 aan. Neem daarna de proef op de som of u het juiste antwoord heeft gekozen.



8.7

5. Proef

Schakeling 8.8 bestaat alleen uit lampen. Zolang de aandrukknop niet wordt bediend, zullen de lampen La₂ en La₃ ongeveer even helder branden, precies als in schakeling 8.7.

(Zoek hiervoor de juiste lampen uit). We nemen aan dat alle drie de lampen een weerstand van 100 Ω hebben, wat natuurlijk niet helemaal klopt.

Hoe zal de totale spanning zich over de drie lampen verdelen als we de drukknop bedienen?

En hoe wordt het totale elektrische vermogen over de lampen verdeeld? We willen een en ander exact meten en vervangen daarom de lampen door drie weerstanden (zie fig. 8.9) van elk 1 kΩ. Hun waarde is namelijk onafhankelijk van de stroomsterkte, wat bij gloeilampen niet het geval is.

Resultaat

Berekening levert:

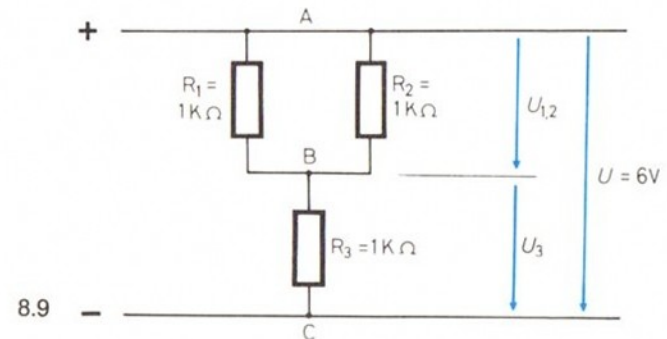
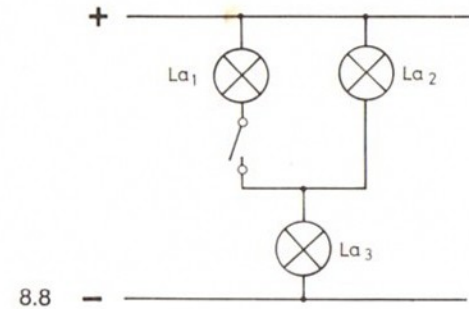
$$R = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 1000 + \frac{1000 \cdot 1000}{1000 + 1000} = 1000 + 500 = 1500 \Omega$$

Bij een spanning van $U = 6 \text{ V}$ loopt er een stroom:

$$I = U : R = 6 \text{ V} : 1500 \Omega = 0,004 \text{ A} = 4 \text{ mA.}$$

$$U_3 : U_{1,2} = R_3 : R_{1,2} = 1000 : 500 = 2 : 1.$$

Hetgeen wil zeggen dat de spanning op R_3 twee keer zo hoog is als die op de parallelschakeling van R_1 en R_2 . De vermogens van R_3 en van de parallelschakeling R_1 en R_2 verhouden zich eveneens als de deelspanningen, dus 2:1. Beide deelweerstanden R_1 en R_2 zijn even groot, tezamen nemen zij maar de helft van het vermogen af dat R_3 verbruikt. Elke deelweerstand neemt dus maar één vierde deel af van het vermogen van R_3 . Toch zijn alle weerstanden even groot.

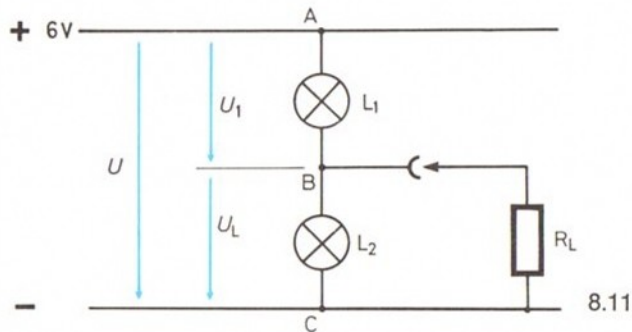
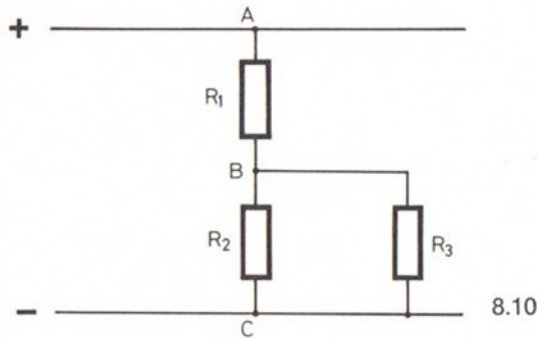


We kunnen natuurlijk ook zeggen: het deelvermogen van R_3 bedraagt $2/3$ van het totale vermogen. Want het deelvermogen P_3 verhoudt zich tot het totale vermogen P als de deelweerstand R_3 tot de totale weerstand R . Die verhouding is $1000 : 1500 = 2 : 3$. Het restant, eenderde deel van P , wordt in 2 gelijke delen gesplitst omdat $R_1 = R_2$ en daaruit volgt dat $P_1 = P_2 = 1/6 P$.

8.2 De belaste spanningsdeler

8.2.1 Een voorproefje

De schakelingen behandeld in het vorige hoofdstuk kunnen we ook als spanningsdelers opvatten met op het „deelpunt“ een weerstand, zoals in figuur 8.10 is getekend. De deelweerstand R_1 en R_2 vormen de spanningsdeler terwijl weerstand R_3 parallel aan B-C is geschakeld. We beginnen dit hoofdstuk met een oriënterend experiment. De zin van de onderzoeken zal u in de ware zin van het woord een lichtje doen opgaan.



Proef

De spanningsbron (fig. 8.11) moet tenminste 6 V zijn om beide lampen helder te laten branden. De beide in serie geschakelde lampen delen deze spanning van 6 V in twee ongeveer gelijke deelspanningen. We schakelen nu na elkaar de volgende weerstanden op het deelpunt en parallel met BC:

$1000 \Omega - 470 \Omega - 100 \Omega - 50 \Omega - 33 \Omega - 10 \Omega - 4,7 \Omega$.
En we kijken wat er met de beide lampen gebeurt.

Resultaat

Bij het inschakelen van de grote weerstanden verandert er niet veel. Maar waarom gaat lamp L_2 steeds zwakker branden naarmate de weerstanden kleiner worden en lamp L_1 steeds helderder? Het is duidelijk dat de oorzaak alleen maar kan zijn dat de spanning op L_2 door de knieën gaat als we een „al te kleine“ weerstand op het deelpunt zetten. Vraag is nu natuurlijk wat is een „te kleine“ weerstand?

8.2.2 Spanningsdeler met vaste weerstanden

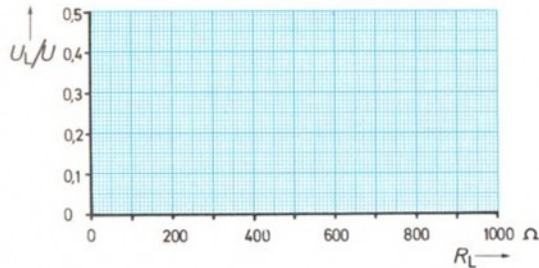
Proef

We gaan de proef nu iets uitbreiden. We vervangen de beide lampen van de „brandende“ spanningsdeler uit fig. 8.11 door een serie-schakeling met twee $100\ \Omega$ -weerstanden als in fig. 8.12 getekend. Omdat we nu geen lampjes meer hebben die de toestand van de schakeling in beeld brengen, moeten we de spanning U_L op het deelpunt en de totale spanning U meten. Schakel achtereenvolgens de weerstanden van fig. 8.13 en meet elke keer de spanning U_L . Met de meetwaarden van de tabel rekenen we daarna de verhouding $U_L : U$ uit.

Resultaat

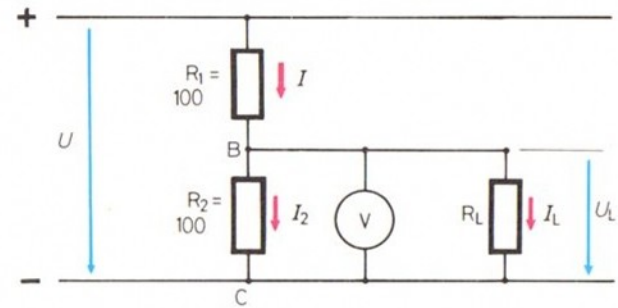
We zetten nu de gevonden waarden voor $U_L : U$ in het diagram van fig. 8.14, en wel in afhankelijkheid van de belastingsweerstand R_L . We moeten dan een karakteristiek krijgen als in fig. 8.15 die met de theoretisch berekende waarden is verkregen.

Beide diagrammen laten ons zien hoe sterk de spanning op het deel-of aftakpunt verandert in afhankelijkheid van de belasting.



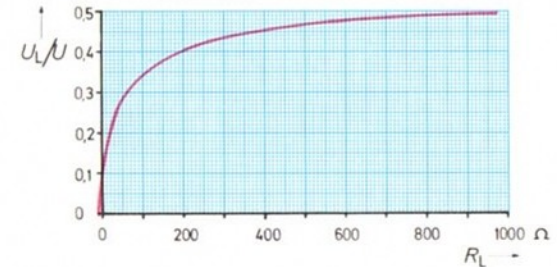
8.14

8.12



8.13

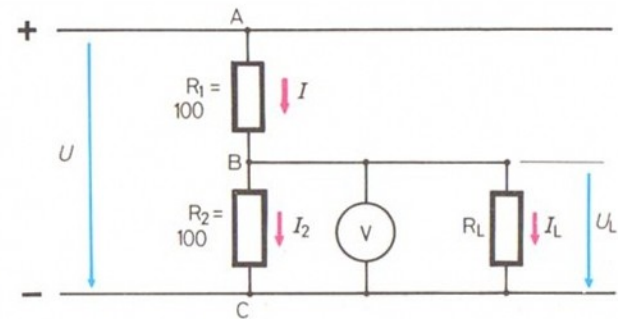
R_L in Ω	U_L in V	U in V	$U_L : U$
1000			
470			
200 (100 + 100)			
48 (33 + 10 + 4,7)			
33			
10			



8.15

Belangrijk is dat we zien hoe de aftakspanning U_L – vergeleken met de deelspanning zonder belasting – ongeveer 10% verandert, wanneer de belasting 1000 Ω bedraagt. Een daling van 10% wordt in het algemeen als draaglijk beschouwd. (Dat geldt voor alle spanningsdelers waaraan geen bijzondere eisen worden gesteld).

Heel algemeen kunnen we zeggen: als de belastingsweerstand die in een spanningsdeler wordt opgenomen, niet minstens 10 keer zo groot is als het „belaste“ deel van de spanningsdeler, dan daalt de aftakspanning zo sterk dat men in elk geval door meting moet nagaan of deze spanning nog wel voldoende is voor het beoogde doel.



Welke gevolgen heeft dat voor de spanningsdeler? Hoe lager de waarde van de aangesloten belastingsweerstand R_L , des te meer stroom – hoe hoger de stroomsterkte – er door de weerstand R_1 gaat lopen. Als de spanningsdeler naar willekeur te belasten moet zijn, hetgeen betekent dat het aftakpunt kortgesloten mag worden, dan moeten we voor deelweerstand R_1 een zeer hoog te belasten type weerstand nemen, bijv. één van 1 watt.

De stroom in een belaste spanningsdeler

Tenslotte behandelen we de stroomsterkte in een belaste spanningsdeler (fig. 8.16). De stroom I door de weerstand R_1 , deelt zich in punt B in de deelstromen (I_2 en I_L). In plaats van I mogen we ook I_1 schrijven. We weten dat in een parallelschakeling de stroomsterktes omgekeerd evenredig zijn met de deelweerstand. Zolang de belastingsweerstand R_L een grote Ohmse waarde heeft in verhouding tot de deelweerstand R_2 , zal de stroomdeling in punt B geen rol spelen. De deelstroom door de belastingsweerstand mogen we in dat geval verwaarlozen.

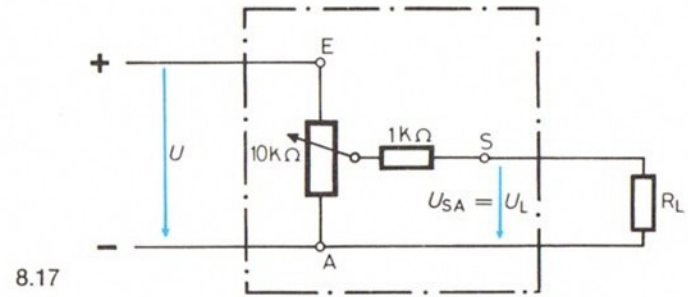
Heel anders wordt het wanneer de waarde van R_L in dezelfde orde komt te liggen als die van weerstand R_2 , of zelfs een lagere waarde heeft.

8.2.3 Potentiometer met belastingsweerstand

In hoofdstuk 5 is de potentiometer van hobbylabor uitvoerig besproken. We gaan nu onderzoeken wat er met de spanning op het aftakpunt van de 10 k Ω -potmeter gebeurt als er verschillende belastingsweerstand op worden aangesloten. Houd er rekening mee dat vòòr het sleepkontakt S een beveiligingsweerstand van 1 k Ω zit.

Proef

Bouw de schakeling van fig. 8.17, als spanningsbron nemen we een 4,5 V batterij of de ft-batterijhouder. We meten eerst de nullastspanning U_{SA} , m.a.w. zonder de belasting met R_L . De bij elke stand van de draaiknop behorende spanning noteren we in tabel 8.18. Daarna nemen we voor R_L de in de tabel aangegeven waarden en noteren de bijbehorende spanningen.

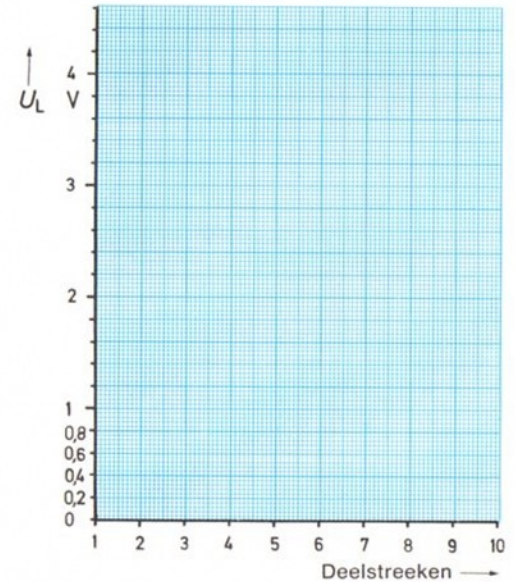


8.17

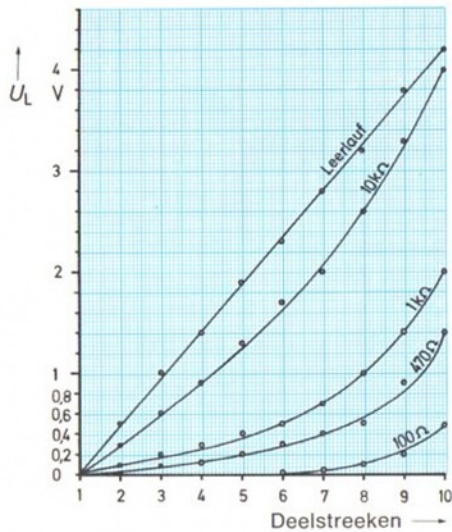
8.18

schaalverdeling	U_{SA} zonder belasting in V	U_{SA} (in V) bij belasting $R_L =$			
		100 Ω	470 Ω	1000 Ω	10000 Ω
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Diagram 8.18 (a) dient om de gevonden waarden uit te zetten in afhankelijkheid van de stand van de draaiknop. We krijgen dan een beeld dat er uitziet als fig. 8.19.

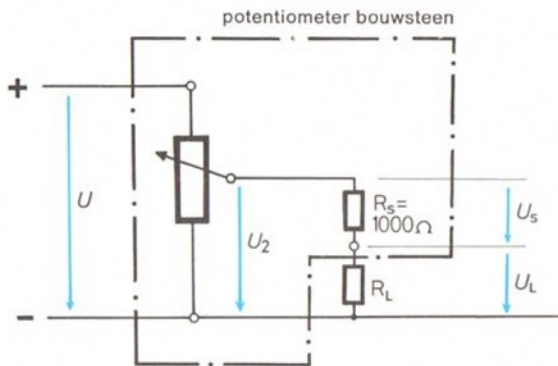


8.18 (a)



8.19

De stijging van de spanning op het sleepcontact van een potmeter verloopt ongeveer lineair met de stand van de draaiknop, als de belastingsweerstand tenminste even groot is als (of groter dan) de weerstand van de potmeter.



8.20

Resultaat

Uit het diagram blijkt het volgende: bij nullast, als er niets op het sleepcontact van de potmeter is aangesloten, loopt de spanning linear (rechtlijnig) op met de stand van de draaiknop. Hoe groter nu de belasting, dat betekent hoe lager de waarde van R_L , des te meer gaat de curve doorzakken.

Er gebeurt niets van deelstreep 1 tot 3, van 4 – 6/7 zien we de stijging iets groter worden en in het laatste stuk loopt de spanning steil omhoog.

Uw eigen metingen kunnen iets afwijken, maar het totale verloop van de curves moet wel overeenkomen. Dat sommige punten wat verstrooid liggen is niet hinderlijk, het verloop van de curves is er best uit af te leiden.

Als de afgetakte spanning van een potmeter halverwege, gelijkmatig met de draaiing van de knop moet gaan stijgen, dan geldt de nevenstaande regel.

Wie dat wil kan dezelfde metingen doen voor de 1 kΩ-potmeter en zal constateren dat de regel ook daarvoor opgaat.

Dat de afgetakte spanning bij een hogere belasting (= lagere waarde van R_L) niet tot de volle ingangsspanning oploopt, wordt veroorzaakt door de ingebouwde veiligheidsweerstand R_s . In fig. 8.20 zien we hoe de spanning tussen sleepcontact en aansluiting A zich splitst in de deelspanningen U_s en U_L .

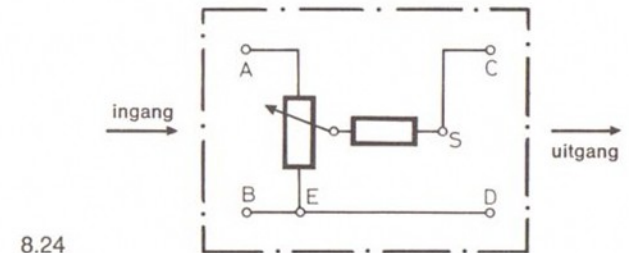
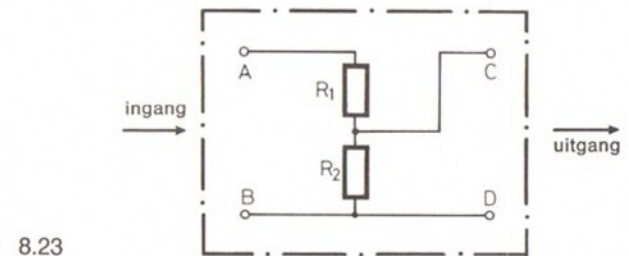
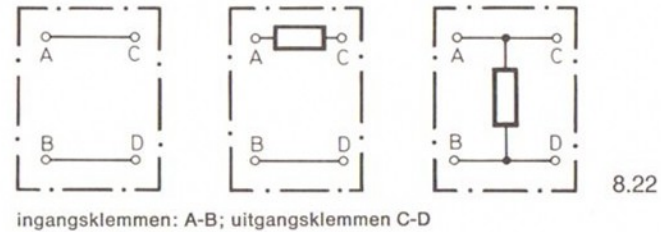
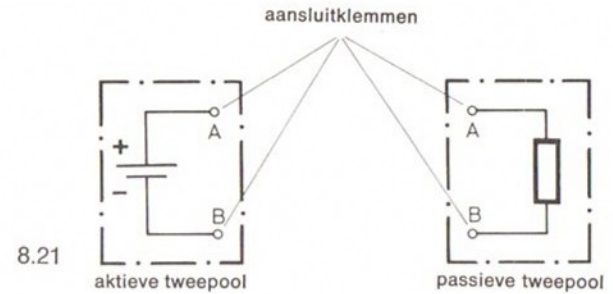
8.3 De spanningsdeler als vierpool

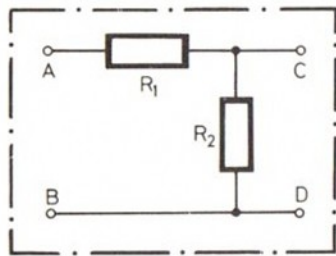
In voorgaandé hoofdstukken hebben we met de zogeheten tweepool gewerkt. Een batterij met een inwendige weerstand noemen we een actieve tweepool. Een zgn. „black box“ met één of meer weerstanden, heet een passieve tweepool. Fig. 8.21 brengt beide in beeld. Het kenmerk van alle tweepolen is dat zij „van buitenaf gezien“ slechts twee aansluitklemmen hebben.

We beschouwen nu een spanningsdeler. Is dit een tweepool? „Nee“ zult u zeggen – en terecht – want van buitenaf gezien zijn er niet twee, maar drie aansluitingen. De drie bussen in de potentiometer bouwsteen zijn daarvoor het bewijs.

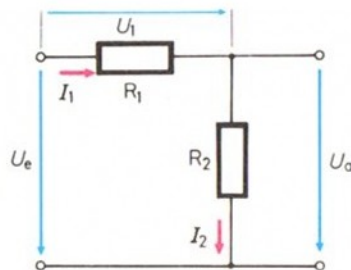
We gaan nu een potentiometer of een spanningsdeler bekijken bestaande uit vaste weerstanden die in een kastje zitten, waar we verder niets aan kunnen zien. Aan de ene kant stoppen we er, in de een of andere vorm, elektrische energie in, aan de andere kant komt de energie er in dezelfde of andere vorm weer uit. In het eenvoudigste geval ziet een dergelijke „black box“ eruit als in fig. 8.22 getekend. Elk van de drie kastjes heeft een ingang (de bussen A en B) en een uitgang (de bussen C en D). Totaal zien we 4 aansluitklemmen, het is logisch om een dergelijke schakeling dan vierpool te noemen. Elke spanningsdeler en potentiometer kunnen we als een vierpool met een ingang en een uitgang opvatten, overeenkomstig fig. 8.23 en 8.24.

De bussen B en D zijn doorverbonden. Dat is de reden waarom drie aansluitingen op de potentiometer bouwsteen voldoende zijn. In fig. 8.24 bijv. kan bus E zowel als ingang en als uitgang voor de vierpool dienen.

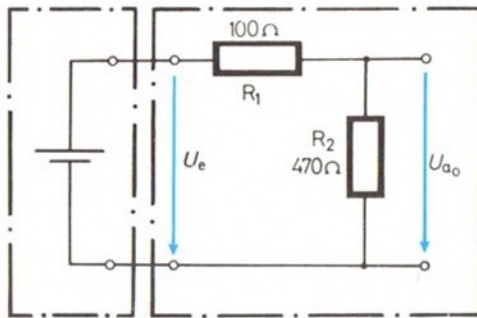




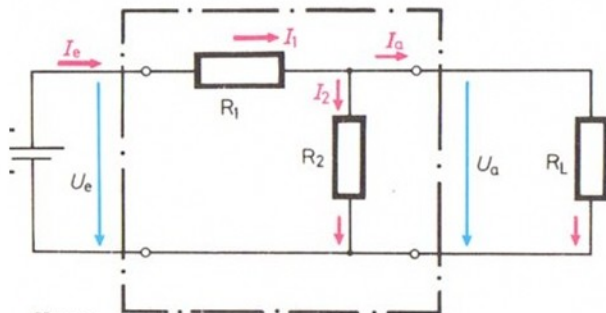
8.25



8.26



8.27



Vragen

8.28

In gedachten belasten we de uitgang van de vierpool in fig. 8.27 met een sluitweerstand R_L van 470Ω . Hoe groot wordt nu de uitgangsspanning U_a ? Bepaal nu ook de langsstroom. Is de dwarsstroom groter, kleiner of gelijk aan de stroom door de sluitweerstand? Probeer eerst deze waarden uit te rekenen aan de hand van de ingangsspanning die u gebruikt en controleer daarna de uitkomsten met metingen.

Figuur 8.25 is een andere weergave van de eenvoudige spanningsdeler van fig. 8.23.

Als we de pijlen voor de spanning en de stroom er in tekenen dan krijgen we fig. 8.26. De spanning die we tot nu toe de totale spanning noemden, heet nu de ingangsspanning U_e . De deelspanning op weerstand R_2 heet in deze voorstelling van zaken de uitgangsspanning U_a . Als we een dergelijke spanningsdeler-vierpool op een spanningsbron schakelen dan krijgen we fig. 8.27. In dit geval staat de nullastspanning op de uitgang van de vierpool – er is niets op aangesloten. Verder is het van belang te weten dat we in een dergelijke schakeling de weerstand R_1 langzweerstand noemen, en R_2 de dwarsweerstand. De stroom door R_1 noemen we „langsstroom“ en die door R_2 dwarsstroom. Probeer een dergelijke vierpool te bouwen met $R_1 = 100 \Omega$ en $R_2 = 470 \Omega$. Meet de nullastspanning U_{oo} op de uitgangen. Deze spanning hangt niet alleen af van de grootte van beide deelweerstand, maar ook van de aangelegde ingangsspanning U_e . Bepaal daarom tevens de verhouding $U_{oo} : U_e$. Wanneer we in deze schakeling om de een of andere reden de ingangsspanning U_e veranderen dan kunnen we zonder een meting te behoeven verrichten, de bijbehorende uitgangnullastspanning U_{oo} berekenen.

$$U_{oo} = U_e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Een vierpool zonder belasting is een uitzondering. Meestal staat op z'n uitgangen een tweepool (of soms ook een volgende vierpool). Fig. 8.28 toont een eenvoudige schakeling. De belastingsweerstand R_L wordt soms wel eens sluitweerstand genoemd omdat hij de kring a.h.w. sluit.

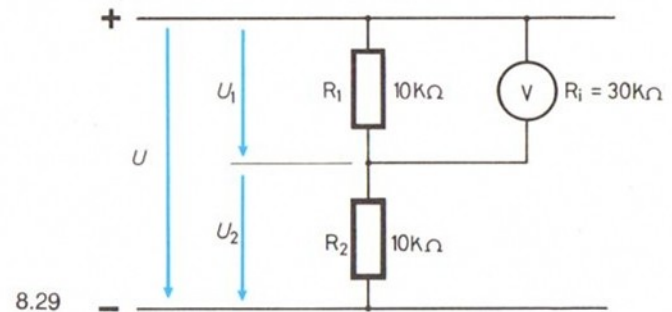
8.4 Toepassingen

8.4.1 Meetfouten bij spanningsmetingen

Bij een spanningsmeting ligt het meetinstrument altijd parallel met de weerstand waarover de spanningsval of het potentiaalverschil moet worden gemeten. Uit hoofdstuk 4.9.4 weten we dat de ft-voltmeter een inwendige weerstand R_i heeft van ongeveer $30 \text{ k}\Omega$. Zolang de weerstand R_1 (fig. 8.29) klein is, vergeleken met R_i , hoeven we ons geen zorgen te maken.

De zaak wordt kritisch als R_i minder dan 10 keer zo groot is als R_1 . Zolang de verbruiker (de belastingsweerstand) direkt op de spanningsbron is geschakeld dan ontstaan er geen meetfouten (waarom niet?) Maar als de weerstand een onderdeel vormt van een spanningsdeler, zoals dat vaak voorkomt in elektrische schakelingen, dan

Laten we het maar met een schakeling uitzoeken.



8.29

Proef

Fig. 8.29 geeft een schakeling met een spanningsdeler bestaande uit twee $10 \text{ k}\Omega$ -weerstanden. Voor R_2 nemen we de $10 \text{ k}\Omega$ -potmeter (bussen A en E). We meten nu U , U_1 en U_2 . Waarom wijst de voltmeter voor U_1 en U_2 niet precies de helft van U aan? Wie zich even de experimenten van de voorgaande hoofdstukken voor de geest haalt, zal terecht de inwendige weerstand van de spanningsdeler als de vermoedelijke boosdoener aanwijzen.

Nevenstaande berekening laat precies zien dat de gemeten waarde overeenkomt met de berekende waarde als we rekening houden met de parallelschakeling $R_1 \parallel R_i$ die de meetfout veroorzaakt.

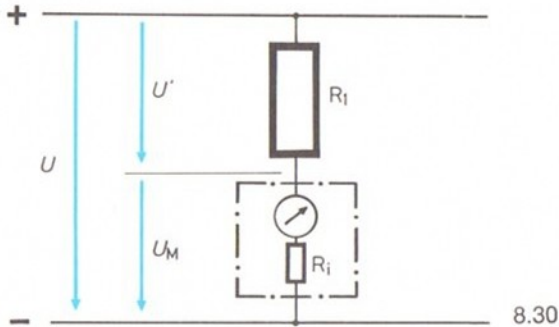
$$R_{1,i} = R_1 \parallel R_i = \frac{R_1 \cdot R_i}{R_1 + R_i} = \frac{300}{40} = 7,5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\text{totaal}} = R_1 + R_{1,i} = 10 + 7,5 = 17,5 \text{ k}\Omega$$

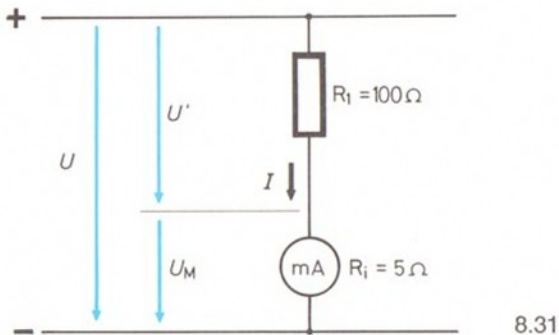
$$U_1 = U \cdot \frac{R_{1,i}}{R_{\text{totaal}}} = U \cdot \frac{7,5}{17,5} = 0,43 \cdot U$$

Als $U = 6 \text{ V}$, dan meten we voor U_1 niet 3 Volt , maar $0,43 \times 6 \text{ V} = 2,58 \text{ V}$.

Voor de spanningsmeting moet de inwendige weerstand van de voltmeter minstens 10 keer zo groot zijn als de weerstand waarop de spanning wordt gemeten.



Het opnemen van een stroomsterktemeter in een stroomkring maakt de stroomsterkte altijd kleiner.



Vraag

De meetfout wordt bijzonder groot wanneer we voor R_1 een weerstand van $100 \text{ k}\Omega$ nemen. Bereken hoe groot U_1 zou moeten zijn en welke waarde we in feite zouden meten.

Aanwijzing: een goede spanningsmeter moet voor het doen van metingen in elektronische schakelingen tenminste een inwendige weerstand van „ $20 \text{ k}\Omega$ per volt“ hebben. Voor de definitie van $\text{k}\Omega$ per volt zie hoofdstuk 4.9.4 en A11 (zie pag. 282).

8.4.2 Meetfouten bij stroomsterktemetingen

Het volgende punt van het thema „meetfouten“ is de fout die optreedt als we de ampèremeter in serie schakelen in de stroomkring. Ook een ampèremeter heeft, zoals in fig. 8.30 getekend, zijn eigen inwendige weerstand R_i . De stroomsterktemeter moet in serie komen te staan met de weerstanden – of de stroomkring – waarin we de stroomsterkte willen meten. Dat betekent een verandering in de weerstand van het te meten object – en wel altijd een vergroting van de weerstand.

Voor preciese metingen moet daar natuurlijk rekening mee worden gehouden. Men rekent dan niet met de spanning U , maar verlaagt deze met de deelspanning U_M , die op de klemmen van de meter staat. Deze wordt bepaald door het produkt te nemen van de gemeten stroom I met de inwendige weerstand R_i van de ampèremeter. Hiervoor hebben we de opgave nodig van de inwendige weerstand van de gebruikte stroomsterktemeter.

Voorbeeld

De ft-meter heeft bij een meetbereik van 100 mA een inwendige weerstand van 5Ω (zie hoofdstuk 6.7.2). Meet nu de stroom die door de 100Ω -weerstand van schakeling 8.31 loopt.

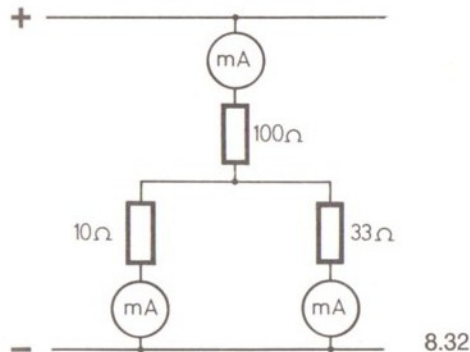
Goed beschouwd loopt die stroom echter door een weerstand van $100\ \Omega + 5\ \Omega = 105\ \Omega$. Stel dat voor het inschakelen van de meter op weerstand R_1 een spanning van $6\ \text{V}$ stond; het in de stroomkring opnemen van de meter verlaagt die spanning met $5/105$ deel ($\pm 5\%$) tot ongeveer $5,7$ volt. Even goed kunnen we zeggen dat de meter de stroomsterkte met datzelfde bedrag, ongeveer 5% , verlaagt. Bij eenvoudige metingen nemen we dit soort meetfouten op de koop toe. Maar voor exacte proefnemingen moeten we aanvullende berekeningen op onze metingen uitvoeren.

(Waarom nu precies het $5/105$ deel? Denk aan de berekening van de verhouding tussen deelspanning en totale spanning als de waarden van de weerstanden bekend zijn. In hoofdstuk 4.5 is een en ander terug te vinden).

Proef

We zetten de schakeling 8.32 op. In de figuur zijn drie stroomsterktemeters getekend. We hebben er één met een inwendige weerstand van $5\ \Omega$. Het gevolg is dat de meetresultaten aanzienlijk worden vervalst. Want als we bijv. de weerstand van $10\ \Omega$ met $5\ \Omega$ verhogen dan verandert er natuurlijk wel iets in de schakeling.

In dat geval zal er tijdens de meting een veel grotere stroom door de $33\ \Omega$ -weerstand gaan dan voor de inbouw van de meter in de tak van $10\ \Omega$. Pas daarom de volgende truc toe: het is voldoende om twee van de drie stromen te meten want de derde kunnen we uit de vergelijking $I = I_1 + I_2$ verkrijgen. Bepaal zelf welke meting het beste achterwege kan blijven, omdat hij de grootste fout oplevert.

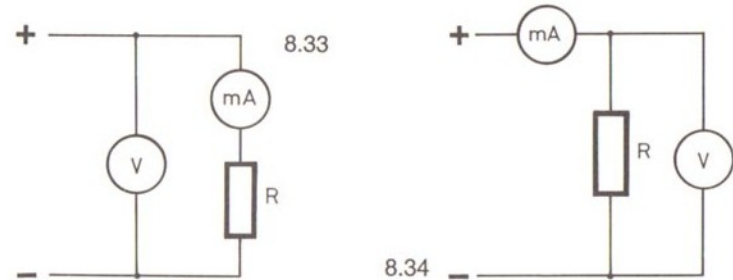


De inwendige weerstand van een stroomsterktemeter mag niet meer dan 10% bedragen van de totale weerstand waarmee de meter in serie wordt geschakeld. Is die weerstandswaarde wel meer dan 10%, dan dient de gemeten stroomsterkte door een berekening te worden gecorrigeerd.

8.4.3 Juiste meting van stroom of van spanning?

Stel dat we tegelijk de spanning en de stroomsterkte kunnen meten – aan welke figuur (8.33 of 8.34) voor de meting van spanning en stroom zou u dan de voorkeur geven?

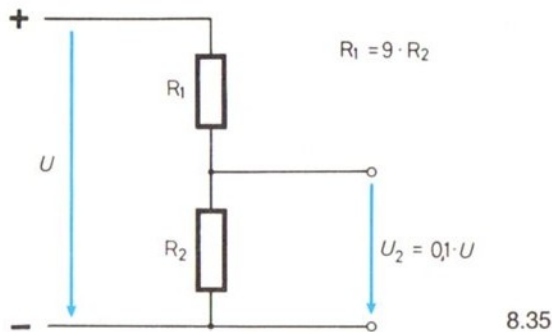
In het eerste geval, fig. 8.33, meet de spanningsmeter de deelspanning op de ampèremeter mee, terwijl deze laatste de stroom juist meet. De fout wordt groter naarmate de inwendige weerstand van de ampèremeter groter is.



In de tweede schakeling (8.34) meet de stroomsterktemeter ook de stroom die door de voltmeter loopt. We zouden daarom een spanningsmeter moeten hebben met een zeer hoge weerstand.

Die beide eisen om een zo zuiver mogelijke meting te verkrijgen, zijn met elkaar in tegenspraak. De inwendige weerstand moet tegelijk zo klein mogelijk zijn in het ene geval en zo hoog mogelijk in het andere geval.

Bij de aanschaf van meetapparatuur die spanning en stroom kan meten, de zgn. universeelmeter, moeten we kiezen tussen het hoogohmige type voor de spanning of het laagohmige type voor de stroomsterkte. Lees ook het hoofdstuk in het aanhangsel: "waarop te letten bij het kopen van universeelmeetapparatuur".

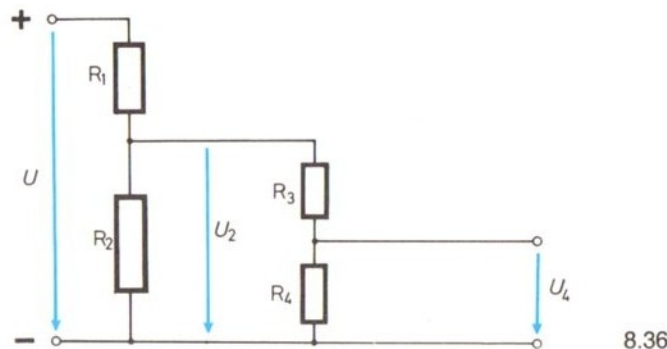


8.35

8.4.4 Deling in tienden

Voor vele doeleinden heeft men spanningsbronnen nodig die kleine spanningen leveren van enige tienden volts. De meting van dergelijke spanningen is met de gebruikelijke spanningsmeters niet te doen. Meestal wordt daarom met hogere spanningen gewerkt en schakelt men op de bron een spanningsdeler, die de ingangsspanning in de verhouding 1 : 10 deelt. Een dergelijke schakeling noemen we een tiendendeler (fig. 8.35).

Als de weerstand van de deler klein is in vergelijking met de belasting die er op komt, dan hoeven we de deelspanning U_2 niet te meten, het is dan voldoende de ingangsspanning U op de deler te meten.



8.36

8.4.5 Cascadeschakeling

Wat gebeurt er als we op de uitgang van een spanningsdeler weer een spanningsdeler zetten? Fig. 8.36 laat een dergelijke schakeling zien. R_1 en R_2 behoren tot de eerste en R_3 en R_4 tot de tweede deler.

We kiezen de waarden van de vier weerstanden zodanig dat de tweede deler de eerste nauwelijks belast. Op de tweede deler komt geen belasting. De zaak is nu vrij gemakkelijk te overzien; de vraag is: hoe hoog is U_4 ?

$$U_2 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \text{ en } U_4 = U_2 \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

$$\text{daaruit volgt dat } U_4 = U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

Deze vergelijking is nog te vereenvoudigen, maar we laten hem liever zo staan en gaan ons in de werking van de tweede deler verdiepen. We noemen daartoe de verhouding van de onderste weer-

stand in een deler tot de totale weerstand van diezelfde deler:
„delerverhouding V_t “. We krijgen dan:

$$V_{t1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_2}{U} \text{ en}$$

$$V_{t2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{U_4}{U_2}$$

Substitutie in de vorige vergelijking geeft

$$U_4 = U \cdot V_{t1} \cdot V_{t2}$$

Wie wiskundig niet geschoold is zal niet direct zien wat deze vergelijking te vertellen heeft. Waar het om gaat is: bij een cascade-schakeling is de uiteindelijke – of totale – delerverhouding niet de som van de aparte delerverhoudingen, maar hun product:

$$V_t = V_{t1} \cdot V_{t2}$$

Met twee delers die elk een delerverhouding hebben van 1:10 kunnen we dus één deler maken met de verhouding 1:100. Fig. 8.37 geeft deze deler in een andere opstelling dan 8.36.

Voorbeeld

De eerste deler bestaat uit een 90Ω en een 10Ω -weerstand. De 90Ω verkrijgen we door parallelschakeling van 100Ω en 1000Ω . Hoe groot is de afwijking daarbij?

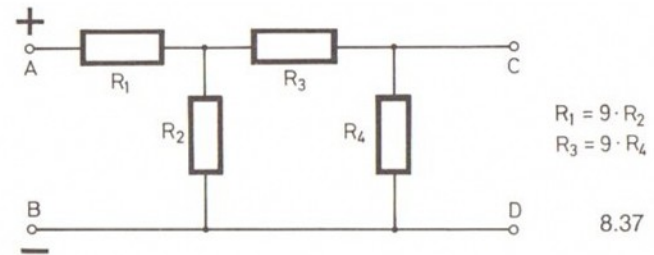
(Als we $R_1 = 100 \Omega$ zouden nemen, dan zou de delerverhouding niet 1 : 10, maar $10 : (100 + 10) = 1 : 11$ zijn).

Voor de tweede deler hebben we weer de verhouding 1 : 10 nodig. Om de tweede deler hoogohmiger te maken dan de eerste nemen we de combinatie als in fig. 8.38 getekend.

Vraag

Reken voor de tweede deler de delerverhouding exact uit. Hoe groot is de delerverhouding voor de hele schakeling precies?

De schakeling van steeds dezelfde bouwgroepen achter elkaar, bijv. spanningsdelers, heet een cascade-schakeling. Een cascade is een trapvormige reeks. Denk bijv. aan het rijtje: meter – dekameter – hektometer – kilometer. Het aantal gelijke groepen dat tot een cascade mag worden geschakeld, is willekeurig.

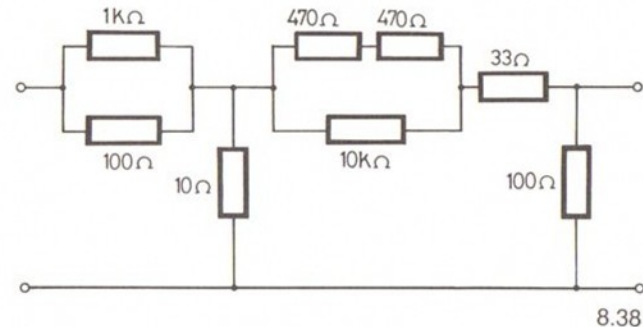


$$R_1 = 9 \cdot R_2$$

$$R_3 = 9 \cdot R_4$$

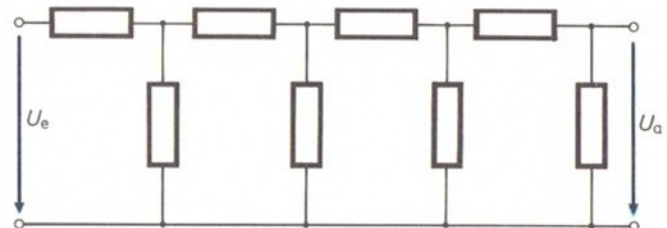
8.37

De uiteindelijke delerverhouding van een cascade-schakeling is gelijk aan het product van de afzonderlijke delerverhoudingen.



8.38

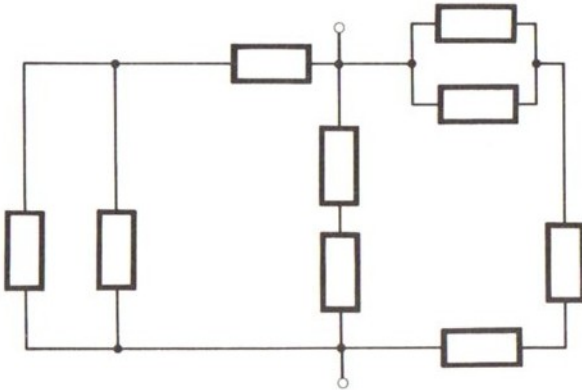
8.39



9 Netwerken

Een combinatie van verschillende in serie en parallel geschakelde onderdelen, noemt men een netwerk. Figuur 9.7 laat een dergelijk, uit 9 weerstanden opgebouwd netwerk zien. Er zijn veel gekompliceerder schakelingen – aan het ontwerpen van netwerken en het oplossen van schakelproblemen kan men dagen besteden. Aan het begin van dit hoofdstuk zullen we ons gaan verdiepen in het vereenvoudigen van het netwerk 9.1.

9.1



9.1 De stapsgewijze vereenvoudiging van netwerken

De vraag luidt: „Hoe groot moet de weerstand zijn die het getekende netwerk kan vervangen?“. We spreken van de berekening van een vervangingsweerstand. Een dergelijk probleem lossen we stapsgewijs op en wel op de volgende manier.

Voor wat duidelijk serie- of parallelschakelingen zijn kunnen we vervangingsweerstand nemen.

In fig. 9.2 is met gestreepte rechthoeken aangegeven welke weerstanden te vervangen zijn door één weerstand.

Het symbool \parallel betekent: parallel met; een „+“: in serie met.

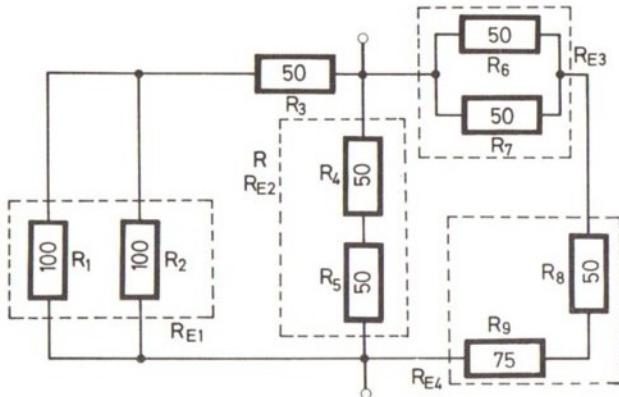
$$R_{E1} = R_1 \parallel R_2 = \frac{100 \cdot 100}{200} = 50 \Omega$$

$$R_{E2} = R_4 + R_5 = 100 \Omega$$

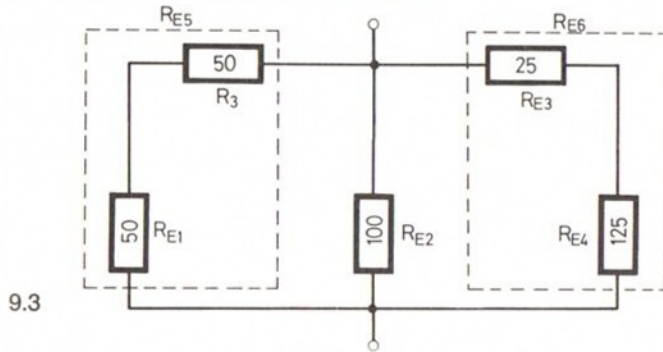
$$R_{E3} = R_6 \parallel R_7 = 25 \Omega$$

$$R_{E4} = R_8 + R_9 = 125 \Omega$$

9.2



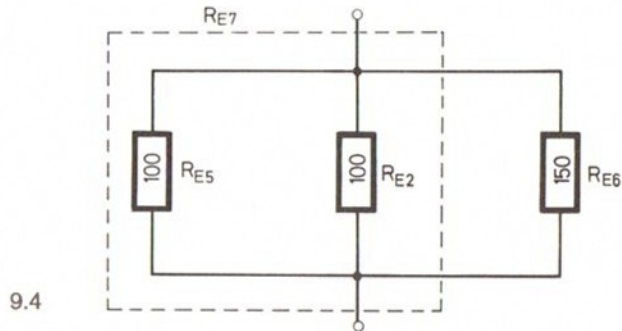
Met deze deelweerstand stellen we schakeling 9.3 samen, maar ook die kunnen we nog vereenvoudigen:



9.3

$$R_{E5} = R_{E1} + R_3 = 100 \Omega \quad R_{E6} = R_{E3} + R_{E4} = 150 \Omega$$

Op deze wijze verkrijgen we de vervangingsschakeling 9.4 met 3 parallel geschakelde weerstanden. De weerstanden R_{E5} en R_{E2} die

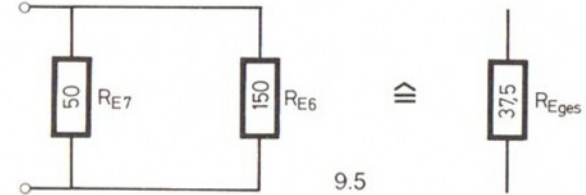


9.4

even groot zijn, kunnen we samenvoegen tot R_{E7} en dan ontstaat de schakeling van fig. 9.5.

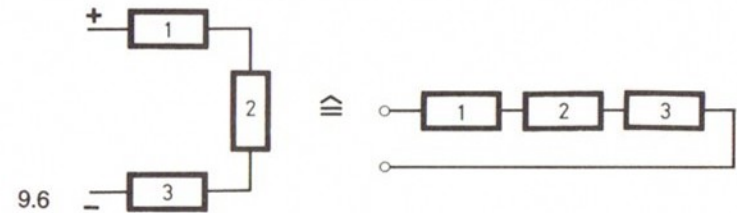
De uiteindelijke of totale vervangingsweerstand heeft dan de waarde:

$$R_{E_{tot}} = \frac{50 \cdot 150}{200} = 37,5 \Omega$$



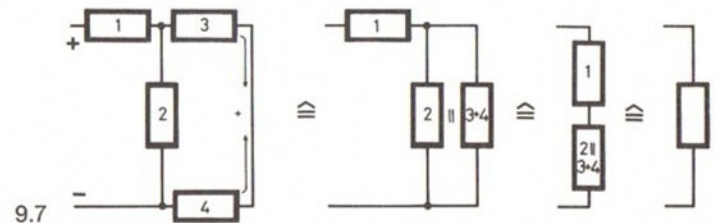
In dit voorbeeld herkennen we heel duidelijk de techniek van de stapsgewijze vereenvoudiging:

1. Samenvoegen van alle in serie geschakelde weerstanden. Dat is altijd het gemakkelijkst. Laat u niet in de war brengen wanneer de schakeling een hoek om gaat (zie fig. 9.6), in gedachten kunnen we de draad (de hoek) rechtbuigen zodat beide weerstanden netjes achter elkaar liggen.



9.6

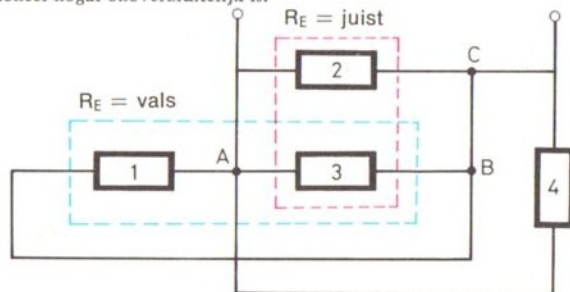
2. Op knooppunten moeten we voorzichtig zijn, weerstanden waartussen een knooppunt ligt, mogen we niet als in serie geschakeld beschouwen – meestal lopen er één of meer weerstanden parallel (fig. 9.7)



9.7

3. De in rood en blauw aangegeven samenvoegingen mogen elkaar nooit snijden of overlappen.

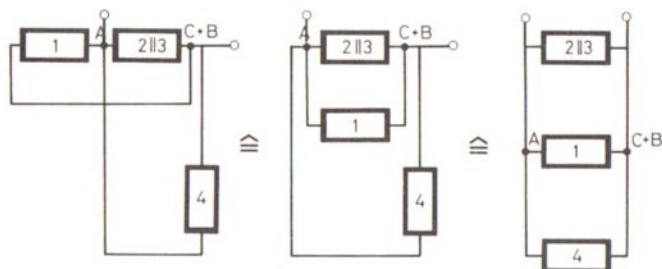
Figuur 9.8 toont een netwerk dat heel aardig lijkt, maar vriendelijk gezegd, functioneel nogal onoverzichtelijk is.



9.8

In fig. 9.8 is de rood omrande samenvoeging goed, het is duidelijk dat beide weerstanden parallel liggen. De blauw omrande combinatie is fout, omdat ten eerste er een knooppunt tussen beide weerstanden ligt en ten tweede omdat de blauwe en rode figuren elkaar deels overlappen.

4. Wanneer we schakelschema 9.8 logisch opzetten dan ontstaat een heel simpel, bijzonder overzichtelijk beeld (fig. 9.9), namelijk een eenvoudige parallel-schakeling van 3 weerstanden.

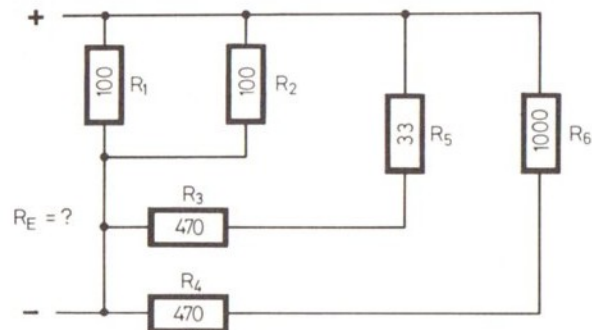


9.9

In het vervolg zullen we nog vaak gebruik maken van deze methode om schakelingen functioneel te tekenen.

Vraag

Wie van vraagstukken oplossen houdt: in fig. 9.10 een aardige hersenkraker. Maak de simpelste funktietekening, bereken de waarde van de vervangingsweerstand en controleer de uitkomst door de schakeling experimenteel op te zetten. Alle weerstanden zijn met hobbylabor samen te stellen.



9.10

9.2 Grafische voorstelling van parallel geschakelde weerstanden

Vele mensen houden niet van rekenen en werken liever met een diagram. Het resultaat is wel niet zo exact, maar de werkwijze is – na wat oefening – erg eenvoudig en het gaat veel sneller. De volgende bespreking van de grafische voorstelling kan ook tot een beter verstaan leiden van wat in het voorgaande is besproken. In het bijzonder voor hen die met behulp van een tekening een verband gemakkelijker zien dan met abstracte formules.

Konstruktie

In hoofdstuk 2.10 bespraken we hoe we het verband tussen stroom en spanning bij een bepaalde weerstand in een grafische voorstelling kunnen weergeven. Figuur 9.11 toont nogmaals dit stroom/spanningsdiagram, voor een $100\ \Omega$ - en een $470\ \Omega$ -weerstand.

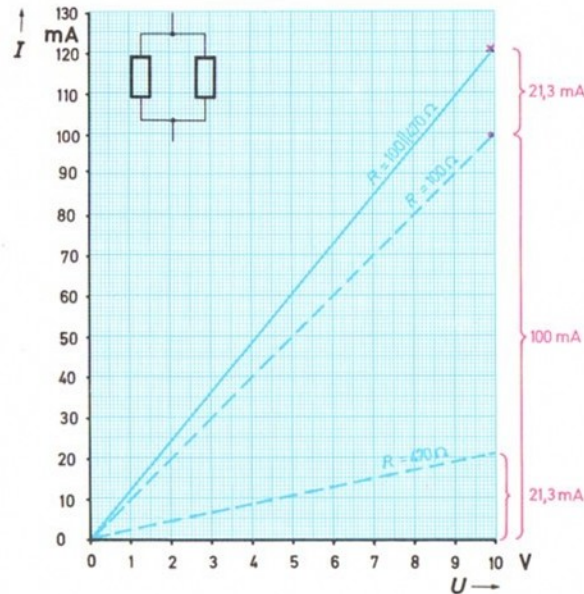
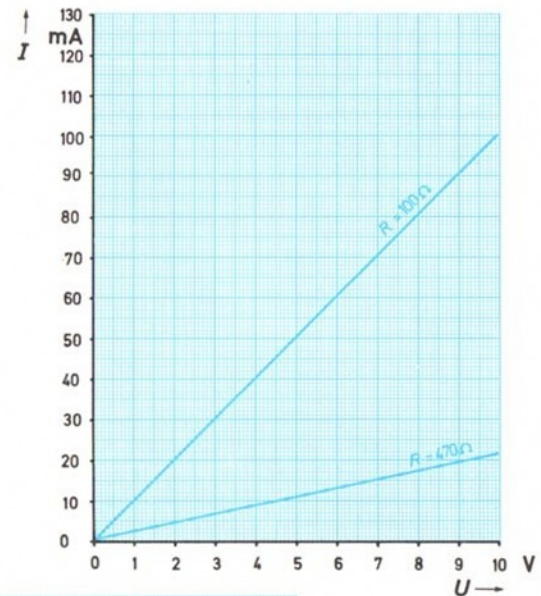
Hoe ziet nu de grafische voorstelling of karakteristiek van de parallelschakeling van $100\ \Omega$ en $470\ \Omega$ eruit?

De vervangingsweerstand kunnen we uitrekenen – die is precies $82,46\ \Omega$. De karakteristiek daarvan kunnen we in het diagram uitzetten volgens de bekende methode. Eenvoudiger is het grafisch te werk te gaan. In een parallelschakeling is de spanning op R_1 en R_2 gelijk, terwijl de deelstromen bij elkaar moeten worden opgeteld. Wat betekent dat voor het diagram?

Wel, het volgende: op de verticale as van het diagram mogen we de stroomsterktes die door R_1 en R_2 gaan, bij elkaar optellen. Het resultaat is dat we op de totale stroomsterkte door de parallelschakeling terecht komen. Daarbij zijn we natuurlijk steeds van één bepaalde spanning uitgegaan.

In fig. 9.12 is het gedaan bij een spanning van $10\ \text{V}$. Het blijft volkomen gelijk of we – zoals in de figuur – bij het stuk „ $100\ \text{mA}$ “ het stuk „ $21,3\ \text{mA}$ “ optellen of van „ $21,3\ \text{mA}$ “ uitgaan en daar „ $100\ \text{mA}$ “ bij optellen. In beide gevallen komen we in het diagram op $121,3\ \text{mA}$ uit. Uiteraard hadden we natuurlijk ook van een andere spanning kunnen uitgaan.

9.11



9.12

1. Toepassing

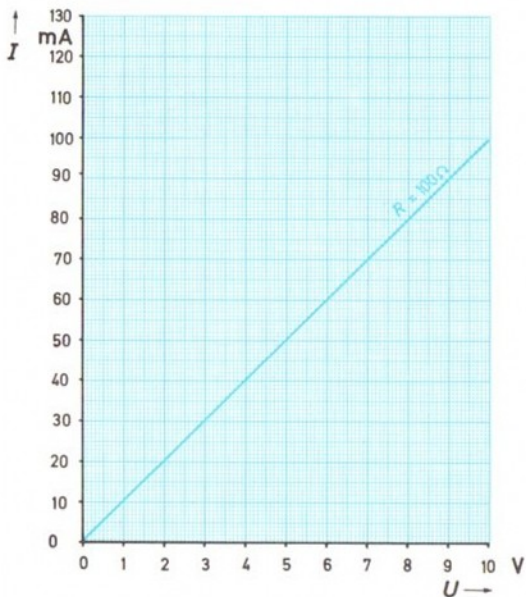
Teken in diagram 9.12 de rechte lijn voor de parallelschakeling van twee 470 Ω -weerstanden.

Misschien heeft u zelf ook al het volgende hulpmiddeltje gevonden om niet elke keer de aparte stroomcoördinaten te hoeven uitrekenen; we nemen die eenvoudig – het beste voor 10 V – met de passer of een lineaal over uit diagram 9.11 en zetten ze opnieuw uit in fig. 9.12. Vooropgesteld natuurlijk dat de maateenheden hetzelfde zijn voor beide diagrammen.

2. Toepassing

Een heel duidelijk beeld geeft ook de grafische voorstelling van een parallelschakeling van bijv. 100 Ω en 1000 Ω of van 100 Ω en 4,7 k Ω . Hierbij liggen de waarden van beide weerstanden ver uit elkaar.

In fig. 9.13 tekenen we nu de karakteristieken van 1000 Ω en 4700 Ω en verder die voor de parallelschakelingen van 100 Ω || 1000 Ω en 100 || 4700 Ω . We vinden dan de “grafische bevestiging” van de nevenstaande formulering en zien dat de karakteristieken voor de parallelschakelingen maar weinig afwijken van die voor de laagste waarde.

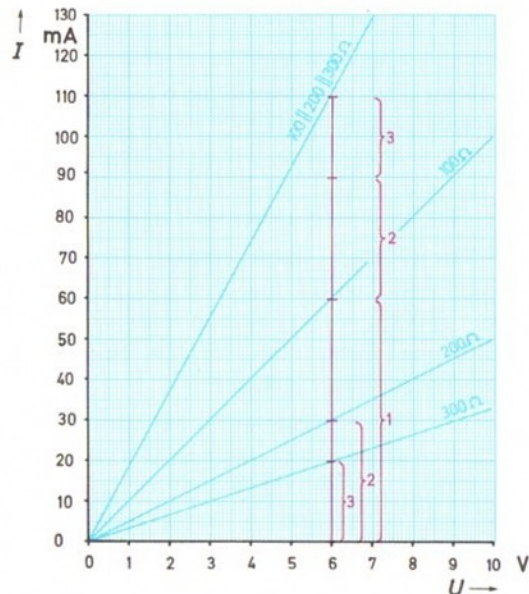


9.13

In een parallelschakeling van sterk verschillende weerstanden verandert de laagste waarde nauwelijks.

Met de beschreven methode kunnen we natuurlijk ook de karakteristiek voor de vervangingsweerstand van 3 of nog meer parallel geschakelde weerstanden verkrijgen. Fig. 9.14 toont de parallelschakeling van 100 Ω || 200 Ω || 300 Ω .

Met deze nieuwe rechte kunnen we bijv. uit het diagram aflezen hoeveel stroom er door de parallelschakeling gaat als deze op een batterij van 4,5 V is aangesloten. Het is mA. Doe nu hetzelfde voor de parallelschakeling 100 Ω || 100 Ω || 470 Ω en controleer door metingen of theorie en praktijk overeenstemmen.

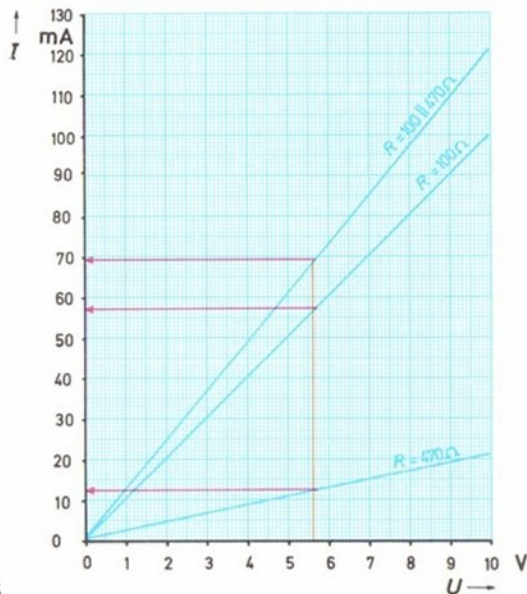


9.14

3. Toepassing

Het stroom/spanningsdiagram met z'n weerstandsrechten heeft nog een voordeel: we kunnen direct zien hoe groot bij een bepaalde spanning de deelstromen zijn die door de verschillende takken van de parallelschakeling lopen.

Stel we hebben een $100\ \Omega$ - en een $470\ \Omega$ -weerstand parallel geschakeld. In fig. 9.15 zijn de karakteristieken daarvan weergegeven. Bij een spanning van $5,7\ \text{V}$ loopt in totaal door beide een stroom van $70\ \text{mA}$. We trekken nu een loodrechte hulplijn (in fig. 9.15 geel gedrukt) door het werkpunt X en krijgen dan de snijpunten met de $100\ \Omega$ - en de $470\ \Omega$ -lijn. Naar links gaand – vanuit die snijpunten – vinden we de deelstromen. In het voorbeeld zijn deze $57\ \text{mA}$ voor de $100\ \Omega$ -, en $12\ \text{mA}$ voor de $470\ \Omega$ -weerstand.

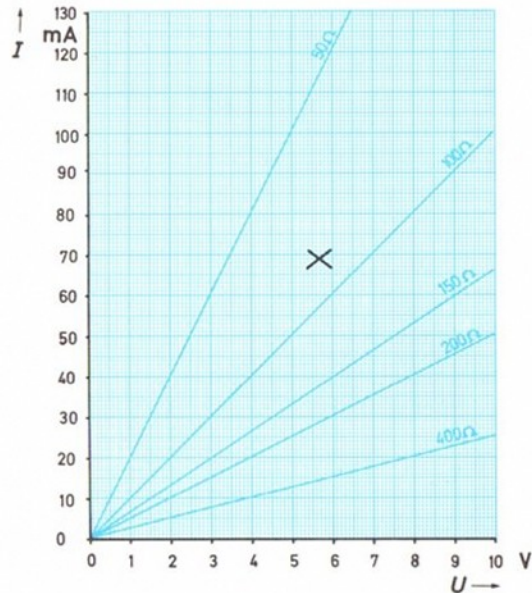


9.15

4. Toepassing

Hoe groot zijn de totale stroom en de deelstromen ongeveer in een parallelschakeling $50\ \Omega \parallel 110\ \Omega \parallel 170\ \Omega$ bij een spanning van $6,3\ \text{V}$? Voor het antwoord kijken we in diagram 9.16. Hierin zijn de rechten getekend voor ronde

waarden. De lijnen voor $110\ \Omega$ en $170\ \Omega$ hoeven we niet te berekenen, maar we schatten hun richting en tekenen ze dan in het diagram. De $100\ \Omega$ - en $200\ \Omega$ -karakteristieken geven ons daarvoor voldoende houvast.

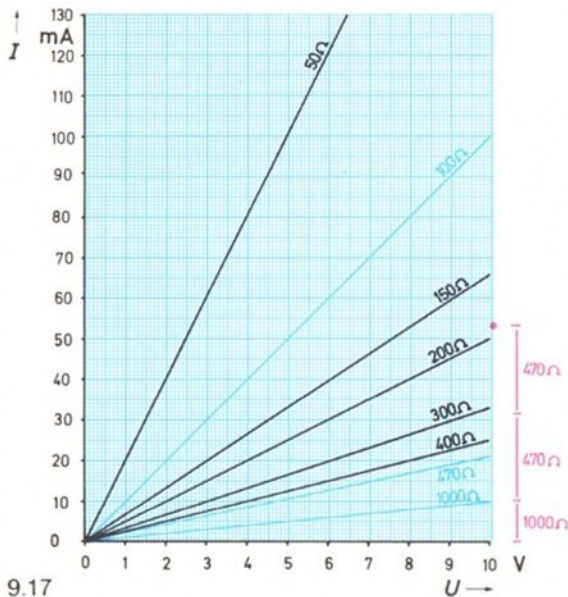


9.16

5. Toepassing

Met behulp van een stroom/spanningsdiagram en weerstandskarakteristieken kunnen we ook bepalen door welke parallelschakeling we een niet voorhanden weerstand moeten vervangen.

Stel we hebben een weerstand van $190\ \Omega$ nodig; deze moeten we verkrijgen door een aantal weerstanden parallel te schakelen. We gebruiken daarvoor het diagram 9.17. Hierin zijn enige karakteristieken getekend voor ronde waarden en in het blauw enige van de hobbylabor weerstanden. De gezochte waarde van $190\ \Omega$ is op de $10\ \text{V}$ -lijn aangegeven met een rode punt. De daarbij behorende stroomcoördinaat is nu samen te stellen met twee lijnstukken $470\ \Omega$ en één lijnstuk $1000\ \Omega$. Ga met een meting of een berekening na of deze redenering juist is.



9.17

Vragen

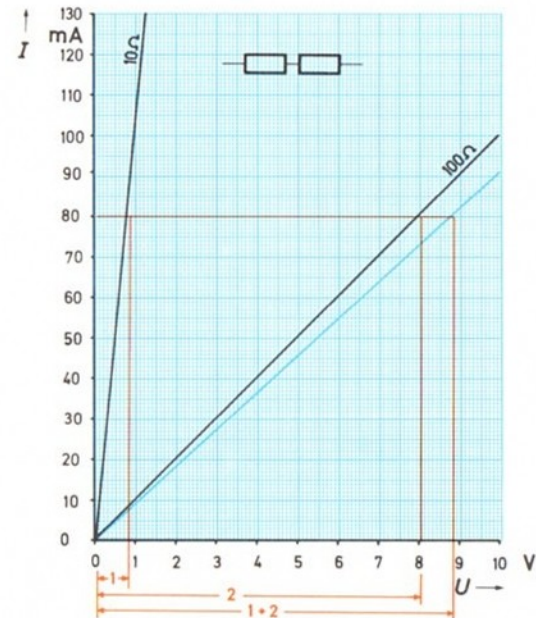
Bepaal op dezelfde wijze de weerstanden die parallel geschakeld een vervangingsweerstand opleveren van 60Ω . In dit geval kunnen we beter op de 5 V-lijn werken in plaats van op de 10 V-lijn. Hoe groot zijn de deelstromen bij een spanning van 9,0 V.?

Welke weerstanden – uit hobbylabor – moeten we parallel schakelen met een 470Ω -weerstand om een ongeveer zes keer zo hoge stroom te krijgen? Vooropgesteld natuurlijk dat de spanning hetzelfde blijft. (Een opgave van de spanning is niet nodig, daar de oplossing voor alle spanningen geldt).

Wie zich geheel thuis voelt in deze materie mag zich het hoofd over het volgende breken: in welke belastingsgroep (0,25 Watt – 0,5 Watt – 1 Watt) moet de parallelweerstand vallen, die we in de voorgaande proef hebben verkregen? De aangelegde spanning bedraagt 6 V. Welke spanning mag hoogstens worden aangesloten wanneer we alleen over een weerstand type 0,25 W beschikken?

9.3 De grafische voorstelling van in serie geschakelde weerstanden

De methode ter bepaling van de karakteristiek van een serieschakeling is weergegeven in fig. 9.18. Uitgangspunt is dat de stroomsterkte in een serieschakeling van weerstanden overal even groot is.



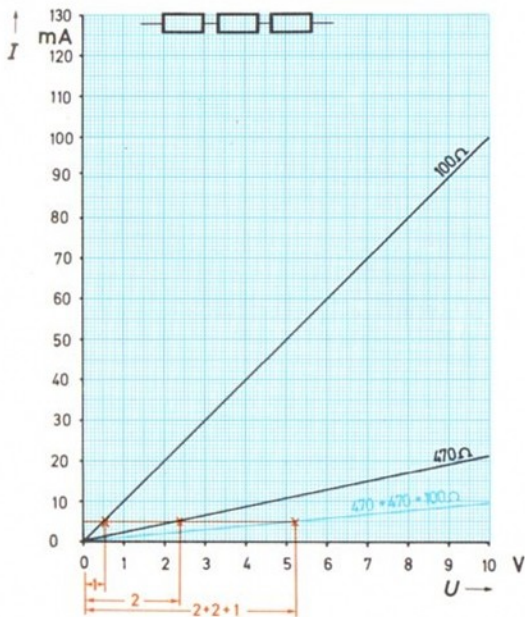
9.18

Konstruktie

We tellen nu de spanningsstukken van de in serie geschakelde weerstanden bij elkaar op. De stroomsterkte mag willekeurig worden gekozen, bijv. 80 mA. De geel getekende lijn 1 is het spanningsstuk voor $R_1 = 10 \Omega$ en lijn 2 is het spanningsstuk voor $R_2 = 100 \Omega$.

Het eind van de stukken 1+2 is het punt waar de rechte van de serieschakeling $100 + 10 \Omega = 110 \Omega$ doorheen moet gaan. Deze rechte is in het blauw afgebeeld.

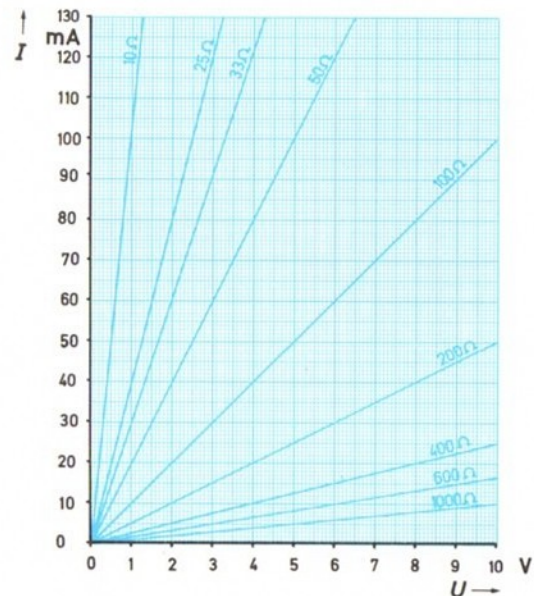
Fig. 9.19 laat zien hoe we de rechte voor de serieschakeling van $100 \Omega + 470 \Omega + 470 \Omega$ verkrijgen. Op de 5 mA lijn tellen we bijv. op: een spanningsstuk voor 100Ω en twee spanningsstukken voor 470Ω . Aan het eind van de drie stukken ligt het punt waar de rechte van de serieschakeling doorheen gaat.



9.19

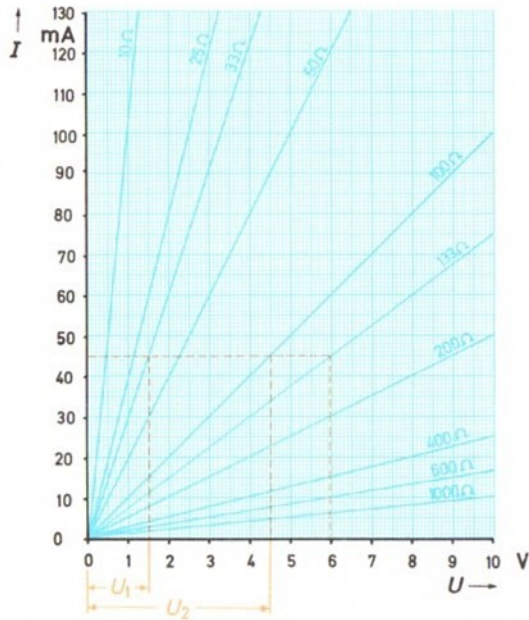
1. Toepassing

Figuur 9.20 heeft een aantal rechten voor ronde weerstandswaarden. Bepaal eerst met behulp van het diagram welke weerstanden uit hobbylabor we nodig hebben die in serie geschakeld een totale weerstand van ongeveer 140Ω hebben. U zult zeggen: "Daar heb ik geen diagram voor nodig, dat doe je sneller uit het hoofd." Daar heeft u gelijk in. Maar het wordt anders wanneer we het volgende willen weten: welke spanning staat er op de grootste van de beide weerstanden, als de serieschakeling resp. is aangesloten op een 4,5 V batterij en een trafo van 6 V? En hoe groot is in beide gevallen de stroomsterkte? In zulke gevallen loont het de moeite met de grafieken te werken.



9.20

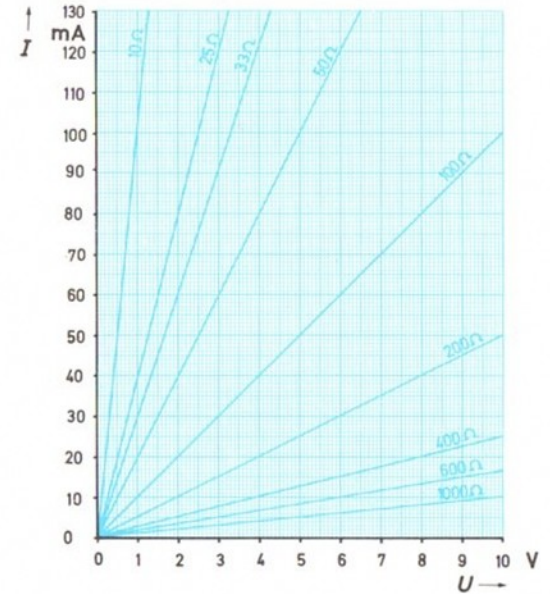
In fig. 9.21 zien we een combinatie van $100\ \Omega + 33\ \Omega = 133\ \Omega$ aangesloten op een spanning van 6 V. De deelspanningen U_1 en U_2 zijn eveneens op de spanningsas af te lezen door vanuit het snijpunt van resp. de $100\ \Omega$ - en $33\ \Omega$ -rechte met de horizontale stroomsterktelijn, loodrecht naar beneden te gaan (gele hulplijnen).



9.21

Opgave

Bepaal langs grafische weg (fig. 9.22) de stroomsterkte die door een serieschakeling van $100\ \Omega + 33\ \Omega + 100\ \Omega + 10\ \Omega$ loopt als daar een spanning van 6 V op staat. Welke spanning moeten we aanleggen om een stroomsterkte van precies 40 mA te krijgen. Hoe hoog zijn in dat geval de deelspanningen?



9.22

9.4 Grafische voorstelling van netwerken

Bijzonder interessant is de grafische voorstellingswijze voor de combinatie van serie-en parallelschakelingen. Daarmee kunnen we voor een heel netwerk van weerstanden bij benadering zeer snel de waarden van de verschillende grootheden bepalen. Figuur 9.23 toont een eenvoudig netwerk.

Vraag: in welke tak, de linker met één weerstand of de rechter met twee weerstanden, loopt nu de meeste stroom? Voor de beantwoording is natuurlijk geen grafiek nodig. Wie twijfelt aan zijn antwoord, bouwt de schakeling en meet een en ander.

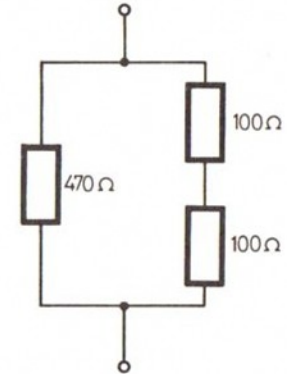
Konstruktie

Aan de hand van het eenvoudige netwerk van fig. 9.23 bespreken we de grafische voorstellingswijze.

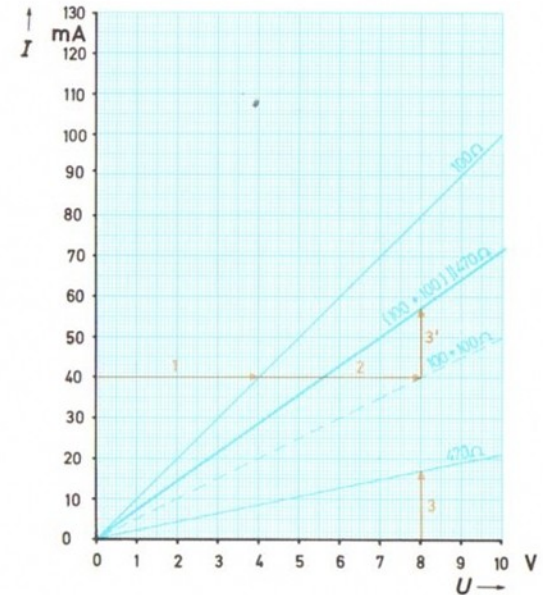
Om de deelstromen te bestuderen bij een willekeurige spanning tussen 0 en 10 volt hebben we een stroom/spanningsdiagram nodig met de rechten voor weerstanden van $470\ \Omega$ en $100\ \Omega$, zoals in fig. 9.24 is weergegeven. Eerst vereenvoudigen we de serieschakeling van de twee $100\ \Omega$ -weerstand en bepalen we de karakteristiek van de vervangingsweerstand. We verlengen het spanningsstuk 1 met eenzelfde stuk 2 (dit voert tot hetzelfde resultaat als de voorgaande, wat uitgebreider besproken methode voor de serieschakeling). Door het eindpunt van het lijnstuk 2 moet de rechte lopen voor de serieschakeling van $100\ \Omega + 100\ \Omega$. Eigenlijk zijn we niet in deze lijn geïnteresseerd en we mogen hem ook weglaten; in fig. 9.24 is hij daarom gestippeld getekend. We schakelen nu parallel aan deze vervangingsweerstand de $470\ \Omega$ -weerstand.

In het diagram moeten we alleen lijnstuk 3 (voor de $470\ \Omega$ -weerstand) met een cirkelboog of lineaal loodrecht naar boven afpassen vanaf het eindpunt van lijnstuk 2.

In de figuur is dit lijnstuk 3' (spreek uit drie aksent). Belangrijk is natuurlijk dat de lengte van stuk 3 precies loodrecht naar beneden vanuit het eindpunt van 2 wordt bepaald. Bij verschuiving naar links of rechts zal de waarde te klein of te groot worden.



9.23



9.24

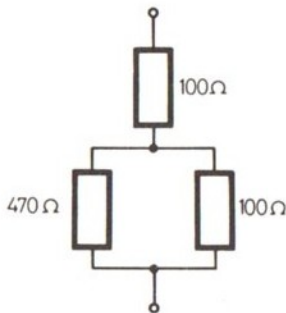
De gezochte weerstandsrechte ($100\ \Omega + 100\ \Omega$) \parallel $470\ \Omega$ moet nu door het eindpunt van lijnstuk 3' gaan. In fig. 9.24 is deze lijn dik en blauw gedrukt. We kunnen nu de nevenstaande regel formuleren.

1. Toepassing

Uit het diagram kunnen we aflezen dat bij een spanning van 6 V de totale stroomsterkte ongeveer 43 mA bedraagt. Meet dit na. Bepaal daarna met diagram 9.24 de stroomsterkte in de beide takken bij een spanning van 8,5 volt. Hoe hoog zijn dan de deelspanningen op de beide in serie geschakelde weerstanden?

2. Toepassing

Figuur 9.25 geeft een andere combinatie van weerstanden. Bepaal de totale stroomsterkte, de deelspanningen en de deelstromen, wanneer de schakeling wordt aangesloten op een u ter beschikking staande spanningsbron. Meet een en ander na ter controle. (In dit geval moet eerst voor de parallelschakeling een vervangingsweerstand worden bepaald).



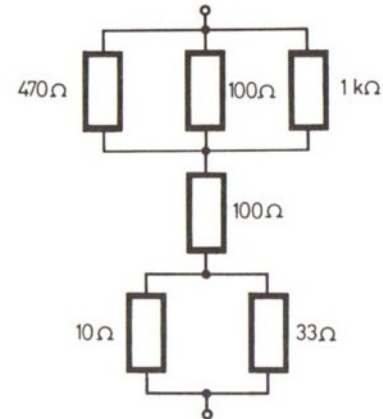
9.25

3. Toepassing

Teken de karakteristiek voor de vervangingsweerstand van het netwerk 9.26. Bepaal met behulp van de grafische voorstelling de verschillende deelspanningen en deelstromen bij een bekende totaalspanning. Controleer daarna de uitkomsten met metingen.

In serie schakelen betekent in een grafiek: de spanningslijnstukken naar rechts verlengen.

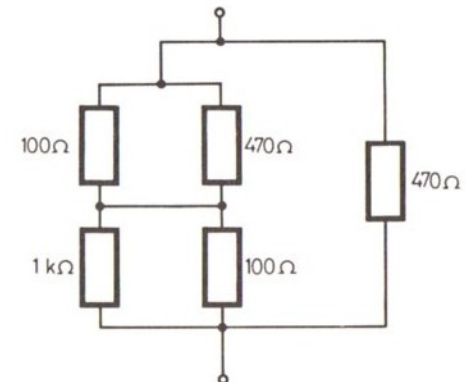
Parallel schakelen betekent in een grafiek: de stroomlijnstukken naar boven verlengen.



9.26

4. Toepassing

Wie het leuk vindt kan ook nog de karakteristiek bepalen van de vervangingsweerstand voor schakeling 9.27, de deelstromen en de deelspanningen.



9.27

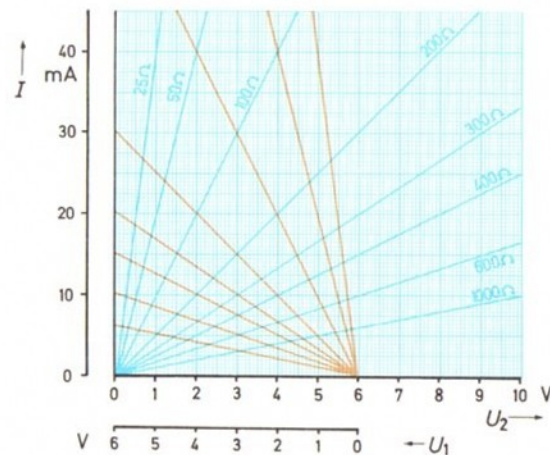
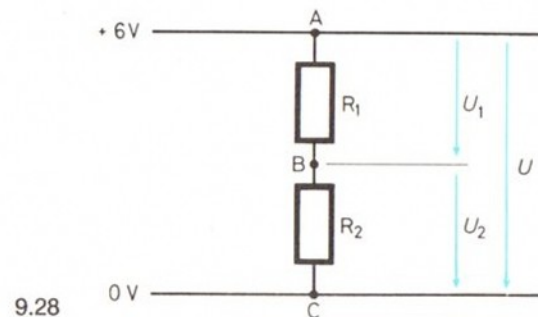
9.5 Stroom/spanningsdiagram van de spanningsdeler

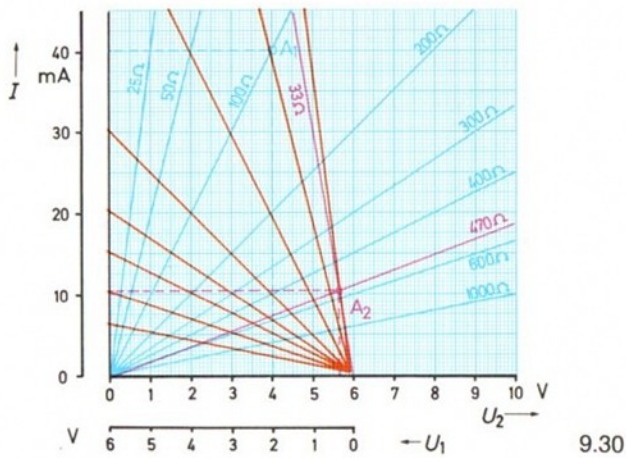
In hoofdstuk 3 is de grafische voorstelling van een spanningsdeler in feite al besproken, want elke serieschakeling is niets anders dan een spanningsdeler.

Toch komen we nu nog een keer terug op de beschouwingwijze die in hoofdstuk 7.12 al in het kort is behandeld. Deze beschouwing berust hierop, dat we het ene deel van de spanningsdeler als een kunstmatige inwendige weerstand van een spanningsbron opvatten. (Dat deel kan onder bepaalde omstandigheden uit verschillende elementen bestaan). Een en ander is in figuur 7.4 afgebeeld, waarvan fig. 7.5 is afgeleid, die weer precies met fig. 9.28 overeenkomt. Zetten we nu op de klemmen A-C van deze spanningsdeler een spanning van bijv. 6 V dan staat op de aansluitingen B-C een spanning U_2 . De hoogte daarvan is afhankelijk van de weerstanden R_1 en R_2 . In het diagram 9.29 kunnen we voor $U = 6$ V de deelspanningen U_1 en U_2 voor verschillende waarden van R_1 en R_2 vinden. Hoe dat gaat volgt nu.

Konstruktie

De verschillende, uit de oorsprong komende weerstandsrechten (blauwe lijnen) voor R_2 zijn op de bekende wijze verkregen (zie hoofdstuk 2.10). In het punt 6 V op de horizontale as zijn in spiegelbeeld enige (gele lijnen) weerstandsrechten voor R_1 aangegeven. Daar we R_1 als een kunstmatige inwendige weerstand opvatten van een 6 volts spanningsbron, geldt dit diagram alleen voor deze ene bron. Als de werkspanning U een andere waarde heeft, dan moet ook de oorsprong voor R_1 worden verlegd. De konstruktie van een dergelijke karakteristiek is al beschreven in hoofdstuk 7.12, fig. 7.29.





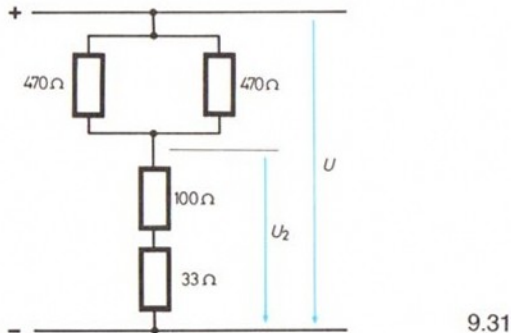
1. Toepassing

Stel dat we de deelspanning U_2 willen bepalen als $R_1 = 50 \Omega$ en $R_2 = 100 \Omega$. We zoeken dan het snijpunt van hun bijbehorende rechten. In fig. 9.30 is dit snijpunt met A_1 (blauw) aangegeven. De spanning U_2 die daar bij behoort vinden we door loodrecht naar beneden te gaan, op de spanningsas. Hoe groot de stroomsterkte in de kring is vinden we op de stroomas. In het voorbeeld krijgen we $I = 40 \text{ mA}$ en $U_2 = 4 \text{ V}$.

In diagram 9.29 zijn alleen ronde waarden voor R_1 en R_2 genomen. Hoe we het werkpunt voor willekeurige tussen gelegen waarden van R_1 en R_2 vinden, laat fig. 9.30 zien met het voorbeeld van $R_1 = 33 \Omega$ en $R_2 = 470 \Omega$. Hoe groot is de deelspanning U_2 en hoe groot de stroomsterkte? De deelspanning U_1 kunnen we op de onderste spanningschaal aflezen. Welke waarde moeten de beide spanningen tezamen opleveren?

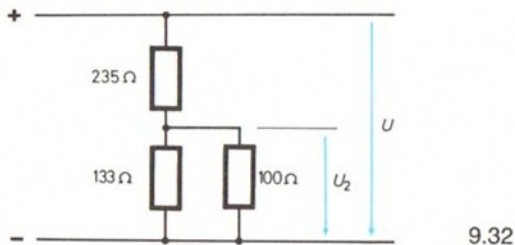
2. Toepassing

Konstrueer een zelfde diagram voor een willekeurig gekozen spanning U die bijv. met een trafo is in te stellen en bepaal de waarden voor de spanningsdeler van fig. 9.31. Controleer door meting of de uit het diagram verkregen waarden juist zijn.



3. Toepassing

Natuurlijk geldt het diagram ook voor een belaste spanningsdeler vlg. fig. 9.32 bij een bepaalde spanning. In dit geval moeten we voor R_2 de vervangingsweerstand bepalen van de parallelschakeling $133 \Omega \parallel 100 \Omega$, waarna we het werkpunt kunnen vinden.



Algemene toepassing

In elektronische schakelingen komt het vaak voor dat halfgeleiders, zoals bijv. een transistor, tezamen met een Ohmse weerstand een spanningsdeler vormen. In dergelijke gevallen is het werkpunt alleen met de grafische voorstellingswijze te vinden. De stroom/spanningskarakteristieken voor halfgeleiders zijn namelijk geen rechte lijnen, maar krommen. Hobbylabor 2 zal dit onderwerp uitvoerig behandelen.

9.6 De wetten van Kirchhoff

Het vervangende schakelschema voor een netwerk bestaande uit verschillende netwerken, zoals in fig. 9.33, is niet meer zo gemakkelijk te konstrueren. De grootte van de vervangingsweerstand voor de hele schakeling is natuurlijk heel simpel te vinden door het totale spanningsverschil en de stroomsterkte te meten en daarna de wet van Ohm toe te passen. Hetzelfde geldt voor de deelstroom en deelspanningen. Maar wie niet wil meten, maar beredeneren en rekenen heeft twee wetten nodig, die door de natuurkundige Kirchhoff (1824–1887) zijn geformuleerd en naar hem vernoemd.

Knooppuntenregel

In elk knooppunt is de som van de aankomende stromen gelijk aan de som van de vertrekkende stromen.

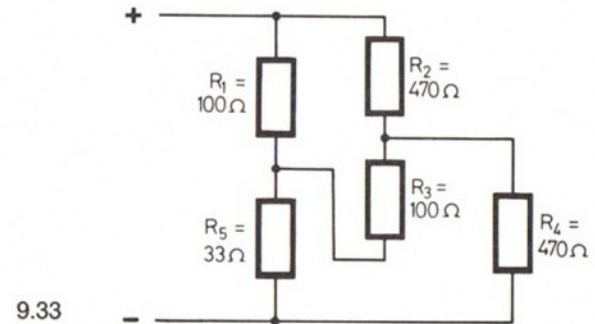
Mazenregel

In elke maas is de som van de deelspanningen gelijk aan de som van de spanningen die de bronnen in die maas leveren.

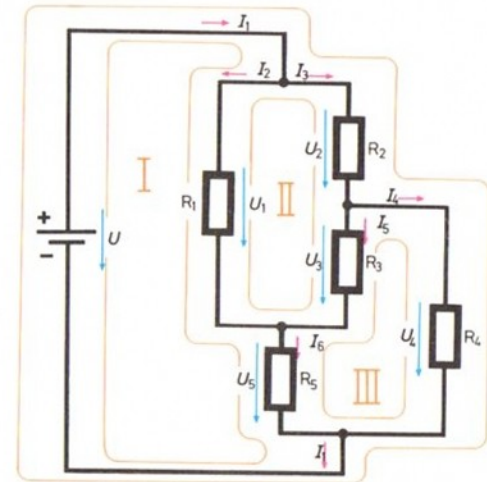
Algemeen gezegd: in een stroomkring is de som der spanningen van de bronnen gelijk aan de som van de deelspanningen. In fig. 9.34 betekent dit $U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5$ of zoals deze wet vaak wordt geschreven $U - (U_1 + U_2 + U_3 + U_4 + U_5) = 0$.

Het zou te ver voeren om de berekeningen voor de verschillende deelspanningen en deelstromen nu te bespreken. Alleen dit: Men stelt een aantal vergelijkingen op dat één groter is dan het aantal onbekenden (in fig. 9.34 de stromen I_1 t/m I_6).

In hobbylabor 2 komen we nog op beide regels terug.



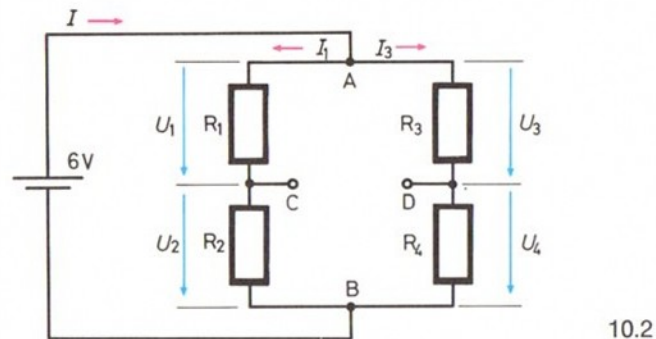
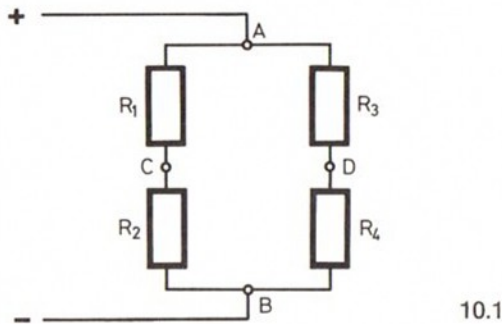
9.34



10 De brugschakeling

De brugschakeling komt in de elektronica en de meettechniek bijzonder vaak voor. De schakeling wordt verkregen door 2 eenvoudige spanningsdelers vlg. fig. 10.1 parallel te schakelen. Met de brugschakeling kunnen zeer fijne metingen worden verricht, mits de schakeling de juiste konstruktie heeft.

Van de vele mogelijkheden bespreken we de schakeling van fig. 10.1 die naar de Engelse natuurkundige Charles Wheatstone (1802–1875) de brug van Wheatstone heet. We onderzoeken alleen de fundamentele aspecten; over dit soort schakelingen en hun toepassingen zijn namelijk boeken vol te schrijven.

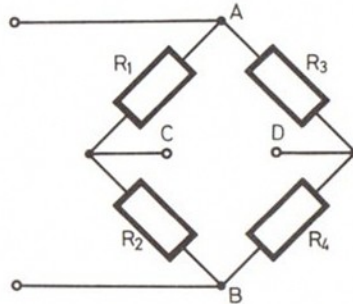


10.1 Opbouw

Figuur 10.2 toont hoe de spanningsdeler $(R_1 + R_2)$ parallel geschakeld is met spanningsdeler $(R_3 + R_4)$. De schakeling heeft twee knooppunten A en B, alsmede de beide werkpunten C en D. Op het knooppunt verdeelt de stroom I zich over de beide spanningsdelers en ontstaan de deelstromen I_1 en I_3 . Op de werkpunten C en D wordt de aangelegde spanning U in de deelspanningen U_1 , U_2 , U_3 en U_4 gesplitst.

10.2 Inleidende experimenten

Heel vaak zien we ook de weergave als in fig. 10.3. De verbinding CD noemen we de diagonaaltak, de serieschakeling van R_1 met R_2 aan de ene kant en R_3 met R_4 aan de andere kant heten de brugtakken.



10.3

We gaan nu onderzoeken hoe de schakeling zich in de punten C en D gedraagt als we de vier weerstanden in een bepaalde verhouding tot elkaar kiezen.

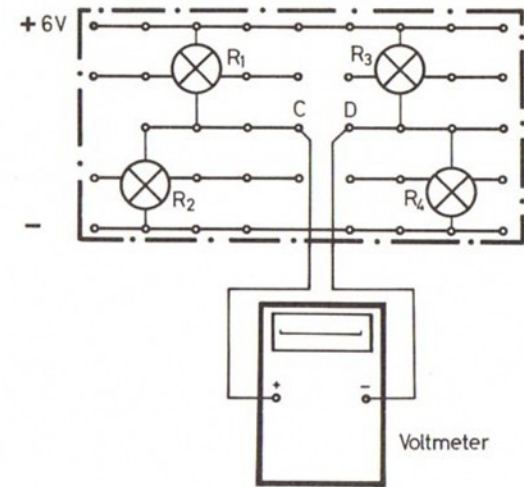
1. Proef

We bouwen de schakeling van fig. 10.2. Voor de weerstanden nemen we vier hobbylabor lampen. Figuur 10.4 laat de opbouw van de schakeling zien op het MSP.

U zult zien dat de lampen niet alle even helder branden. We meten de totale spanning tussen A en B en alle deelspanningen, de spanning tussen C en D, en de deelstromen I_1 en I_3 .

De (+)pool van de meter zetten we eerst op C en de (-)pool op D. Hetzelfde doen we bij alle volgende proeven. De meetwaarden noteren we in tabel 10.5.

10.4



10.5

meet- waarden	4 lampen		$R_1 = R_2 = 470 \Omega$ en $R_3 = R_4 = 100 \Omega$	$R_1 = R_3 = 470 \Omega$ en $R_2 = R_4 = 100 \Omega$
	wille- keurig	La3 en La4 ver- wisseld		
U in V				
U_1 U_2 U_3 U_4 in V				
U_{C-D} in V				
I_1 I_3 in mA				

Een korte opmerking over het gebruik van letters. Voor C-D schrijven we voortaan CD. Het gebruik van hoofdletters en hun volgorde is in de elektronika aan regels gebonden. Op de 2e plaats komt steeds het punt te staan ten opzichte waarvan het potentiaal van het andere punt betrekking heeft. In ons voorbeeld luidt de vraag: heeft het punt C ten opzichte van punt D een positief, negatief of hetzelfde potentiaal?

Daarmee komt overeen dat U_{CD} een positief of een negatief teken heeft, of dat U_{CD} gelijk aan nul is.

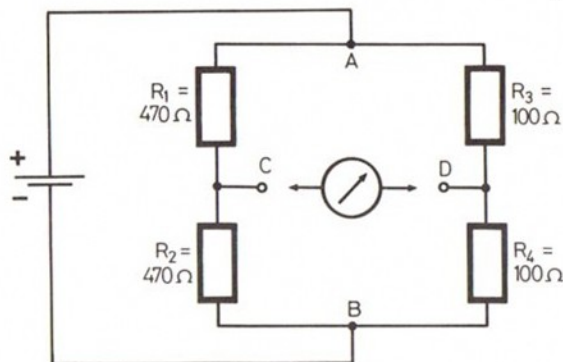
Als de wijzer van de voltmeter bij het meten van de spanning U_{CD} naar links uitslaat, moeten we de aansluitingen verwisselen. De meetwaarde noteren we met een min-teken ervoor, in de tabel. Daarna verwisselen we lamp 3 en 4 en we meten opnieuw de spanning U_{CD} . De wijzer moet nu in de tegenovergestelde richting uitslaan als bij de eerste meting. Ook deze waarde noteren we in tabel 10.5. Stel dat de wijzer bij de eerste meting naar rechts uitslaat en 0,2 V aanwijst. Wanneer we dan La_3 en La_4 van plaats verwisselen moet de wijzer naar links uitslaan volgens de eerder genoemde regel van (+) aan C en (-) aan D. We draaien de aansluitingen van de voltmeter om en kunnen dan de waarde van de spanning aflezen.

2. Proef

Als de lampen min of meer even fel branden, zullen we voor U_{CD} een kleine spanning meten. Wat gebeurt er als we voor een van de vier lampen, een lamp uit hobby 3 of de em doos nemen?

3. Proef

De weerstand van een lamp is, zoals we in hoofdstuk 4.9.3 zagen, een vrij onzekere zaak. Voor exacte onderzoeken vervangen we de lampen daarom door weerstanden, als in fig. 10.6 aangegeven. Opnieuw meten we alle spanningen en eveneens de deelstromen. Ook hier zullen we waarschijnlijk voor U_{CD} een kleine uitslag krijgen. Door R_3 en R_4 of R_1 en R_2 te verwisselen wordt het teken van de uitslag veranderd.



10.6

In elk geval zullen de deelspanningen $U_1 - U_2 - U_3 - U_4$ ongeveer even hoog zijn. De waarden noteren we weer in tabel 10.5.

4. Proef

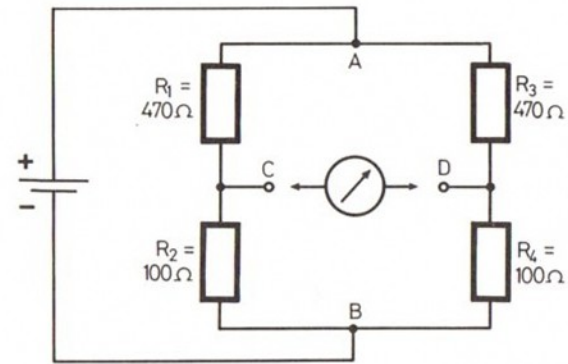
We schakelen dezelfde weerstanden nu volgens fig. 10.7 en meten weer de spanningen en stromen als vermeld in tabel 10.5.

Nu is U_1 wel even groot als U_3 en U_2 als U_4 , maar de verhouding van $U_1 : U_2$ is niet meer dezelfde als in proef 2, waar die 1 : 1 was. De verhouding is ongeveer 5:1 geworden. Hetzelfde geldt voor U_3 en U_4 . Toch is ook in dit geval de spanning U_{CD} weer bijna nul. Verwissel in deze schakeling R_1 en R_2 , het resultaat is een zeer grote uitslag bij de metingen van U_{CD} .

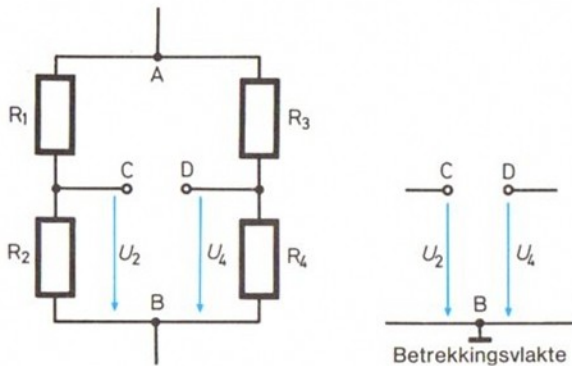
Experimenteer zelf met deze schakeling door weerstanden te verwisselen of te vervangen door andere. Probeer de verhoudingen te vinden voor de weerstandswaarden (resp. de spanningen), waarbij U_{CD} gelijk (of nagenoeg gelijk) is aan nul.

Misschien komt u er achter voor u aan de volgende pagina's begint.

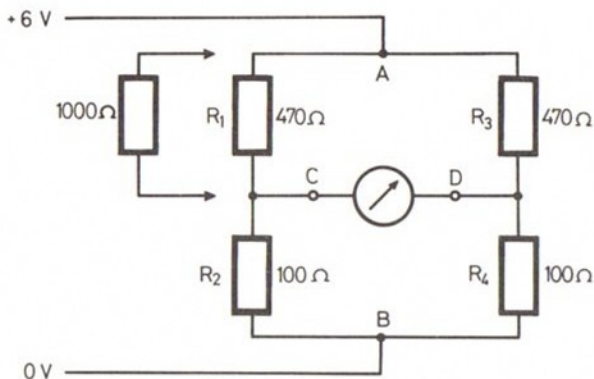
10.7



Een brug heet ingesteld als de weerstandsverhoudingen in beide spanningsdelers precies gelijk zijn.



10.8



10.9

10.3 De ingestelde brug

Uit de proeven blijkt dat U_{CD} steeds nul is wanneer de verhouding van de weerstanden in de ene spanningsdeler precies gelijk is aan de verhouding van de weerstanden in de andere spanningsdeler. We zeggen dan dat de brug is ingesteld.

We kunnen nu de volgende betrekking wiskundig formuleren:

$$\text{wanneer } \frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \text{ dan is } U_{CD} = 0$$

Voor de deelspanningen geldt:

$$\text{wanneer } \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_3}{U_4} \text{ dan is } U_{CD} = 0$$

Belangrijk is dat een brug ook ingesteld kan zijn, terwijl de deelstromen door de beide spanningsdelers een groot verschil vertonen. Een en ander blijkt uit tabel 10.5.

De verschillende waarden van de weerstanden zijn daarbij in het geheel niet belangrijk, noch de stroomsterktes; waar het alleen op aankomt, is de verhouding van de weerstanden.

We verwijzen nog even naar hoofdstuk 4.7 waarin het een en ander over het begrip potentiaalverschil is besproken.

Tussen de punten C en D zal geen spanning – potentiaalverschil – optreden, wanneer beide punten hetzelfde potentiaal – bijv. ten opzichte van punt B – hebben (fig. 10.8).

Een andere vraag is waarom de meter bij de aangegeven poling (+ aan C) de ene keer naar links en de andere keer naar rechts uitslaat, als de brug niet precies is ingesteld.

Proef

We zetten de schakeling 10.7 weer op. We nemen aan dat de brug is ingesteld, ook als dat niet precies het geval zou zijn.

We verlagen nu (fig. 10.9) de waarde van R_1 door een 1000 Ω -weerstand parallel te schakelen.

Wat is het gevolg? R_1 wordt kleiner en daarmee ook U_1 . Dat betekent ook dat U_2 evenveel hoger moet worden. Maar dan zal het (+) potentiaal van C ten opzichte van B (het vergelijkingspunt) (zie fig. 10.8) stijgen. Het potentiaal op punt D is echter niet veranderd, zodat nu tussen C en D een potentiaalverschil optreedt. Punt C wordt „positiever“ dan punt D. De wijzer zal naar rechts uitslaan, waarvan u zich zelf kunt overtuigen.

Eveneens zal de wijzer naar rechts uitslaan als we een 1000 Ω -weerstand parallel met R_4 schakelen en daarmee zijn waarde verlagen. In dit geval daalt het (+) potentiaal van D ten opzichte van B; het wordt kleiner dan het (+) potentiaal van C. Ook nu ontstaat een positief potentiaalverschil, punt C is immers „positiever“ dan punt D geworden.

Het wordt anders als we R_2 verkleinen door een 1000 Ω -weerstand parallel te schakelen. In dat geval daalt het (+) potentiaal van C en wordt „negatiever“ dan D. De wijzer slaat dan naar links uit. Hetzelfde gebeurt als we R_3 verkleinen. Ga dit zelf na.

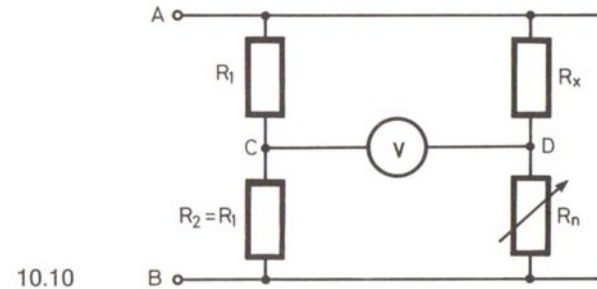
De spanning U_{CD} krijgt een (+) teken (we mogen het ook weglaten) als punt C tegenover punt D (in vergelijking tot punt B) een hoger (+) potentiaal voert, anders gezegd: wanneer C positiever dan D is. U_{CD} krijgt een (-) teken (dat kunnen we niet weglaten), wanneer het (+) potentiaal van C kleiner wordt dan dat van punt D (natuurlijk weer met betrekking tot het potentiaal van B = 0). Nu is C namelijk „negatiever“ dan D.

Lees zo nodig hoofdstuk 4.7 nog eens door, waarin een aantal belangrijke principes worden besproken, die bestlist bekend moeten zijn voor de nog volgende elektronische experimenten. Een transistor bijv. reageert totaal verkeerd, wanneer het onjuiste potentiaal wordt aangesloten.

10.4 Toepassingen

10.4.1 Meten van weerstanden

De besproken brugschakeling speelt in de meettechniek een zeer belangrijke rol. Stel we willen de waarde van de weerstand R_x meten. In gedachten bouwen we daartoe de schakeling van fig. 10.10. R_1 nemen we even groot als R_2 . De potmeter van 10 k Ω



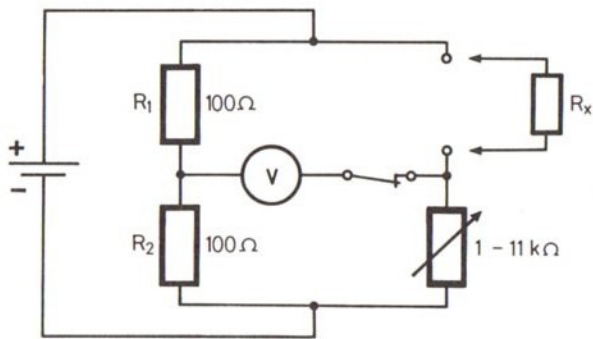
(aansluitingen A en S) noemen we R_N . We kunnen er de brug mee instellen. Voor de ingestelde brug geldt:

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_1}{R_2} \text{ verder } R_1 = R_2 \text{ en } R_x = R_n \cdot \frac{1}{1}$$

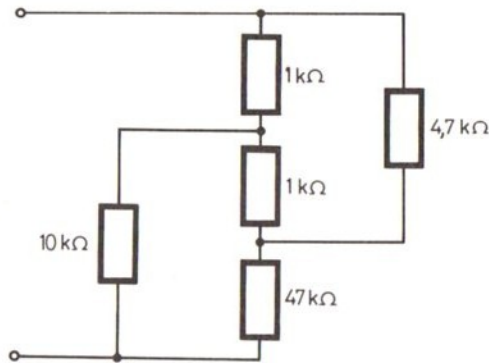
$$R_x = R_n$$

De gezochte waarde R_x is dus gelijk aan de bekende waarde R_n , op het moment dat $U_{CD} = 0$.

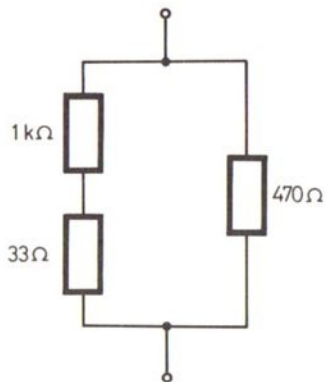
Als we een geijkte regelweerstand R_n hebben met een schaal waarop we de ingestelde waarde kunnen aflezen, dan hebben we exact de waarde van de onbekende weerstand.



10.11



10.12



10.13

Er zijn een aantal voordelen verbonden aan het meten met een dergelijke brug. Om te beginnen maakt het niet uit hoe hoog de aangelegde spanning U is. De verhouding van de spanningen hangt alleen af van de weerstandsverhoudingen. Het instellen op nul is met een meter die ook links van nul (zoals de ft-meter) nog enige ruimte heeft, bijzonder nauwkeurig te doen. Meetapparatuur die alleen voor deze doeleinden dient, heeft daarom de nul in het midden van de schaalverdeling. Een ander voordeel is dat aan de precisie van het meetwerk geen hoge eisen hoeven te worden gesteld. Elk instrument kan precies nul aanwijzen. De nauwkeurigheid van de meting hangt dan ook alleen van de nauwkeurige ijking van de regelweerstand af.

1. Proef

Meet met een brugschakeling vlg. fig. 10.11 het netwerk van fig. 10.12.

De opbouw wordt wat lastig met al die weerstanden op het MSP. Zet daarom 2 aansluitingen in een bus. Dit kan zonder enig bezwaar.

We draaien de knop van de potmeter in de stand, waarin de voltmeter geen uitslag meer geeft. Ter controle is een drukknop opgenomen. De instelling is precies goed wanneer de wijzer bij het indrukken en loslaten van de knop geen enkele reactie vertoont. In tabel 5.15, resp. 5.20 hebben we een ijkgrafiek en een ijktabel gemaakt voor de potmeter. Hierin kunnen we de weerstandswaarde vinden voor de stand van de draaiknop. Die waarde is dan de vervangingsweerstand voor het onderzochte netwerk.

2. Proef

Bepaal de waarde van de schakeling 10.13. We zullen zien dat de instelling met de 10 kΩ potmeter niet lukt omdat we niet lager dan 1 kΩ kunnen komen. Het netwerk 10.13 heeft een weerstand van ongeveer 300 Ω.

We moeten daarom het meetbereik van de brug veranderen. Vervang de weerstand $R_2 = 100 \Omega$ door een 1000Ω -weerstand. De delerverhouding $R_1 : R_2$ is nu 1:10. Na de instelling van de brug geldt de reeds bekende formule:

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

Waaruit volgt $R_2 = 10 \cdot R_1$ en $R_x = 0,1 R_n$.

Het meetbereik van de brug bij deze delerverhouding $R_1 : R_2$ ligt zo tussen 100 tot 1100Ω .

Als we met de brug weerstanden tussen $10 \text{ k}\Omega$ en $110 \text{ k}\Omega$ willen meten dan nemen we voor $R_1 = 1000 \Omega$ en voor $R_2 = 100 \Omega$. We krijgen nu:

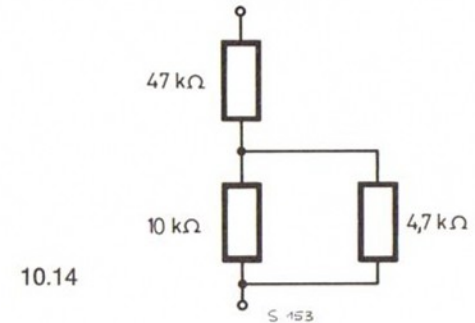
$$R_x = \frac{1000}{100} \cdot R_n = 10 \cdot R_n$$

3. Proef

We kunnen de weerstand van het netwerk in fig. 10.13 ook verkrijgen door $R_1 = R_2 = 100 \Omega$ te nemen en als regelweerstand de $1 \text{ k}\Omega$ potmeter zoals in schakeling 10.11 is weergegeven.

4. Proef

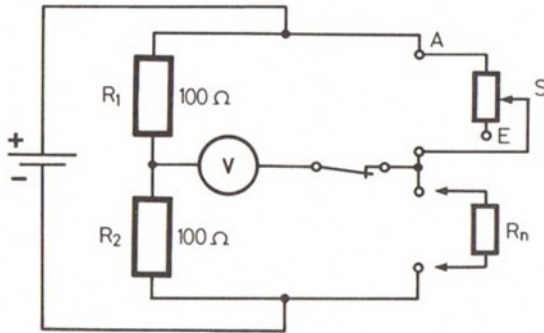
Bepaal de vervangingsweerstand van schakeling 10.14. Controleer de meting door de waarde ook te berekenen.



10.4.2 Het ijkjen van de potentiometer met de brug

We hebben de $10 \text{ k}\Omega$ -potmeter reeds tweemaal geijkt. Met de brug doen we het nu voor de 3e keer om een vergelijking te kunnen trekken met de reeds verkregen ijkcurves. Bovendien leren we de eigenaardigheden die elke potmeter bezit, beter kennen.

Zet de schakeling 10.15 op, als onbekende weerstand R_x gelden nu de aansluitingen A-S van de 10 k Ω -potmeter. Als bekende weerstand R_n – de ijkmaat – nemen we achtereenvolgens de weerstanden in de eerste kolom van tabel 10.16. Zonodig zijn de waarden te verkrijgen als in tabel 7.16 aangegeven.



10.15

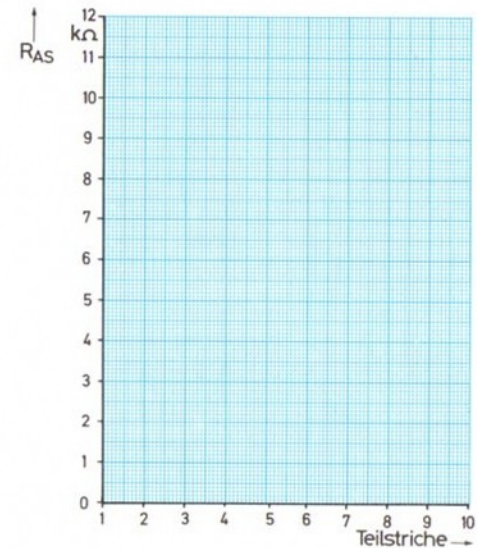
Stel de brug op nul in met de draaiknop en noteer de stand in tabel 10.16.

R_n is dan gelijk aan R_{AS} plus de in fig. 10.15 niet getekende veiligheidsweerstand R_s van 1 k Ω . R_{AS} is dus gelijk aan $R_n - 1$ k Ω . Deze waarden staan reeds in de derde kolom van tabel 10.16. De verkregen waarden voor R_{AS} en de standen van de draaiknop op de schaalverdeling worden uitgezet in het ijkdiagram van fig. 10.17. Verbind de punten om de karakteristiek te krijgen. Deze zal niet zonder meer rechtlijnig verlopen, maar kan (evenals de andere ijkcurves) knikken vertonen.

Sprongen in de waarden moeten worden vereffend; ze zijn te wijten aan meetfouten of terug te voeren op onnauwkeurigheden in de ijkstandaard.

10.16

voor $R_P = R_{AE} =$ k Ω				
R_n in k Ω	evenwicht bij stand	$R_{AS} =$ $R_n - 1$ k Ω in k Ω	$R_{ES} =$ $R_{AE} - R_{AS}$ in k Ω	$V =$ $R_{AS} : R_{SE}$
1,47		0,47		
3,2		2,2		
4,7		3,7		
5,7		4,7		
6,7		5,7		
8,2		7,2		
10		9,0		
11		10,0		

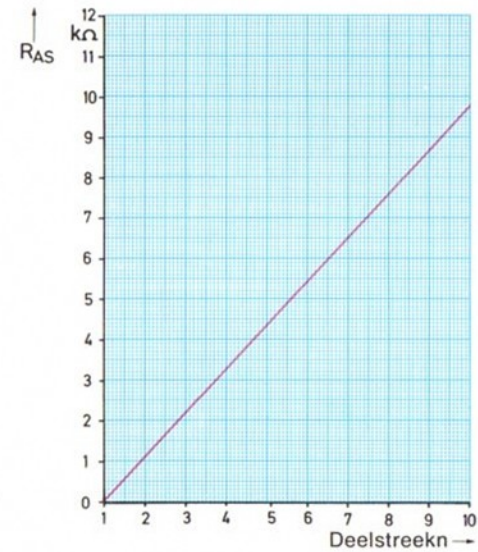


10.17

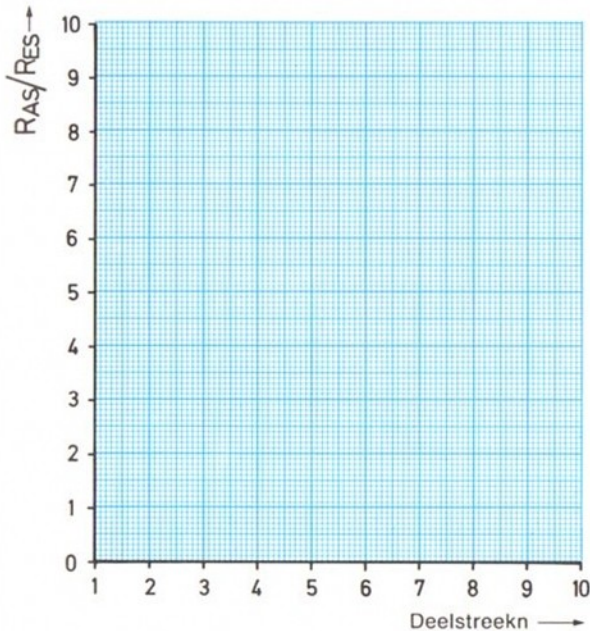
De door u gemeten waarden kunnen tamelijk veel afwijken van de in fig. 10.18 getekende karakteristiek. Potmeters van deze constructie (met een koollaag) zijn „uitgesproken individualisten“. Vele hebben precies de aangegeven waarde van $10\text{ k}\Omega$, vele andere liggen wat hoger of lager. De potmeter van fig. 10.18 heeft een waarde van $9,6\text{ k}\Omega$.

Voor de proef in het volgende hoofdstuk hebben we niet de absolute waarde van de potmeter tussen de aansluitingen A en S nodig (of tussen E en S), maar de „delerverhouding V“, dat is de verhouding van R_{AS} tot R_{ES} .

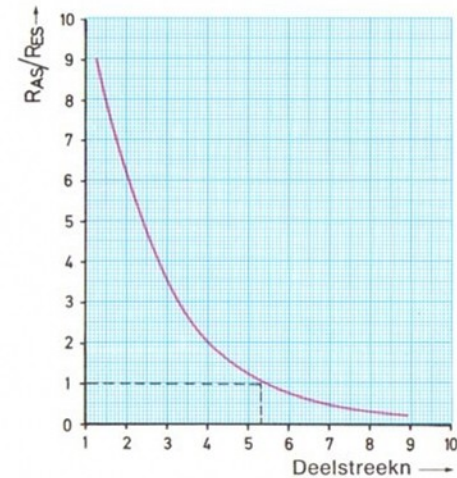
Hiervoor moet u de totale weerstand (tussen A en E) van de potmeter nog bepalen. Het verschil van R_{AE} en R_{AS} verschaft ons de waarde R_{ES} . Noteer deze in tabel 10.16. We kunnen nu de verhouding $R_{AS} : R_{ES}$ uitrekenen en in de tabel opnemen. Daarna brengen we de verhoudingen in diagram 10.19. Er moet dan een karakteristiek ontstaan als in fig. 10.20.



10.18

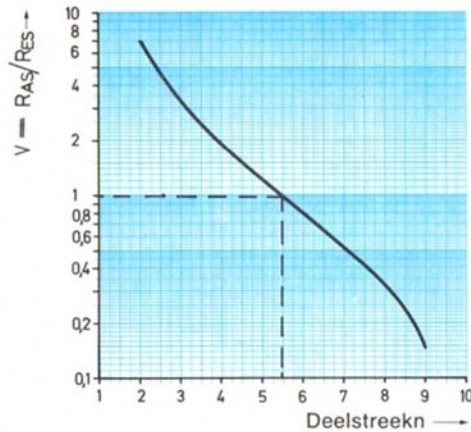


10.19



10.20

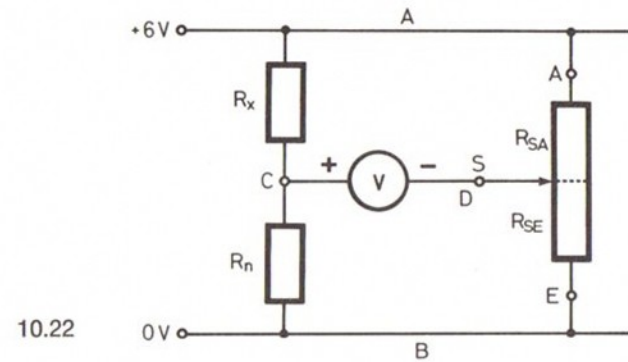
De aflezing van de waarden voor de delerverhouding $V =$ kleiner 1, is zeer onnauwkeurig in dit diagram. Beter is het om een koördinatensysteem te nemen met een niet-lineaire schaalverdeling voor de verhouding V . Als voorbeeld in fig. 10.21 een logarithmische verdeling van de V -as. Deze heeft het voordeel dat zeer hoge waarden op een naar verhouding klein stuk van de as worden ondergebracht. Terwijl men nu de waarden van V behorende bij een stand lager dan 5,5 (in deze stand is $R_{AS} = R_{ES}$; $V = 1$) op de schaalverdeling veel nauwkeuriger kan aflezen. Dat in tegenstelling tot fig. 10.20. De wiskundige verklaring, waarom de curves van 10.20 en 10.21 anders verlopen, laten we hier achterwege.



10.21

10.4.3 Meetbrug met de potentiometer

Bij een brugschakeling gaat het alleen om de verhouding tussen de weerstanden. De gedachte ligt dan voor de hand om de potentiometer als spanningsdeler te gebruiken. Met het sleepkontakt S kunnen we namelijk de delerverhouding aanpassen aan die van de andere spanningsdeler. In die laatste nemen we dan de onbekende, te meten weerstand op. In fig. 10.22 is dit getekend. De veiligheidsweerstand R_s is weggelaten omdat bij de instelling (het evenwicht) van de brug door de diagonaaltak (CS) geen stroom loopt.



10.22

Proef

Het meten van een onbekende weerstand gaat heel eenvoudig. De verhouding $R_{AS} : R_{SE}$ die wordt bepaald door de positie van het sleepkontakt S is voor elke stand van de draaiknop af te lezen in diagram 10.21. Er geldt:

$$R_x = R_n \cdot \frac{R_{AS}}{R_{SE}}$$

De voorinstelling van de brug wordt verkregen door de weerstand R_n zo te kiezen dat deze in de orde ligt van de te meten weerstand. Is de waarde van R_x ook bij benadering niet bekend dan nemen we voor R_n eerst bijv. 1000Ω . Slaat de wijzer in schakeling 10.22 (let op de polariteit) in de middelste stand van de knop naar rechts uit, dan is R_n groter dan R_x . R_n brengen we terug tot 470Ω , als de wijzer nu naar links gaat dan weten we, dat R_n kleiner dan 1000Ω is en groter dan 470Ω . (Mocht de wijzer ook bij $R_n = 470 \Omega$ nog naar rechts uitslaan, dan nemen we $R_n = 100 \Omega$. Gaan we nog lager dan moeten we oppassen voor thermische overbelasting van de weerstanden. In dat geval verlagen we de bedrijfs-spanning. Als R_x op deze manier in grote lijnen is bepaald, dan kunnen we met de draaiknop de brug nauwkeurig instellen tot we het evenwicht hebben gevonden. Met deze methode zijn waarden tussen 100Ω en $100 \text{ k}\Omega$ te meten. Ga dit na met enkele combinaties van weerstanden die u ook gemakkelijk kunt narekenen.

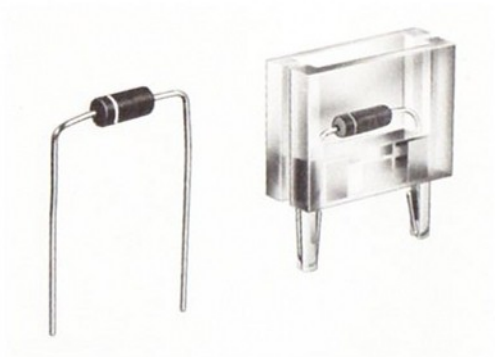
Resultaat

Deze methode is, zoals u zelf al zult hebben vastgesteld niet al te nauwkeurig. De oorzaak is dat de potmeter eigenlijk niet helemaal

geschikt is voor dit doel. In de praktijk heeft men precisie potentiometers waarvan de weerstand niet bestaat uit een koolstoflaag maar uit een wikkeling van een speciaal soort draad. Bovendien zijn er dan nog speciale voorzieningen getroffen voor een zeer nauwkeurige aflezing van de draaiingshoek.

Deze proef waarmee we het uitgebreide onderwerp „de weerstand in de gelijkstroomkring“ willen afsluiten, heeft alleen tot doel gehad het principe van de brug als meetinstrument te verduidelijken. Verschillende factoren maken de nauwkeurigheid van ons meten nog tamelijk twijfelachtig.

Het aflezen van de deelstrepen op de schaalverdeling gaat natuurlijk niet zo heel erg precies en ook de weerstand in de potentiometer heeft in vele gevallen z'n afwijkingen of onregelmatigheden.



11.1

11 De diode

De belangrijkste relaties tussen elektrische grootheden hebben we nu besproken en met experimenten onderzocht. Ter afwisseling een aantrekkelijk elektronisch onderdeel: de diode.

Het is hier nog te vroeg om de theorie van de halfgeleiders te behandelen – die komt in hobbylabor 2 uitgebreid aan de orde. We zullen ons nu bezighouden met enkele praktische experimenten.

De diode in doos hobbylabor is reeds gemonteerd in een stekkerhuis. Ze draagt het opschrift 1 N 1001 en het ene uiteinde is met een ring gekenmerkt. Het betekent dat de elektrode aan deze kant de kathode van de diode is. De kathode is de (-) aansluiting van de diode (zie fig. 11.1). De andere elektrode is de anode.

11.1 Een elektrisch ventiel

11.1.1 Eerste proef

Het ventiel in een auto- of een fietsband heeft tot taak lucht in de ene richting door te laten en in de andere richting tegen te houden. Om na te gaan of iets dergelijks ook voor een elektrisch ventiel geldt, de volgende proef.

Proef

Figuur 11.2 toont het symbool voor een diode, het dwarsstukje voor de pijlpunt staat voor de kathode en komt overeen met de ring op de diode. De pijlspits wijst dus in konventionele stroomrichting. Figuur 11.3 laat een simpele proefopstelling zien. Wat doet het lampje als we op T_E drukken? Haal de diode uit de schakeling en plaats haar nu andersom in de schakeling (fig. 11.4). Wat gebeurt er nu als we op de knop drukken?

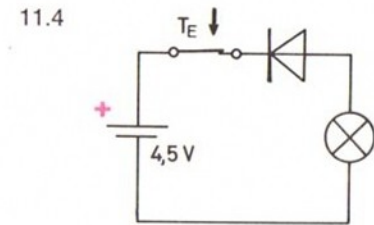
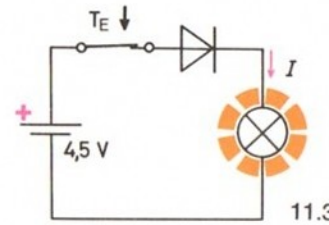
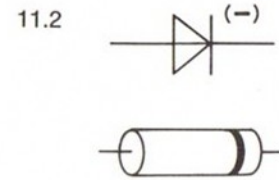
Resultaat

Heel simpel gezegd: in de ene richting laat de diode stroom door en in de andere niet.

Bewijs: de ene keer brandt het lampje en de andere keer niet.

Slotconklusie

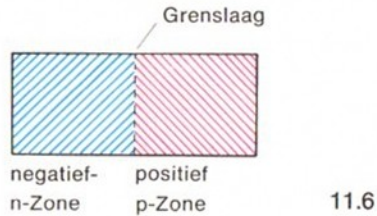
De diode is een elektronisch onderdeel dat alleen stroom doorlaat als het potentiaal op de kathode negatiever is dan dat op de anode. In het omgekeerde geval spert de diode en werkt als een buitengewoon hoge weerstand. De diode in een elektrische stroomkring werkt precies als het ventiel in een luchtband (fig. 11.5). In fig. 11.3 zien we de diode in doorlaatrichting; in fig. 11.4 in sperrichting geschakeld.



T_E getekend in ingedrukte stand

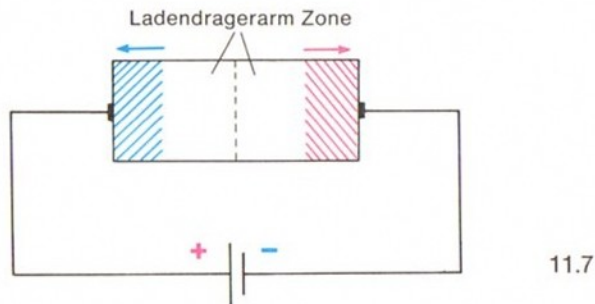


11.1.2 Een beetje theorie



Hoe werkt nu een diode?, zult u zich afvragen. In het omhulsel van de diode zit een klein silicium kristal (symbol Si). Dit is een niet-metaal, maar het bezit wel een aantal eigenschappen van metaal, bijv. een zeker elektrisch geleidend vermogen.

Silicium wordt in vele chemische verbindingen gevonden, zoals zand, quartz en andere mineralen, waaruit het dan moet worden gewonnen. De technische processen zijn zeer ingewikkeld omdat het materiaal voor elektronische doeleinden vrij van verontreiniging moet zijn. Maar zuiver silicium geleidt de stroom niet, omdat in zijn kristalrooster slechts weinig vrije elektronen zijn. Om nu van het siliciumkristal een diode te maken, wordt een geraffineerd trukje toegepast. Men gaat de ene helft van het kristal „inerten“ met atomen van een chemisch element dat heel „bereidwillig“ vrije elektronen beschikbaar stelt. De andere helft verontreinigt men met atomen van een element dat graag vrije elektronen wil vangen. Het resultaat is een hoogst merkwaardige elektronen „situatie“; deze is in fig. 11.6 schematisch weergegeven. Aan de ene kant heerst een overvloed aan elektronen en aan de andere kant een gebrek aan elektronen. In werkelijkheid is het veel gekompliceerder, maar voor het begrijpen van de ventiel functie is deze weergave der feiten voldoende.



Wat gebeurt er nu als we een spanning aanleggen? Heel grof gezegd mogen we van het volgende uitgaan. De (+) en (-) ladingen trekken elkaar op dezelfde wijze aan als de polen van een magneet. Omgekeerd stoten gelijknamige ladingen elkaar af. Figuur 11.7 toont hoe de (+)pool van de batterij de (-) ladingdragers aantrekt en de (-)pool de (+)ladingdragers. In het midden ontstaat een zone die arm aan ladingdragers is. Een soort niemandsland dat als een elektronische barrière werkt. Er kan nu geen elektronenstroom lopen.

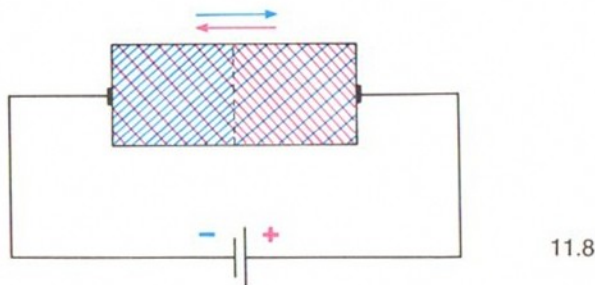


Fig. 11.8 laat zien wat er gebeurt als we de polen omkeren. De (-)pool van de batterij drukt, evenals de (+)pool van zijn kant, de ladingdragers in de diode naar elkaar toe. Daar komt nog de wederzijdse aantrekkingskracht bij, zodat de elektronen op de rechterkant van de diode geraken en vandaar naar de (+)pool van de batterij stromen. Er gaat dus een sterke elektronenstroom lopen.

We zeggen ook wel dat de diode een „poolafhankelijke“ weerstand is.

11.1.3 De spanning op een diode

In de proeven 11.3 en 11.4 hadden we een diode in serie geschakeld met een lampje. Beide onderdelen vormen een spanningsdeler met de deelweerstand R_{L_0} en R_D . Is de diode in de doorlaatrichting geschakeld, dan geven we haar weerstand aan met R_{Dd} , in de sperrichting geschakeld met R_{Ds} .

Proef

We meten eerst de stroom in de schakeling 11.9 daarna in 11.10 en 11.11 bij een spanning van 6 V.

- de totale spanning U en de stroom I
- de deelspanning U_{L_0}
- de spanning U_{Dd} op de diode, geschakeld in doorlaatrichting (fig. 11.10)
- de stroom I die nu door deze serieschakeling loopt
- de spanning U_{Ds} op de diode, geschakeld in sperrichting (fig. 11.11)
- de stroom I , die door deze serieschakeling loopt.

Noteer alle waarden in tabel 11.12 (3e kolom).

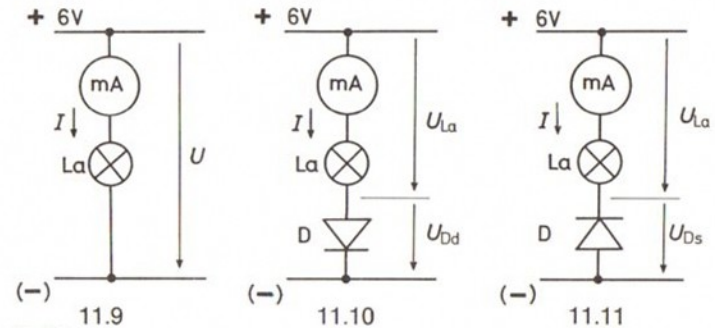
Hoe hoog is de weerstand van de diode in doorlaatrichting?

En hoe hoog naar schatting in de sperrichting?

Herhaal de proef resp. met 2 en 3 parallel geschakelde lampen (4e en 5e kolom).

Wat gebeurt er met de weerstand van de diode in doorlaatrichting als er meer lampen parallel worden geschakeld en daardoor de stroomsterkte stijgt?

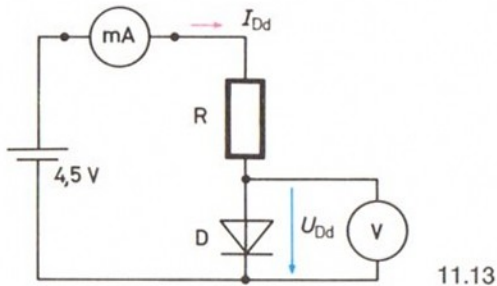
De meetresultaten verschaffen het antwoord.



11.12

Proef van fig.	Grootte	Lampen		
		1	2	3
11.9	U in V I in mA			
11.10	U in V I in mA U_{L_0} in V U_{Dd} in V			
	R_{Dd} in Ω			
11.11	U in V I in mA U_{L_0} in V U_{Ds} in Ω			
	R_{Ds} in Ω			

11.2 De karakteristiek van de diode



11.14

R in Ω	I in mA	U_{Dd} in V	R_{Dd} in Ω
47 000			
10 000			
4 700			
1 000			
470			
235			
100			
50			

$$R_{Dd} = U_{Dd} : I$$

We hebben vastgesteld dat de diode in de stroomrichting een weliswaar kleine, maar meetbare weerstand R_{Dd} heeft.

Nu willen we graag weten, heel zeker en precies, of de waarde van die weerstand werkelijk niet konstant is, zoals bij vaste weerstanden, maar verandert met de sterkte van de stroom die door de schakeling loopt.

Om dat uit te zoeken moeten we een stroom/spanningsdiagram „opmaken“ dat het weerstandsgedrag van een diode in de doorlaatrichting beschrijft. In de sperrichting is de weerstand praktisch oneindig groot, hetgeen u zelf heeft kunnen constateren. Anders zou de spanning U_{Ds} op de diode niet gelijk aan de spanning U hebben kunnen zijn.

Figuur 11.13 toont de schakeling die we nodig hebben om de karakteristiek te meten. Het verdient aanbeveling eerst de stroom I te meten voor alle in tabel 11.14 genoemde weerstanden. Dit bespaart het tijdrovende omschakelen van de meter.

Daarna meten we in dezelfde volgorde de spanning U_{Dd} op de diode D.

Alvorens te beginnen, meten we eerst een paar maal de grenswaarden voor de spanning U_{Dd} voor $R = 10\,000\ \Omega$ en $R = 50\ \Omega$. U zult zien dat de waarden tussen 0,6 en 0,85 V liggen. Daar moeten alle andere waarden tussen liggen. De wijzer heeft dus maar weinig ruimte om verschillen aan te geven.

Konstruktie van de stroom/spanningskarakteristiek

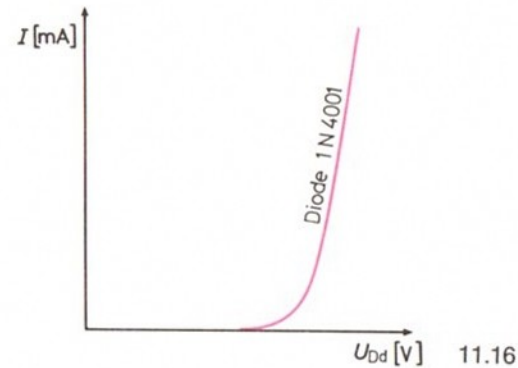
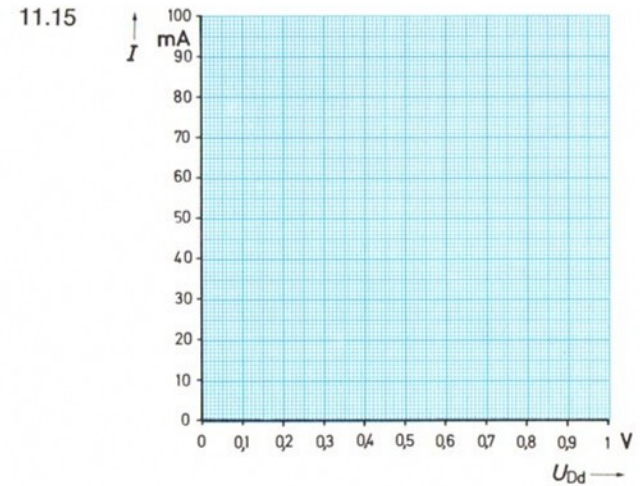
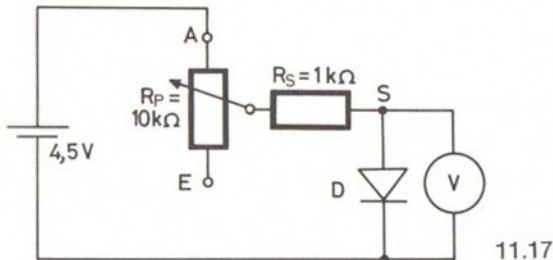
We zetten de stroom- en spanningscoördinaten uit in fig. 11.15 en verbinden de punten met elkaar. In hoofdstuk 2.10.3 is reeds gesproken over het middelen van waarden. De door u verkregen curve moet overeenkomstig die in fig. 11.16 verlopen.

Wat heeft het diagram ons te zeggen?

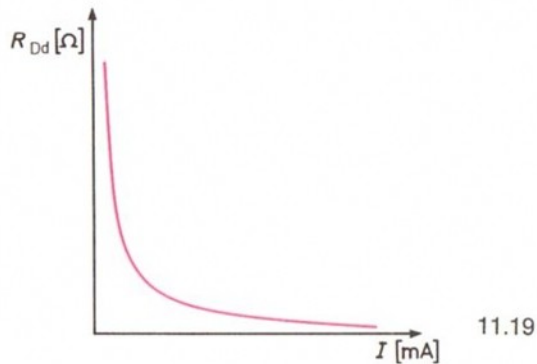
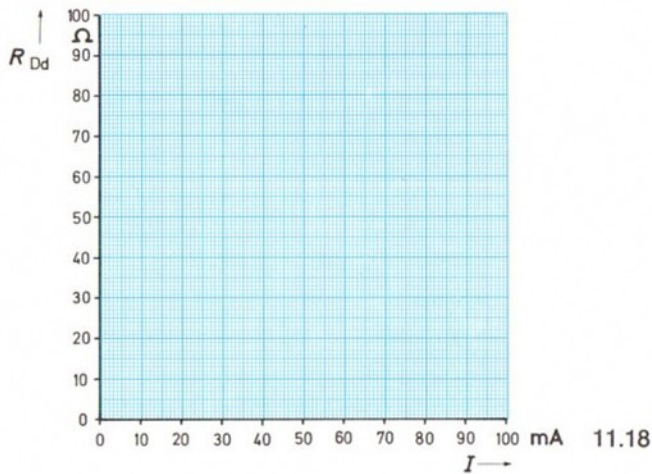
1. Bij een spanning lager dan 0,7 V op de diode zal er geen stroom lopen, ook al is ze in de doorlaatrichting geschakeld. Deze grenswaarde noemen we de drempelwaarde.
2. Als er stroom loopt in een stroomkring met een diode in de doorlaatrichting dan staat er op de diode, afhankelijk van de stroomsterkte, een spanning van tenminste 0,6 en ten hoogste 1,1 V.

Deze opgaven gelden alleen voor dioden van hetzelfde type als in de meting gebruikt. Er zijn ook typen bijv. germaniumdioden waar andere waarden voor gelden.

Een en ander kunt u gemakkelijk met de schakeling 11.17 nagaan. Test de schakeling ook met de 1 k Ω -potmeter.



De diode is een elektronisch onderdeel dat zich kenmerkt door een poolafhankelijke en veranderlijke weerstand.



Konstruktie van de weerstand/stroom karakteristiek

De kenners zullen het weerstandsgedrag van de diode in afhankelijkheid van de spanning afleiden uit het I/U diagram 11.15 resp. 11.16.

Een andere mogelijkheid is, een R/I diagram te konstrueren. De waarden van de weerstand verkrijgen we uit tabel 11.14, die we in diagram 11.18 uitzetten. We moeten dan een curve krijgen als in fig. 11.19.

Wat beschrijft dit diagram?

1. De diode heeft, ook in doorlaatrichting, een grote inwendige weerstand zolang er weinig stroom (minder dan 1 mA) doorheen loopt.
2. Stijgt de stroomsterkte slechts weinig, dan daalt de inwendige weerstand snel.
3. Er is een overgangsbereik (de knik in de curve), waarin de inwendige weerstand bij oplopende stroomsterkte steeds minder daalt.
4. In het gebied van de hogere stroomsterktes is de daling van de weerstand bij een stijgende stroomsterkte slechts klein.

Deze karakteristiek is kenmerkend voor een diode. De verschillende typen mogen wat betreft de waarden afwijken, het beeld blijft ongeveer hetzelfde.

11.3 Hoogst toelaatbare stroom en maximale belasting

Onze diagrammen geven de karakteristiek voor de diode tot een stroomsterkte van ongeveer 100 mA. De vraag is hoe liggen de verhoudingen bij hogere stroomsterktes.

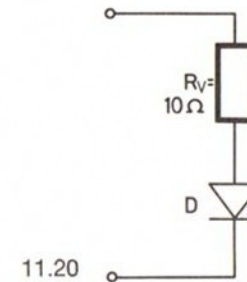
Ook diodes kunnen niet onbeperkt veel stroom doorlaten, hun temperatuur loopt op. In de diode treedt een zeker elektrisch vermogensverlies op in de vorm van warmte. Dit verlies is gemakkelijk te berekenen uit het produkt van U_{Dd} en I . Het mag een bepaalde, voor elk type diode specifieke waarde niet te boven gaan. Liever geeft men echter de maximaal toelaatbare stroomsterkte omdat die anders zou moeten worden berekend aan de hand van het diagram voor het vermogensverlies. Er zijn diodes voor sterkstroom die ettelijke ampères kunnen verdragen, andere niet meer dan 250 mA. Onze diode heeft een maximaal toelaatbare stroomsterkte I_{max} van 1 A bij continue belasting; de spanningsval over de diode bedraagt dan volgens opgave van de fabrikant, minder dan 1,1 V.

De hobbylabor diode 1 N 4001 kan dus wel een stootje hebben. Hoewel we moeten oppassen. De inwendige weerstand van de diode bedraagt bij maximale belasting ongeveer $1 \text{ V} : 1 \text{ A} = 1 \Omega$. Als we de diode bijv. direkt op de batterij zouden aansluiten dan wordt de batterij praktisch kortgesloten en de stroom zo groot dat de diode wel kapot gaat.

11.4 Beveiligingsweerstand voor dioden

Zekerheidshalve komt daarom vòòr een diode die in de doorlaatrichting werkt, een voorschakelweerstand. De waarde ervan moet ongeveer gelijk zijn aan het quotient van de spanning en de max. stroomsterkte die de diode mag hebben : $R_v = U : I_{Dmax}$.

Een voorschakelweerstand van 10Ω voor de diode 1 N 4001 is ruim voldoende (zie fig. 11.20).



$$\text{Diode beveiligingsweerstand} = \frac{\text{aangelegde spanning}}{\text{max. stroomsterkte}}$$

11.5 Toepassingen

Er volgen nu enige proeven waarin de mogelijkheden van de diode worden toegepast.

11.5.1 Gelijkrichten van een wisselspanning

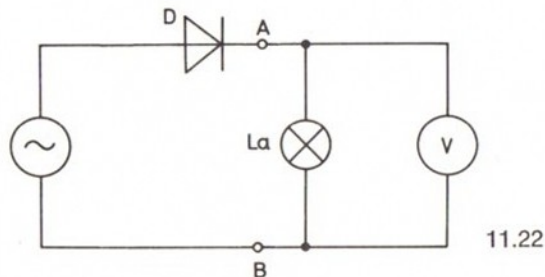
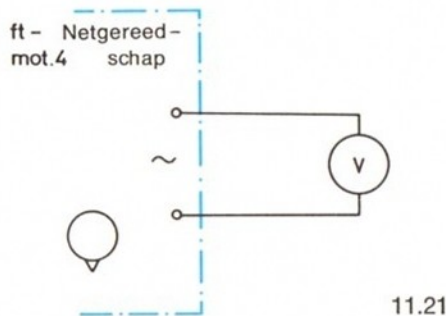
Een van de belangrijkste toepassingen is het gelijkrichten van een wisselstroom. We zullen ons niet in de wisselstroomtheorie verdiepen, maar ons beperken tot de praktijk. Wat we in elk geval nodig hebben is een ft-trafo mot 4.

Op de bussen aan de zijkant staat een wisselspanning van ongeveer 6,8 V (bij normale belasting). Wie die wisselspanning (fig. 11.21) met de voltmeter wil meten, komt bedrogen uit: de wijzer doet niets. Dat komt omdat de wisselstroom 100 maal per seconde van richting verandert. Met andere woorden: de stroom loopt in een wisselstroomkring $1/100$ sek. van (+) naar (-) en in de volgende $1/100$ sek. van (-) naar (+). De meter kan deze snelheid niet bijhouden en daardoor blijft de wijzer staan.

Maar als de diode als een ventiel werkt, dan moet ze – afhankelijk van de polariteit – de stroom in de ene richting doorlaten en in de andere richting blokkeren. Laten we maar eens kijken.

Proef

We schakelen een diode en een lampje in serie op de wisselspanning (zie fig. 11.22). In plaats van een trafo te tekenen, is het symbool voor een wisselspanningsbron gebruikt, daar de uitkomsten algemeen gelden voor wisselspanning.



Gaat het lampje branden? En zal het ook branden als we de aansluitingen op de trafo verwisselen?

Resultaat

Als we het geheel van trafo en diode als een eenheid bekijken, dan hebben we een gelijkspanningsbron. De aansluitingen zijn in fig. 11.22 met A en B gekenmerkt. Welke is de pluspool? De voltmeter geeft het antwoord.

Zet nu de diode andersom (aansluitingen verwisselen) in de stroomkring, zonder de voltmeter om te polen. De wijzer moet nu naar de andere kant uitslaan. Klopt dat?

Omdat de diode in de schakeling de stroom maar in één richting doorlaat, spreekt men van een eenfasige gelijkrichting. Hoofdstuk 12.8 komt op dit thema terug.

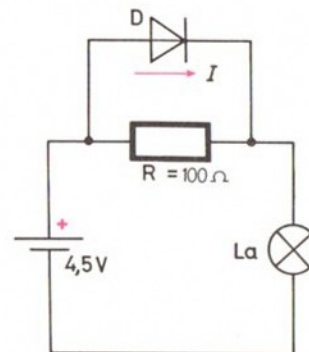
11.5.2 Polariteitsafhankelijke schakelingen

Dit zijn schakelingen die o.a. voor besturingsvraagstukken worden gebruikt. Zoals b.v. een gelijkstroommotor, die in de ene draairichting snel en in de andere richting langzaam moet lopen. Een dergelijk probleem is met dioden heel elegant op te lossen.

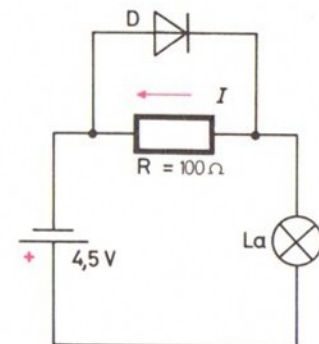
1. Proef

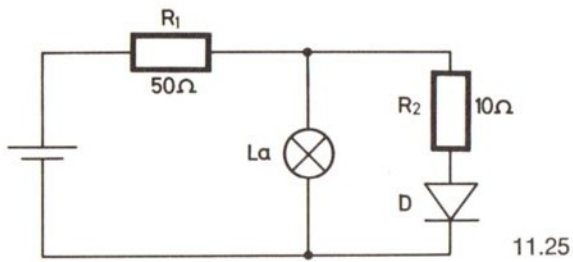
In plaats van een motor kunnen we ook een lampje nemen. Wat zien we als de diode in de doorlaatrichting is geschakeld (fig. 11.23)? En wat gebeurt er als we de aansluitingen op de spanningsbron verwisselen? De diode staat dan in de sperrichting geschakeld zoals in fig. 11.24 is getekend.

11.23



11.24





11.25

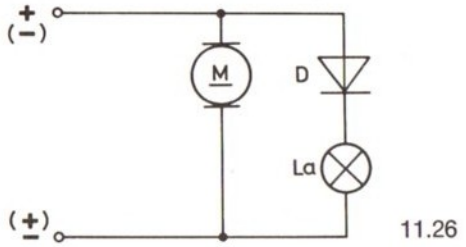
Konklusie

Als de diode in de doorlaatrichting ligt is de weerstand laag en loopt het grootste deel van de stroom door de open diode. De deelspanning op de diode is klein vergeleken met de deelspanning op de lamp die dan ook fel zal branden.

Staat de diode in de sperrichting, dan is de weerstand zo hoog dat de stroom uitsluitend over de weerstand R moet die dan als voor-schakelweerstand voor de lamp werkt. De deelspanning op $D \parallel R$ is nu groot, het lampje brandt nu veel zwakker.

2. Proef

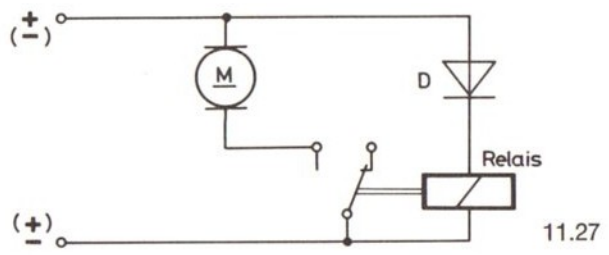
Bouw de schakeling van 11.23 om tot die van fig. 11.25 en zoek uit wat er met het lampje gebeurt als we de (+) en (-) aansluitingen van de spanningsbron verwisselen.



11.26

Resultaat

In deze schakeling ligt de serieschakeling (D + R₂) parallel met het lampje. Het effect is vergeleken met de vorige proef, precies omgekeerd: La brandt helderder wanneer de diode in de sperrichting is geschakeld.



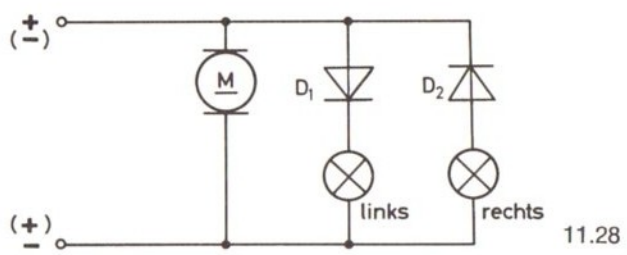
11.27

Proeven voor de bezitters van de hobby 3 doos

Stel dat een motor b. v. alleen linksom mag draaien, dan is een alarmschakeling volgens 11.26 te bouwen waarvan de lamp oplicht als de motor in de verkeerde richting gaat bewegen.

Wie iets van de schakeltechniek afweet, kan met een relais voorkomen dat de motor start als de trafo verkeerd om wordt aangesloten. Het relais komt alleen op- en schakelt daarmee de motor in - als de diode stroom doorlaat (fig. 11.27).

Met 2 dioden en 2 lampen kunnen we aangeven of een motor linksom of rechtsom draait. De schakeling staat in fig. 11.28.



11.28

11.5.3 Beveiliging met een diode

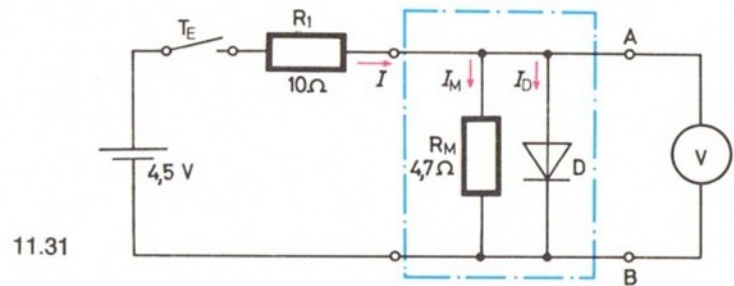
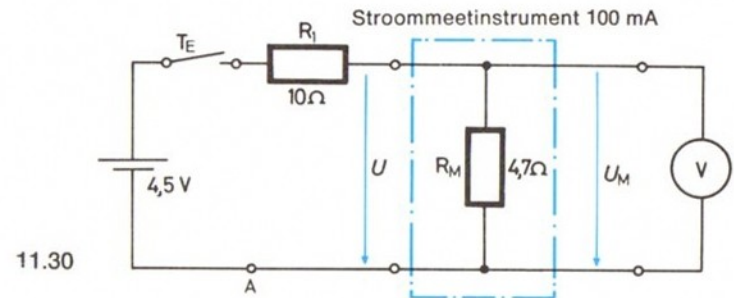
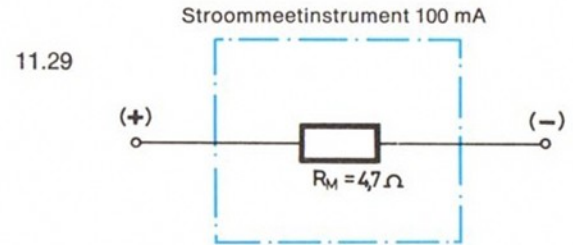
In de praktijk maakt men voor de beveiliging van meetwerken in meetapparaten gebruik van een andere eigenschap van de diode. Namelijk dat zij beneden de drempelspanning (ongeveer 0,7 V voor onze diode) een zeer grote weerstand heeft en dat deze pas daalt bij een stijgende spanning.

Hoe werkt dat? In fig. 11.29 is het meetwerk van een ampèremeter weergegeven door een $4,7 \Omega$ -weerstand. We zullen deze R_M noemen.

Stel nu dat de meter zo gekonstrueerd is dat bij 100 mA de wijzer geheel uitslaat. We kunnen berekenen dat er dan een spanning van ongeveer 0,5 V tussen de aansluitingen staat.

We gaan nu deze gesimuleerde mA-meter in de schakeling 11.30 opnemen. Het is eenvoudig na te rekenen dat door de meter een stroom van 500 mA zou hebben gelopen. Het meetwerk zou met het vijfvoudige zijn overbelast.

Kontroleer deze uitkomst met de volgende proef!



1. Proef

- a) Eerst meten we de stroomsterkte in de schakeling 11.30 met de ft-stroomsterktemeter (meetbereik 1 A, volgens hoofdstuk 6.7.2). Het blijkt dat er inderdaad veel meer stroom loopt dan toelaatbaar zou zijn geweest voor de gesimuleerde meter van 100 mA. Een echte meter van die capaciteit zou bijna zeker defect zijn geraakt.

We zien hier meteen de voordelen van een simulatie. Nadat de ft-meter uit de schakeling is gehaald, meten we de klemspanning op de gesimuleerde 100 mA meter (klemmen A-B).

- b) We zetten nu een beveiligingsdiode (fig. 11.31) parallel met het meetwerk en herhalen de metingen.

Resultaat

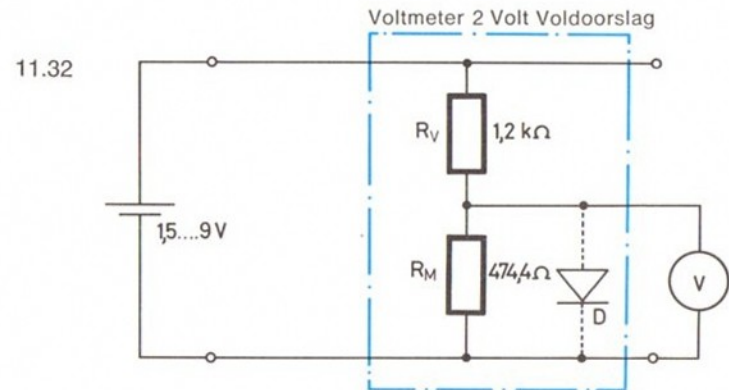
Hoewel door de $10\ \Omega$ -weerstand evenveel stroom loopt als eerst, ligt de deelspanning op het gesimuleerde meetapparaat maar net boven de toelaatbare spanning van 0,5 V.

De diode voert de gevaarlijke overstroom aan het meetwerk voorbij.

2. Proef

We gaan nu een overeenkomstig experiment uitvoeren voor een voltmeter met een volledige uitslag bij 2 V. De meetwaarden van de voltmeter simuleren we door de weerstand R_M van $474,7\ \Omega$ ($470\ \Omega + 4,7\ \Omega$) en de voorschakelweerstand $R_V = 1,2\ \text{k}\Omega$ ($= 1\ \text{k}\Omega + 100\ \Omega + 100\ \Omega$). Wie al die weerstanden niet heeft, kan voor R_V ook $1\ \text{k}\Omega$ en voor R_M $470\ \Omega$ nemen. Figuur 11.32 toont de proefschakeling voor de overbelastingstest van de voltmeter.

- a) Laat de spanning U volgens tabel 11.33 oplopen van 1,5 V tot 9,0 V en meet de bijbehorende deelspanningen U_M op het meetwerk R_M (vlgs de definitie wordt de gesimuleerde meter bij een spanning hoger dan 2 V overbelast). Wie niet met batterijen werkt maar met een trafo mot 4, moet uiteraard de juiste spanningswaarden in de eerste kolom opnemen.
- b) We plaatsen nu ter beveiliging van het meetwerk R_M – precies als in de vorige proef – de diode in de schakeling (in fig. 11.32 gestreept aangegeven) en meten opnieuw U en U_M .



11.33

U in V	U_M in V zonder diode	U_M in V met diode
1,5		
3,0		
4,5		
6,0		
9,0		

Resultaat

De beschermende functie van de diode is direct te zien als we de meetwaarden in een diagram uitzetten: u moet dan curves krijgen die overeenkomen met fig. 11.34.

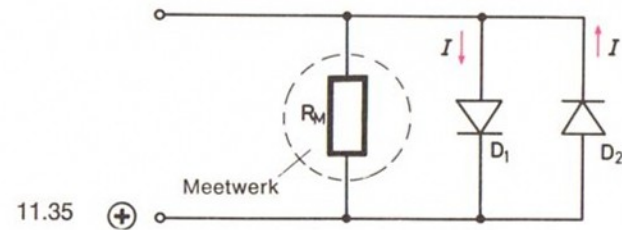
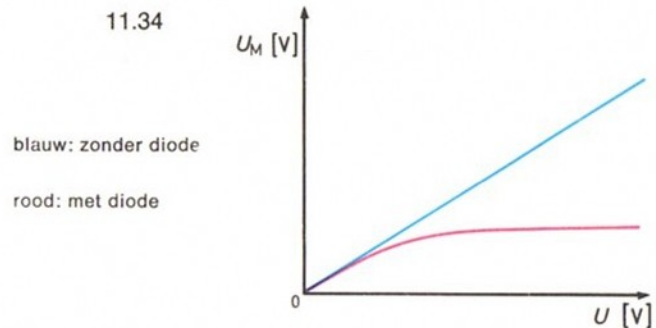
Slotconklusie

Zolang de spanning U_M de drempelspanning van 0.7 V niet overschrijdt, werkt de diode als een zeer hoge weerstand en beïnvloedt zij de meetapparatuur niet. Zodra de spanning op R_M en daarmee ook op de diode boven de drempelwaarde komt, gaat de weerstand snel omlaag. De diode wordt geleidend. Zoals u in uw diagram kunt zien, kan de spanning op het meetwerk niet boven een ongevaarlijk maximum uitkomen. De dioden met deze functie heten beveiligingsdioden.

Antiparallelschakeling

Alles goed en wel, maar wat gebeurt er als iemand het meetwerk verkeerd om aansluit. De plus op de min en de min op de plus. De diode ligt dan in de sperrichting en biedt geen enkele beveiliging. Om die reden staan er 2 dioden in tegengestelde richting parallel met het meetwerk. Het Latijnse woord voor „tegen“ is: anti, vandaar de naam antiparallelschakeling. Op deze manier zal altijd één van beide dioden als beveiliging werken om het teveel aan stroom langs het meetwerk te leiden zonder dat de stroomrichting er toe doet.

In de f-meter liggen eveneens twee dioden type 1 N 4001 in antiparallelschakeling met het meetwerk (zie fig. 11.35).



Het is verstandig de meter toch niet te vaak over te belasten. De dioden verhinderen wel dat de gevoelige onderdelen van het meetwerk defect raken, maar zij kunnen niet voorkomen dat de wijzer met een tik tegen de aanslag slaat bij een overbelasting. Ook mechanische beschadigingen maken een meetinstrument onbruikbaar. Dit geldt minder voor de naar verhouding robuust uitgevoerde f-meter dan voor de hooggevoelige universeelmeters met verschillende schalen in verband met de instelbare meetbereiken. De daarvoor noodzakelijke lange wijzers zijn bijzonder kwetsbaar.

12 De Kondensator in de gelijkstroomkring

Er is in de elektronica nauwelijks een schakeling te bedenken zonder condensator. Kondensators vinden we in radio's, televisietoestellen, telexapparatuur; in computers, meet-en regel-apparatuur, kortom overal worden condensators in alle soorten en maten voor de meest uiteenlopende doeleinden toegepast.

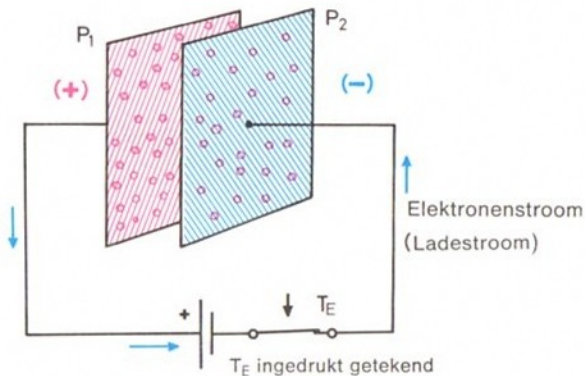
Dit hoofdstuk behandelt de voornaamste eigenschappen van dit onontbeerlijke onderdeel aan de hand van enkele proeven.

12.1 Het elektronen magazijn

12.1.1 Het principe van de condensator

Het woord condensator is afgeleid van het Latijnse „condensare“ hetgeen verdichten, samenpersen betekent. Eigenlijk een heel anschouwelijk begrip als we eenmaal weten wat er gebeurt wanneer op twee metalen platen een spanning wordt gezet, zie fig. 12.1.

Bedienen we drukknop T_E , dan worden ogenblikkelijk vrije elektronen van plaat P_1 weggezogen; naar plaat P_2 daarentegen zal de spanningsbron juist vrije elektronen sturen. Dit proces van elektronen verplaatsen gaat net zo lang door tot plaat P_2 oververzadigd is, en geen elektronen meer kan opnemen. Het betekent dat na het sluiten van de verbinding (indrukken van T_E) er gedurende korte tijd een elektrische stroom (natuurkundige stroomrichting!) moet lopen. Dit is de laadstroom.



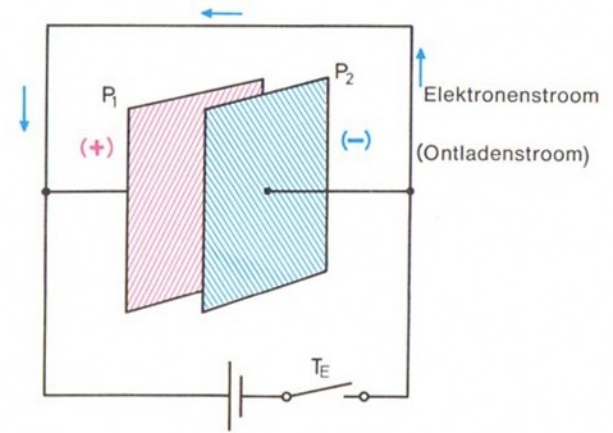
12.1

Op P_2 is nu een elektronenoverschot en op P_1 een gebrek aan elektronen. Een dergelijke toestand kenmerkt zich door het optreden van een elektrische spanning: tussen de platen P_1 en P_2 heerst de spanning U_c , de condensatorspanning geheten.

Het is duidelijk dat $U_c = U_{bron}$, wanneer er zich geen elektronen meer verplaatsen. Laten we T_E los, dan verbreken we de stroomkring en de toestand wordt, zagezegd bevroren. Alles blijft zoals het op dat moment is. Het spanningsverschil kan zich niet opheffen, tussen de platen zit de lucht die isoleert en hetzelfde is het geval in de niet-ingedrukte knop T_E . Het op de plaat P_2 samengeperste elektronenoverschot wordt vastgehouden. Het kan geen kant meer op.

Nu verbinden we de beide platen met een draad, zoals in fig. 12.2 getekend en nu kan het overschot aan elektronen het tekort compenseren. Anders gezegd, het spanningsverschil wordt opgeheven, doordat er een elektronenstroom van P_2 naar P_1 loopt. Omdat de lading (we komen op dit begrip direkt terug) plaat P_2 verlaat, heet deze stroom de ontladenstroom. Na afloop is de spanning tussen de platen verdwenen en zijn beide weer elektrisch neutraal.

12.2



12.1.2 De condensatoren in hobbylabor

De condensatoren van hobbylabor zien er heel anders uit dan het getekende model met de platen. Toch is het principe precies hetzelfde. Hoofdstuk 12.12 geeft hierover een nadere uiteenzetting.

Laten we de drie condensatoren (fig. 12.3) eens wat nader bekijken. De uiteinden, de aansluitingsdraden, zijn ongelijk van lengte. De lange „poot“ is gemerkt met een (+) en de korte met een (-).

25V/47 μ F



16V/470 μ F



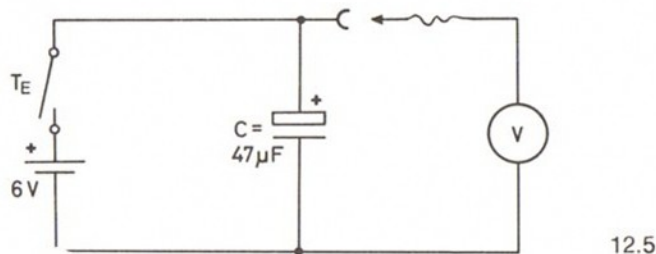
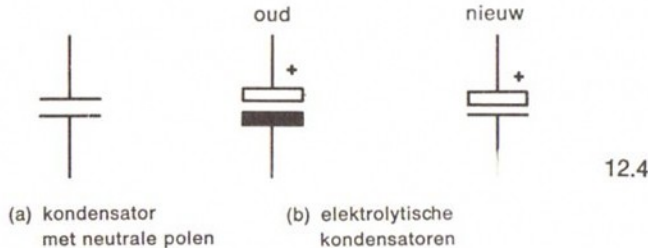
12.3



Elektrolytische condensatoren moeten op de juiste polen van de bron worden aangesloten.

(+)aansluiting op (+)potentialiaal

(-)aansluiting op (-)potentialiaal



Hieruit blijkt dat het elektrolytische condensatoren zijn. Ze onderscheiden zich van andere condensatoren doordat ze gepoold zijn. Een elektrolytische condensator, in het spraakgebruik elco genoemd, moet altijd met de juiste polen worden aangesloten, anders raakt hij defekt.

De opdruk 25 V/47 μ F op de kleine condensator geeft aan dat deze hoogstens een spanning van 25 V kan verdragen en een capaciteit van 47 microfarad (klemtoon op rad) heeft.

De beide grote condensatoren hebben een 10 keer zo grote capaciteit, maar ze kunnen hoogstens een spanning van 16 V hebben zonder te worden beschadigd (zie hoofdstuk 12.12.3).

Figuur 12.4 toont (a) het symbool voor de condensator zonder polariteit, waarbij de evenwijdige strepen model staan voor de platen. In (b) zien we het oude en het nieuwe, aan de internationale norm, aangepaste symbool voor elektrolytische condensatoren.

12.1.3 Eerste proeven

Mogen we de bezitter van een duur meetapparaat een goede raad geven? Neem voor de proeven in dit hoofdstuk steeds eerst de relatief ongevoelige meter van hobbylabor. In experimenten met grotere, geladen condensatoren wil zo'n gevoelig apparaat nog wel eens sneuvelen.

1. Proef

In fig. 12.5 zien we de proefschakeling. Let op de poolaansluitingen van de condensator! Gebruik voor de volgende proeven een batterij als spanningsbron en niet de trafo. Het waarom komt later ter sprake.

Mocht de condensator niet gemakkelijk in de bussen van het MSP passen of daaruit te verwijderen zijn, dan niet duwen of trekken, maar met de pincet de aansluitdraden pakken en op hun plaats zetten resp. voorzichtig lostrekken.

We houden nu T_E enkele seconden ingedrukt. In die tijd staat er een spanning van ongeveer 6 V op de 47 μF -kondensator die zich nu oplaadt. Wacht daarna 10 seconden en tik dan de (+) kabel van de voltmeter heel even tegen de (+) aansluiting van de kondensator. Let daarbij op de wijzer van de meter. We wachten weer 10 seconden en herhalen de proef, de wijzer moet opnieuw uitslaan. Doe de proef een aantal malen en we zien dat de wijzer elke keer iets minder uitslaat.

Laad de kondensator weer op; T_E indrukken. Na het loslaten van de knop, houden we de (+) kabel permanent op de (+) aansluiting. De wijzer slaat eerst een heel stuk uit en loopt dan snel naar nul terug.

We vervangen de 47 μF -kondensator door een 470 μF -kondensator, en herhalen de proeven. Loopt de wijzer even snel naar nul terug als bij de 47 μF -kondensator?

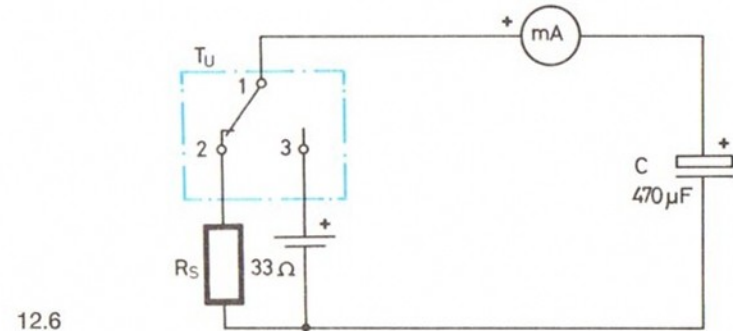
Konklusie

1. De spanning U_C op een kondensator verdwijnt niet zoals bij een weerstand na het verbreken van de verbinding met de batterijspanning. Daaruit volgt dat een kondensator elektronen (ladingdragers) kan vasthouden.
2. De spanning U_C daalt door het aansluiten van de voltmeter. Hieruit volgt dat het spanningsverschil (het overschot en gebrek aan elektronen) zich via de inwendige weerstand van de meter vereffent.
3. De snelheid van deze vereffening is verschillend, hetgeen klaarblijkelijk samenhangt met de grootte van de condensatorcapaciteit.

Met de volgende proef gaan we dit verband nader onderzoeken. In plaats van de spanning U_C beschouwen we nu de stroom I .

2. Proef

Bouw de schakeling van fig. 12.6, de ft-drukknop dient als omschakelknop T_U . De beveiligingsweerstand R_S verhindert dat de kondensator bij het ontladen wordt kortgesloten. Iets dat bij elco's zorgvuldig dient te worden vermeden.

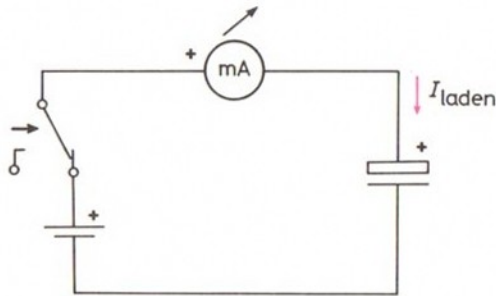


12.6

Let op de juiste poolaansluitingen, vergeet niet voor de stroommeting de rode knop in te drukken.

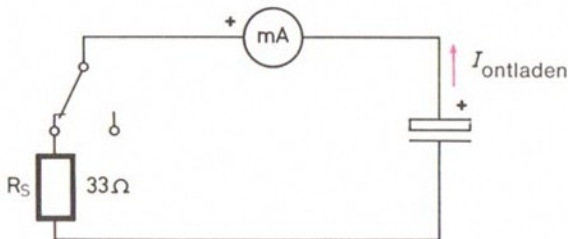
Zodra we T_U indrukken en daarmee de kondensator op de spanningsbron aansluiten, gaat de wijzer iets naar rechts. Gedurende korte tijd loopt er een stroom! De kondensator is echter vrij snel opgeladen en dan loopt de wijzer terug naar nul. Na het opladen loopt er geen stroom meer, hoewel de hele spanning op de kondensator staat. We laten de drukknoop los; de verbinding met de spanningsbron wordt verbroken. Via het contact 2 is de kondensator nu op de weerstand R_S aangesloten. Op hetzelfde moment slaat de wijzer naar links uit. Na korte tijd kruipt de wijzer weer naar de nul en dat betekent dat er geen stroom meer loopt. Op de kondensator meten we nu een spanning van 0 volt.

Vervang de 47 μF -kondensator door een 470 μF -kondensator en herhaal de proef. De wijzer zal nu veel verder uitslaan, maar ook nu loopt er bij het op- en het ontladen maar voor korte tijd een stroom.



drukknop ingedrukt getekend

12.6 (a)



12.6 (b)

1. Als op de condensator door T_0 in te drukken (fig. 12.6 a) een spanning komt, dan volgt een stroomstoot (wijzer slaat naar rechts). Dit betekent dat elektronen in een bepaalde richting worden verplaatst. Omdat elk elektron een negatieve elementaire lading draagt (zie hoofdstuk 2.21), worden elektronen ladingdragers genoemd. In fig. 12.6 a worden dus ladingen in de getekende richting (technische stroomrichting) voortbewogen. Deze stroom noemen we de laadstroom.

2. Het is gemakkelijk in te zien dat op een grotere condensatorplaat – om ons bij het platenmodel van fig. 12.1 te houden – een groter aantal elementaire ladingen een plaats kan krijgen dan op een kleinere. Maar dat betekent, dat er een sterkere stroom moet lopen als de grotere condensator in dezelfde tijd als de kleine moet worden opgeladen.

Dit verklaart waarom de wijzer voor $C = 47 \mu\text{F}$ een kleinere uitslag geeft dan voor $C = 470 \mu\text{F}$.

3. Het opladen van de condensator kost natuurlijk een bepaalde tijd (dit onderwerp komt later uitvoerig aan de orde). Het is begrijpelijk dat het dalen van het spanningsverschil, omdat de platen dezelfde spanning krijgen als de bron, bij de kleine condensator sneller gaat dan bij de grotere.

4. Laten we de drukknoop los, dan wordt de verbinding met de batterij verbroken en worden de polen van de condensator via R_S met elkaar verbonden.

Figuur 12.6 (b) verduidelijkt dat nu het teveel aan elektronen een uitweg zoekt en er een stroom in omgekeerde richting gaat lopen. Die stroom heet de ontladstroom. De wijzer sloeg als gevolg daarvan naar links uit.

Wat betreft de tijdsduur en de sterkte van de ontladstroom geldt hetzelfde als wat voor de laadstroom is gezegd.

12.1.4 De hoeveelheid lading

In elke gesloten stroomkring worden ladingen verplaatst. De elektronen zijn daarbij de ladingdragers die zich door de draad bewegen. Een konstante stroom van 1 ampère betekent dat er per seconde een bepaalde hoeveelheid lading wordt getransporteerd. Als de stroom 3 seconden duurt met een konstante sterkte van 1 ampère, dan verplaatst zich ook een drie keer zo grote hoeveelheid lading. In formules gebruiken we de letter Q (van quantiteit) voor de hoeveelheid lading. Als eenheid van lading geldt de coulomb, een eerbewijs aan de Franse natuurkundige Charles A. de Coulomb (1736-1806). Als afkorting werd vroeger de letter C gebruikt, tegenwoordig zien we vaak de afkorting „Coul“, om verwarring te voorkomen, daar ook de capaciteit met de letter C wordt aangeduid. Het verband tussen de hoeveelheid lading, stroomsterkte en tijd, drukken we in de volgende formule uit:

$$Q = I \cdot t \quad (1 \text{ Coul} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ S} = 1 \text{ ampèreseconde})$$

Aangezien het elektron de drager is van de kleinste hoeveelheid lading, mogen we de vraag stellen: hoeveel elektronen gaan er in 1 coul? Het antwoord luidt: 1 coul is ongeveer een hoeveelheid van $6,3 \cdot 10^{18} = 6,3$ triljoen elektronen.

In hoofdstuk 7.9 zagen we dat het produkt $I \cdot t$ een rol speelde bij de beschrijving van de hoeveelheid opgeslagen energie in accu's en batterijen. We gebruikten toen niet de eenheid coulomb, maar de veel grotere ampère-uur (1 ampère-uur = 3600 coul).

De opgeslagen energie (elektrische arbeid) verkrijgen we door de ampère-uur te vermenigvuldigen met de spanning van de accu of de batterij. In formule: $A \cdot h \cdot V$ (Ah = ampère-uur). Een begrip dat we allemaal kennen in de vorm van kilowattuur, want: $A \cdot h \cdot V = V \cdot A \cdot h$ en $V \cdot A = \text{Watt}$, dus krijgen we Wh. Het woordje kilo geeft alleen maar het getal 1000 aan en is voor de eenheid Wh (Wattuur) niet belangrijk.

De hoeveelheid lading is recht evenredig met de stroomsterkte en de tijd.

Zoals we hebben gezien kan in een condensator een lading worden opgeslagen. Dat vermogen om lading op te nemen geven we aan met het begrip capaciteit. Een condensator met een grotere capaciteit kan meer elementaire ladingen (elektronen) of een grotere lading bewaren dan een condensator met een kleinere capaciteit. In een emmer van 10 liter gaat nu eenmaal meer dan in één van 5 liter.

Tussen condensator en batterij of accu bestaat een zeer belangrijk onderscheid. Onze proeven hebben aangetoond, dat het ontladen van een condensator, in tegenstelling tot de batterij, niet met een konstante stroomsterkte gebeurt maar dat deze afhankelijk van de capaciteit, meer of minder snel daalt. De oorzaak is dat de batterij konstant elektrische energie afgeeft, terwijl dat bij de condensator niet het geval is, die loopt gewoon leeg. Een condensator is alleen een energie-bewaarpilaas en geen energie-opwekker, beter gezegd energie-omzetter.

12.1.5 Symbool en eenheid van de capaciteit

Voor de capaciteit van een condensator gebruiken we in formules de letter C (van het Latijnse: *capacitas* = opnamevermogen). Als eenheid gebruiken we de farad, naar de Engelse natuurkundige en chemikus Michael Faraday (1791–1867). De afkorting is F.

Een condensator heeft een capaciteit van 1 farad als hij bij een aangelegde spanning van 1 V een hoeveelheid lading van 1 coul opneemt.

We kunnen het ook zo formuleren: de capaciteit van een condensator is het vermogen om per volt een hoeveelheid lading (Q) op te nemen:

$$C = \frac{Q}{U}$$

$1 \mu\text{F} = 1 \text{ microfarad}$
 (1 miljoenste farad)
 $1 \text{ nF} = 0,001 \mu\text{F} = 1 \text{ nanofarad}$
 (1 miljardste farad)
 $1 \text{ pF} = 0,001 \text{ nF} = 0,000001 \mu\text{F} = 1 \text{ picofarad}$
 (1 biljoenste farad)
 (voor de voorvoegsels nano en pico, zie het
 aanhangsel).

De nu volgende, afgeleide eenheid voor de capaciteit is van belang om het begrip tijdconstante, dat op pag. 191 wordt behandeld, gemakkelijk te begrijpen. We gaan in de formule $C = \frac{Q}{U}$, voor Q substitueren $Q = I \cdot t$ en krijgen dan:

$$C = \frac{I \cdot t}{U}$$

Als we de eenheden voor de verschillende begrippen invullen, dan ontstaat de volgende belangrijke betrekking:

$$F = \frac{A \cdot s}{V} \text{ (de ampèreseconde per volt).}$$

In de praktijk is 1 F veel te groot en daarom zijn de nevenstaande afgeleide eenheden ingesteld.

12.1.6 De energie van een geladen condensator

In hoofdstuk 3.4 is uiteengezet dat de begrippen arbeid, energie, resp. energieverbruik natuurkundig hetzelfde betekenen. Beide, arbeid en energie, hebben dezelfde letter W en als eenheid de wattseconde ($W \cdot S$). De formule voor het energieverbruik (elektrische arbeid) luidt:

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t \text{ (in Ws)}$$

Wanneer een condensator is opgeladen, dan heeft hij de elektrische energie die voor dat opladen nodig was, opgeslagen. Bij het ontladen komt die energie weer vrij en kan dan arbeid verrichten, b. v. een lampje laten branden.

Het is gemakkelijk in te zien, dat de opgeslagen energie recht evenredig is met de capaciteit C van de condensator. Eveneens speelt de spanning een belangrijke rol. In de energievergelijking staat – evenals bij de weerstand in hoofdstuk 3.4 – het kwadraat van de spanning. Daar komt nog de faktor $1/2$ bij. De wiskundige afleiding van de formule vergeten we nu maar even.

De vergelijking voor de hoeveelheid energie van een geladen condensator luidt:

$$W = \frac{1}{2} U^2 \cdot C \text{ (in wattsekonden) (} U \text{ in V; } C \text{ in F)}$$

Sluiten we een condensator aan op een spanningsbron, dan onttrekt hij daaraan meer energie naarmate zijn capaciteit groter is en de aangelegde spanning hoger. Gebruiken we later de condensator bij het ontladen als generator (energieleverancier) dan geeft hij (theoretisch) precies de hoeveelheid opgenomen energie weer af.

Proef

Als bewijs dat de grootte van de capaciteit inderdaad bepalend is voor de hoeveelheid opgeslagen energie, de proef met de schakeling van fig. 12.7.

We nemen voor C_1 de $470 \mu\text{F}$ -kondensator. De kondensator C_2 moeten we eerst door kortsluiting geheel ontladen om een eventuele restlading te verwijderen. Dit zou de proef namelijk kunnen verstoren.

Voor C_2 nemen we ook een $470 \mu\text{F}$ -kondensator. Zodra we T_U indrukken wordt de verbinding tussen C_1 en de spanningsbron verbroken en de stroomkring tussen de bron en C_2 gesloten. C_2 wordt dan opgeladen en C_1 ontladen.

Meet de spanning op C_1 en op C_2 , zowel voor als na het omschakelen. Vergeet niet voor elke nieuwe proef C_2 via een 33Ω -weerstand geheel te ontladen.

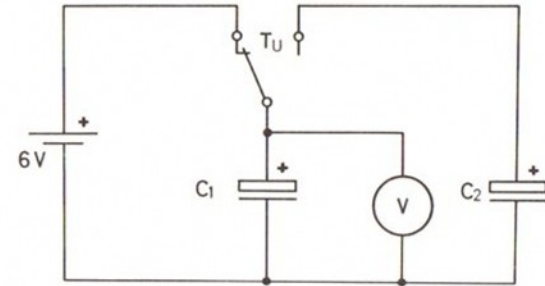
Zal de spanning meer of minder dalen als we voor C_2 een $47 \mu\text{F}$ -kondensator nemen? En wat gebeurt er als we $C_1 = 47 \mu\text{F}$ en $C_2 = 470 \mu\text{F}$ nemen?

Resultaat

C_1 ontladtd zich in geen van de schakelingen helemaal, de uitwisseling van ladingen vindt plaats totdat op beide kondensatoren dezelfde spanning staat. Bij kondensatoren van dezelfde capaciteit daalt de spanning tot de helft. Als $C_1 = 470 \mu\text{F}$ en $C_2 = 47 \mu\text{F}$, zal de spanning betrekkelijk weinig dalen. C_2 kan maar weinig energie van C_1 overnemen.

Als daarentegen $C_1 = 47 \mu\text{F}$ en $C_2 = 470 \mu\text{F}$, dan daalt de spanning tot beneden 1 volt, de kleine hoeveelheid lading op C_1 kan bijna geheel door de veel grotere C_2 worden opgenomen.

12.7



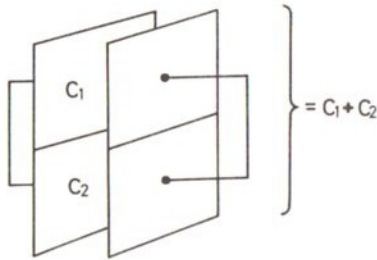
Wie daar zin in heeft kan de kondensator steeds weer volledig ontladen door deze over een 33Ω -weerstand kort te sluiten, waarna het spel opnieuw kan beginnen.

Slotconklusie

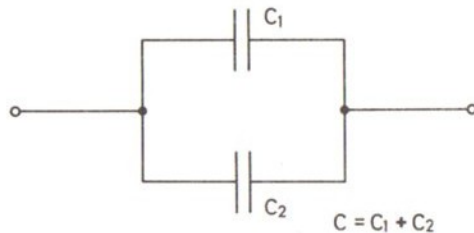
De opname en afgifte van energie door een kondensator is recht evenredig met zijn capaciteit.

12.2 Combinaties van condensatoren

Hoe verhouden spanning en stroom zich als we condensatoren met elkaar gaan combineren?

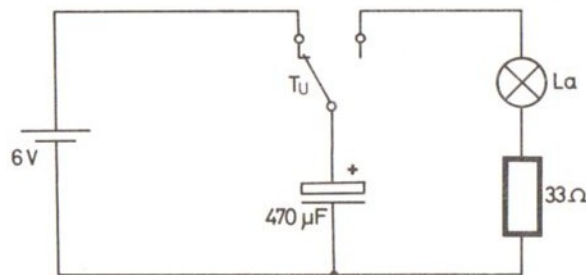


12.8



12.9

In een parallelschakeling is de totale capaciteit de som van de aparte capaciteiten.



12.10

12.2.1 De parallelschakeling

Allereerst nemen we de parallelschakeling van condensatoren onder de loupe. Deze komt in de elektronische praktijk namelijk veelvuldig voor. Uit fig. 12.8 blijkt zonneklaar, zonder meer, dat de parallelschakeling een vergroting van de platen geeft. We kunnen ze bij elkaar optellen.

Totale capaciteit

Een vergroting van de platen betekent dat er meer lading kan worden opgenomen en bij het ontladen weer afgegeven uiteraard. Om de totale capaciteit te krijgen, tellen we de afzonderlijke capaciteiten van de parallelgeschakelde condensatoren bij elkaar op. In fig. 12.9 zien we het schakelschema. De formule luidt:

$$C = C_1 + C_2 + \dots$$

Laten we met een proef eens kijken of onze theoretische beschouwing juist is.

Proef

In fig. 12.10 wordt de 470 μF -condensator opgeladen als T_U niet wordt ingedrukt.

Drukken we T_U in, dan wordt L_a met de (+)pool van C verbonden.

De condensator zal nu ontladen; let op hoe lang en hoe helder het lampje brandt. Herhaal de proef.

We schakelen nu, zie fig. 12.11, de tweede 470 μF -condensator C_2 parallel met C_1 en herhalen de proef. Hoe lang en hoe fel brandt het lampje nu?

Slotconclusie

Wanneer het lampje bij de parallelschakeling helderder en langer brandt, dan moet er meer energie zijn geleverd. De capaciteit van de parallel geschakelde condensatoren moet dus groter zijn dan die van een enkele condensator.

De parallelschakeling van twee 470 μF -condensatoren geeft een vervangingscapaciteit van 940 μF . Het opslagvermogen van de parallelschakeling is dan twee keer zo groot als dat van een enkele condensator.

Welke totale capaciteit heeft een parallelschakeling van 47 μF en 470 μF ?

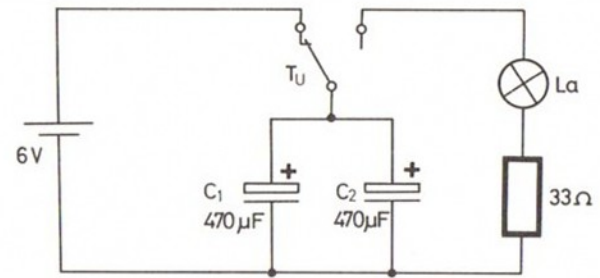
De verhouding tussen stroom en capaciteit

Tijdens het laadproces van een parallelschakeling van condensatoren, stroomt naar de grotere condensator (met de grotere C -waarde) meer lading dan naar de kleinere. Bij het ontladen geeft de grotere ook meer lading af, zoals u zelf al hebt vastgesteld. Vooropgesteld dat de beide parallel geschakelde condensatoren even snel worden opgeladen, dan moet daaruit volgen dat in de tak met de grotere condensator ook een grotere stroom loopt dan in de tak met de kleinere condensator.

Tussen capaciteit en stroom bestaat nevenstaand verband, dat er in een formule zo uitziet:

$$I : I_1 : I_2 : \dots = C : C_1 : C_2 : \dots$$

12.11



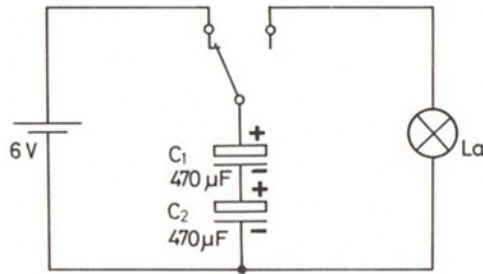
Bij condensatoren liggen de zaken dus anders dan bij weerstanden, waar de deelstromen in een parallelschakeling omgekeerd evenredig zijn met de waarden van de weerstanden. Beide schakelingen hebben echter gemeen dat de som van de deelstromen gelijk is aan de totale stroom: $I_1 + I_2 = I$.

Het zal ook duidelijk zijn dat de energieën van parallel geschakelde condensatoren zich als hun capaciteiten verhouden:

$$W : W_1 : W_2 : \dots = C : C_1 : C_2 : \dots$$

In een parallelschakeling van condensatoren verhouden de laad- resp. de ontladstromen zich als de capaciteiten.

12.2.2 Serieschakeling van condensatoren



12.12

In een serieschakeling van condensatoren is de resulterende totale capaciteit lager dan de kleinste deelcapaciteit.

Totale capaciteit

Na wat in het voorgaande gezegd is over condensatoren en weerstanden ligt het vermoeden voor de hand, dat de serieschakeling van condensatoren een totale capaciteit heeft die lager ligt dan de capaciteit van de kleinste condensator.

1. Proef

We schakelen de twee 470 μF-kondensatoren in serie volgens fig. 12.12. Het lampje zal nu nauwelijks of in het geheel niet oplichten wanneer er een ontladstroom door loopt. Terwijl de 33 Ω-weerstand niet eens in de stroomkring is opgenomen. De formule voor de vervangingscapaciteit van twee in serie geschakelde condensatoren luidt

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Met de serieschakeling van de twee 470 μF-kondensatoren krijgen we een totale capaciteit van slechts 235 μF. Hoe groot is de totale capaciteit van de serieschakeling 470 μF en 47 μF?

De verhouding tussen spanning en capaciteit

Een belangrijke vraag bij de serieschakeling van condensatoren is: hoe hoog zijn de deelspanningen U_1 en U_2 op C_1 en C_2 ? Met de volgende proef verzamelen we de gegevens voor het geven van een antwoord op die vraag.

2. Proef

Schakel, zoals in fig. 12.13 getekend, de 470 μF - en de 47 μF -kondensator in serie en zet op deze serieschakeling een spanning van 4,5 V. Meet eerst de totale spanning U . Laat T_E los en meet daarna de deelspanningen U_1 en U_2 . Wanneer T_E ingedrukt blijft, zijn de gemeten waarden niet juist, omdat dan een deel van de stroom langs C_1 , resp. C_2 wordt geleid. Noteer de resultaten in tabel 12.14 en bereken de daarbij behorende delerverhouding. Deze moet ongeveer overeenkomen met de volgende verhouding:

$$U : U_1 : U_2 = \frac{1}{C} : \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2}$$

Met deze formule en de opgaven van de capaciteiten, berekenen we de delerverhouding opnieuw en noteren de resultaten in de laatste kolom van fig. 12.14.

Kondensatoren verhouden zich weer precies omgekeerd als weerstanden.

Resultaat

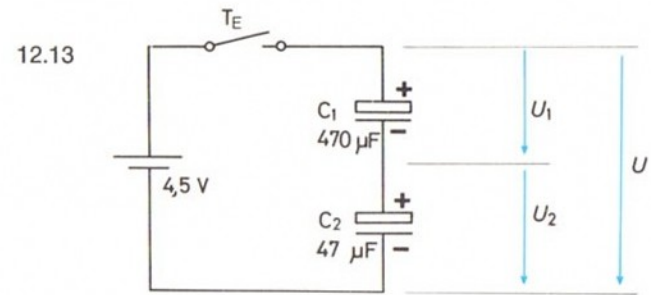
Op de kondensator met de kleinste capaciteit komt de hoogste en op de kondensator met de grootste capaciteit de laagste spanning te staan. Tezamen moeten beide deelspanningen de totale spanning geven. We kunnen nu ook de deelspanningen U_1 en U_2 berekenen en vergelijken met de gemeten waarden (tabel 12.14).

De verdeling van de energie

Hoe verhouden de energieën zich die in de kondensatoren van een serieschakeling liggen opgeslagen?

Overeenkomstig de voor de parallelschakeling opgestelde vergelijking geldt voor de serieschakeling:

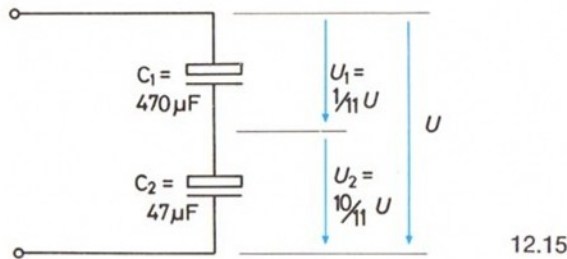
$$W : W_1 : W_2 = \frac{1}{C} : \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2}$$



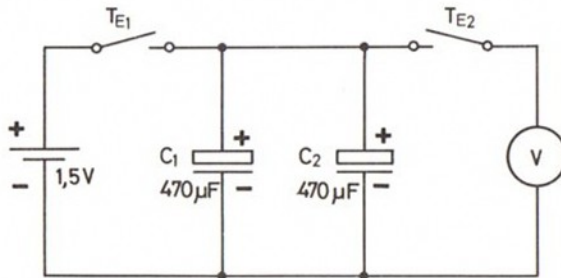
12.14

U in V	U_1 in V	U_2 in V	$U_1 : U_2$ gemeten	$U_1 : U_2$ berekend

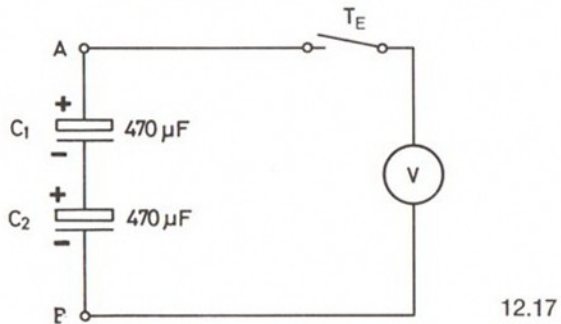
De capaciteiten van condensatoren in een serieschakeling verhouden zich omgekeerd evenredig met de bijbehorende deelspanningen.



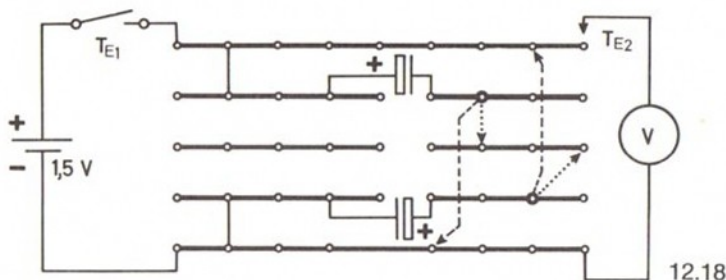
12.15



12.16



12.17



12.18

Vraag

Hoeveel energie kan in een serieschakeling van een $470 \mu\text{F}$ - en een $47 \mu\text{F}$ -kondensator worden opgeslagen als er een spanning van 6V op staat?

12.3 Spanningsverdubbeling door condensatorschakelingen

1. Proef

Fig. 12.16 toont hoe we 2 parallel geschakelde condensatoren opladen. De spanningsbron moet ongeveer $1,5\text{V}$ zijn. Wie met een trafo werkt, kan de spanning met een spanningsdeler (470Ω en 100Ω) verkrijgen. Als we T_E indrukken, worden de condensatoren opgeladen. De voltmeter mogen we niet ingeschakeld laten staan, na het loslaten van T_E zouden de condensatoren zich over de inwendige weerstand van de meter ontladen.

Schakel nu de beide condensatoren in serie. Dat gaat snel en handig als we het schema van fig. 12.18 aanhouden. De gestreepte verbindingen geven de parallelschakeling van 12.16 en de serieschakeling van 12.17. Let op de polariteit. De spanning op de serieschakeling bedraagt 3V , dat is het dubbele van wat de spanningsbron leverde om de condensatoren op te laden!

De serieschakeling van condensatoren biedt ons dus een verbluffende mogelijkheid: te beschikken over een spanningsbron die voor korte tijd een hoge spanning kan leveren. Met een hele „serie“ in serie geschakelde condensatoren kunnen we inderdaad een bliksemflits simuleren.

Dit principe past men toe bij het testen van hoogspanningsapparatuur. Uiteraard met een ander soort condensator. Wat verandert er als we de $470\ \mu\text{F}$ -condensator vervangen door de $47\ \mu\text{F}$ -condensator? Wijst de voltmeter dan ook de dubbele spanning aan? Daalt de spanning nu sneller wanneer we de voltmeter inschakelen, omdat er veel minder energie is opgeslagen dan het geval was bij de twee $470\ \mu\text{F}$ -condensatoren?

2. Proef

We herhalen het hele experiment nu in een iets andere vorm. De spanningsbron levert nu 4-5 V, maar in geen geval meer. Fig. 12.19 laat de beide schakelingen zien. We verbreken de verbinding met de spanningsbron en laten eerst de beide parallel geschakelde condensatoren zich ontladen via het lampje.

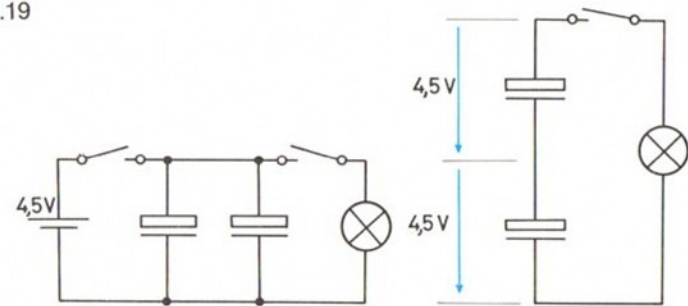
Let daarbij goed op de helderheid. We laden de condensator weer op en schakelen deze nu in serie. De ontlading gebeurt weer via een lampje. Dat zal nu veel feller branden – hoewel de opgeslagen energie in de parallelschakeling precies even groot was als in de serieschakeling!

De oorzaak is de twee keer zo hoge spanning die de serieschakeling aan het begin van de ontlading levert. Een andere reden – de veranderde tijdconstante – zullen we nog leren kennen.

3. Proef

Schakel de twee $470\ \mu\text{F}$ -condensatoren parallel en laadt hen op met de hoogste spanning die de trafo levert. Daarna zetten we beide condensatoren in serie en sluiten we de schakeling kort met twee stekkertjes of een blank koperdraadje. We krijgen dan een behoorlijke vonk tussen de uiteinden. Vergelijk de vonk met de vonk die de parallelschakeling bij kortsluiting oplevert. Het is een proef die we beter niet te vaak kunnen doen, daar de topstroom bij de kortsluiting zo groot kan zijn, dat de condensatoren er onder te lijden hebben.

12.19



Wie de met een stoot ontladende serieschakeling op een lampje aansluit, loopt grote kans dat het snel de geest geeft. Wie voor deze proef een zaklantaarnlampje neemt van 3,8 V/0,07 A kan er zeker van zijn dat het stuk gaat. Het krijgt ongeveer 6 keer de max. toelaatbare spanning te verwerken.

12.4 Laden en ontladen via een weerstand

12.4.1 Algemene beschouwingen en inleidende proef

Reeds bij de eerste proeven met condensatoren zal het u waarschijnlijk opgevallen zijn, dat de spanningsveranderingen bij de kleinere condensator ($47 \mu\text{F}$) veel sneller verliepen dan bij de grotere van $470 \mu\text{F}$. Voor de eerste maal in dit boek stuiten wij in onze experimenten op de dimensie van de tijd. Het feit dat de condensator de tijd een rol doet spelen is van fundamentele betekenis voor de talrijke schakelingen die in hobbylabor 3 uitvoerig aan de orde komen.

We kunnen het ook zo uitdrukken: tijdens het proces van het laden of ontladen van een condensator verandert de spanningshoogte met de tijd. Wiskundig: de spanningshoogte is een functie van de tijd. Daar de spanningsverandering gelijk oploopt (of afloopt) met het laden en ontladen van de condensator, vertelt de spanningsverandering iets over de ladingstoestand van de condensator.

We willen het verband eens wat exacter onderzoeken. Zoals reeds gezegd, het is van fundamentele betekenis in de meeste produkten van de industrieel toegepaste elektronika, zoals rekenmachines, computers, pulsegevers in de meet- en regeltechniek, enz.

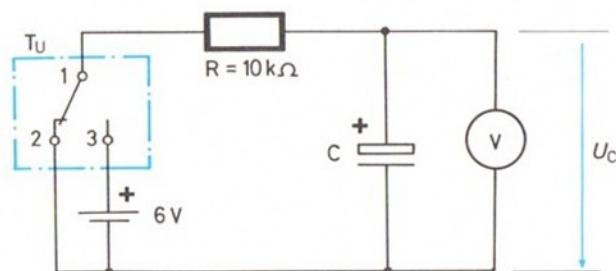
In de eerste proeven verliepen laden en ontladen zo snel dat we in feite alleen het proces zagen, maar over het verloop niets konden zeggen. Om de zaken precies te kunnen onderzoeken zullen we het laad- en ontladproces moeten vertragen. Het beste lukt dat door in de stroomkring een weerstand op te nemen.

Inleidende proef

Fig. 12.20 laat de schakeling zien. Evenals in proef 12.6 gebruiken we de ft-drukknop als omschakelaar (zie fig. 12.6a en 12.6b). Let op de juiste poolaansluitingen van de condensator.

Nieuw in dit experiment is dat de condensator C in serie ligt met een hoge weerstand. Tabel 2.21 geeft de verschillende waarden die we achtereenvolgens voor C moeten nemen.

12.20



12.21

Proefnr.	C in μF	R in $\text{k}\Omega$
1	47	10
2	470	10
3	940	10

De voltmeter blijft nu in de schakeling opgenomen, hoe hoog kan de spanning op de condensator maximaal worden, als deze geheel is opgeladen?

Die waarde is in de schakeling te meten, maar we kunnen hem ook van tevoren uitrekenen als we in ogenschouw nemen dat de parallelschakeling van voltmeter en condensator in serie ligt met R . De inwendige weerstand van de voltmeter kennen we! (Trefwoord: spanningsdeler).

Voorlopig hoeven we nog geen nauwkeuriger waarde te hebben. Het is voldoende om een goed beeld te krijgen van de verandering van de spanning U_C bij het laad- en ontladproces, zodra we T_u indrukken resp. loslaten.

Resultaat

Dank zij de inbouw van de $10\text{ k}\Omega$ -weerstand kunnen we de spanningsveranderingen goed waarnemen. De spanning stijgt, resp. daalt, bij het begin van het laden en ontladen sneller dan aan het eind.

Duidelijk is nu ook vast te stellen, dat de tijdsduur van laden en ontladen afhangt van de capaciteit van de condensator.

Slotconclusie

1. De maximale waarde U_{Cmax} is in deze schakeling afhankelijk van weerstand R , omdat R en R_i van de voltmeter een spanningsdeler vormen. Als de voltmeter er niet was, dan zou U_C de waarde van de stroombron bereiken.
2. Uit het snelheidsverloop van de spanningsverandering – eerst snel, dan steeds langzamer – valt te conkluderen dat de laadstroom eveneens volgens hetzelfde patroon toe- resp. afneemt. Het volgende hoofdstuk behandelt hoe stroom en spanning bij het opladen en ontladen van de condensator precies met elkaar samenhangen.
3. De proef heeft het resultaat van voorgaande experimenten wat betreft de afhankelijkheid van laad- en ontladtijd van de capaciteit van de condensator bevestigd.
4. De tijdsduur van de processen wordt verlengd, daar de stroomsterkte bij toenemende weerstandswaarde steeds kleiner wordt.

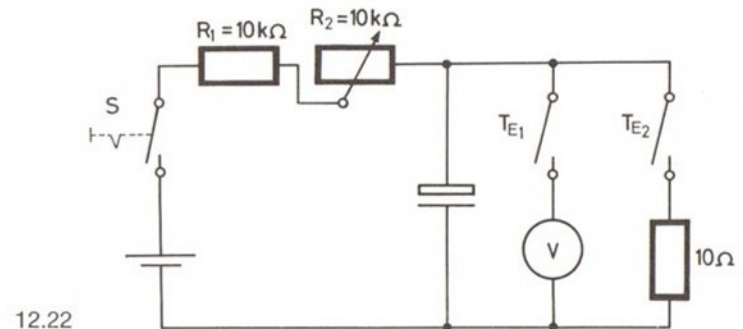
Hetgeen betekent dat per seconde een kleinere hoeveelheid lading wordt verplaatst waardoor het langer duurt voor de condensator is opgeladen.

12.4.2 Het laadproces

De uitspraak: „de verandering van de spanning U_C op de condensator verloopt eerst snel en dan steeds langzamer“ willen we preciseren. We willen het proces precies en nauwkeurig vastleggen en gaan daarom een karakteristiek (een grafiek) uitzetten die het gedrag van U_C in afhankelijkheid van de tijd t beschrijft.

Proef

Bouw schakeling 12.22, als laadweerstand nemen we $10\text{ k}\Omega$ en in serie daarmee geschakeld de $10\text{ k}\Omega$ -potentiometer. Stel de knop zo in, dat de laadweerstand $R_1 + R_2$ ongeveer $20\text{ k}\Omega$ bedraagt. (We kunnen de potmeter ook tussen de aansluitingen A en E gebruiken). Met deze schakeling kunnen we bepalen hoe snel de spanning U_C op de condensator omhoog gaat.



Voor het inschakelen nemen we nu niet zonder meer een drukknop, maar een ft-poolomkeerschakelaar* of een ft-drukknop met een stroef draaiende scharniersteen, of heel eenvoudig een kabeltje met een stekker.

Neem als het even kan geen trafo maar een batterij als spanningsbron. Wegens de gunstige aflezing op de schaal van de voltmeter is een spanning van 3-4 volt het beste.

Het meten kan nu op verschillende manieren gebeuren. Elke 10 seconden kunnen we de voltmeter even aansluiten, waarbij een ander dan gauw de waarde afleest en in tabel 12.23 noteert. Waarde U_{10} is de gemeten waarde na 10 seconden, U_{20} na 20 seconden, enz.

Wie liever alleen werkt of de meetfout wil opheffen die noodzakelijkerwijs ontstaat door het kortstondig aansluiten van de meter, gaat als volgt te werk. Sluit de meter na 9 seconden aan, lees 1 seconde later de waarde af en noteer die in de tabel. Schakel de batterij uit en laat de condensator zich minstens 3 seconden lang ontladen over de $10\text{ k}\Omega$ -weerstand. We herhalen de proef, met dit verschil dat we de voltmeter nu pas na 19 seconden aansluiten. Eén seconde later lezen we weer de waarde af. Omdat de voltmeter in die tussentijd niet was ingeschakeld, krijgen we exact de waarde voor de tijd $t = 20$ sek. Na opnieuw de condensator te hebben ontladen, meten we op dezelfde wijze de spanning na 30 seconden, enz. Na 60 seconden zien we dat de spanning niet noemenswaardig meer stijgt.

De hele serie metingen herhalen we tweemaal, één enkele serie metingen is voor dergelijke proeven niet voldoende. We gebruiken de gemiddelde waarden van de drie metingen. Tel de drie waarden voor elke tijd bij elkaar op en zet de som in de kolom „som“ van tabel 12.23. Daarna delen we de som door 3 zodat we het gemiddelde krijgen, dat we in de laatste kolom noteren.

12.23

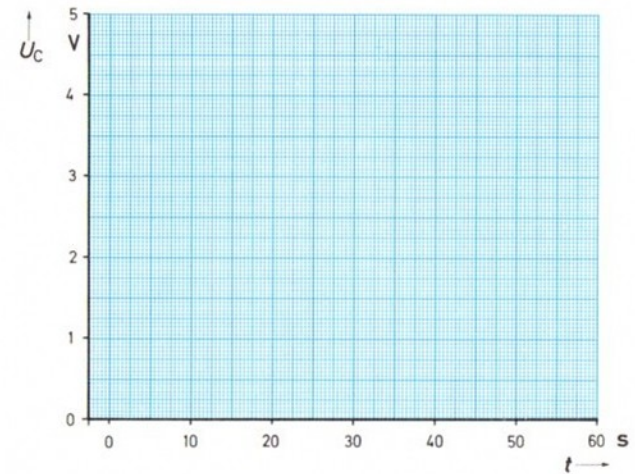
meting van	t in sek	U_c in V			som U_c 1-3 in V	som : 3 = U_c gemiddeld in V
		1	2	3		
voorbeeld U_{10}	10	1,6	1,8	1,7	5,1	1,7
U_{10}	10					
U_{20}	20					
U_{30}	30					
U_{40}	40					
U_{60}	60					

* Deze schakelaar is met de ft-omschakelaar, bijbehorende kabeltjes en stekkers te verkrijgen als aanvullingsdoos em 3.

De gemiddelde meetwaarden gaan we in het diagram 12.24 uitzetten, waarna we de punten met elkaar verbinden. Uw curve of karakteristiek zal waarschijnlijk wel wat afwijken van het voorbeeld 12.25, dat een ideale weergave is. Toch moeten ook uw meetresultaten een min of meer overeenkomend beeld opleveren.

Mocht dit absoluut niet het geval zijn, dan nemen we de andere 470 μF -kondensator. Een andere mogelijkheid is de condensator op de hoogst beschikbare spanning (max. 15 V) te zetten. Dit helpt wanneer de condensator lang niet gebruikt is en daarom opnieuw geformeerd moet worden. Op pag. 215 wordt verklaard wat formeren is.

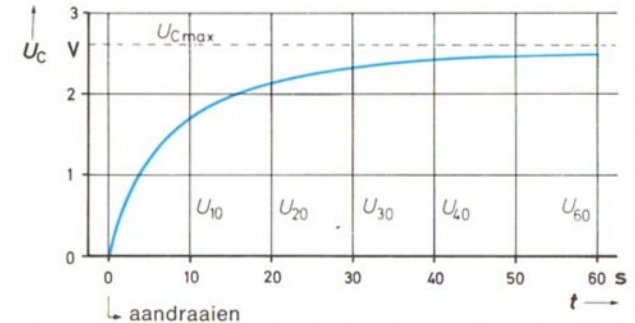
12.24

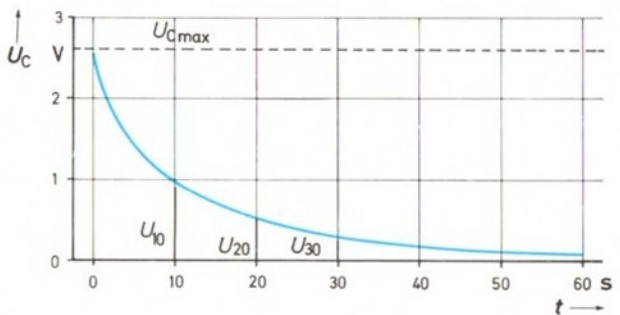
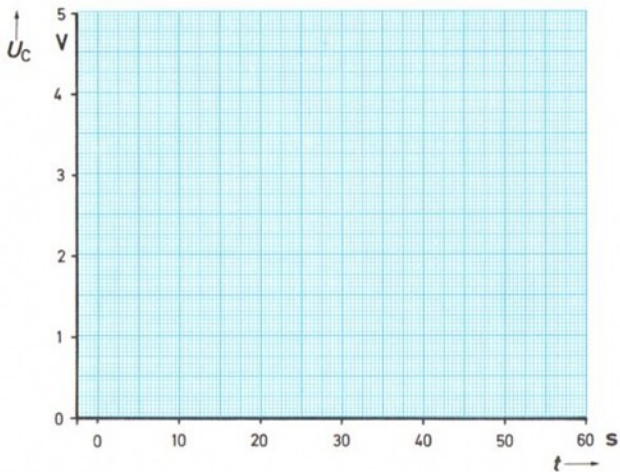
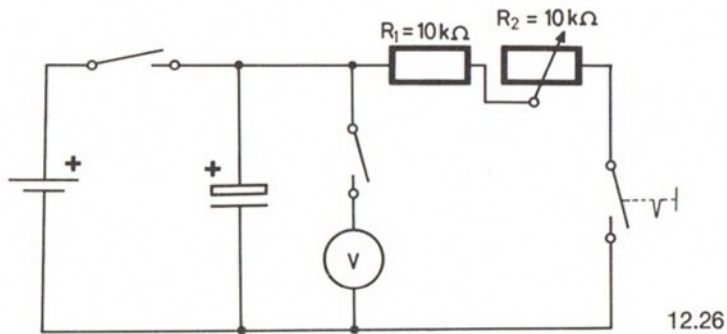


Wat vertelt het diagram ons?

1. Dat in de eerste 10 seconden reeds de helft van de maximaal bereikbare spanning op de condensator staat. Iets dat met de voltmeter in de hand niet zonder meer is vast te stellen.
2. De spanning op de condensator moet vanaf 0 volt omhoog lopen, daar de condensator voor het begin van de eerste meting volkomen ontladen was. Het betekent dat de condensator bij het begin van het opladen heel even de stroomkring kortsluit. Dit verklaart de heftige wijzeruitslag in proef 12.6.
3. Na een bepaalde tijd houdt het verplaatsen van ladingdragers op, er loopt geen stroom meer en de condensatorspanning heeft zijn hoogste waarde bereikt. Nu werkt de condensator als een oneindig hoge weerstand of als een onderbreking in de stroomkring.

12.25





12.4.3 Ontladen

Met de schakeling 12.26 kunnen we de ontlaadcurve van een condensator via een $20\text{ k}\Omega$ -weerstand bepalen. De bijbehorende tabel is in feite hetzelfde als die van fig. 12.23. Ook hier is het verstandig weer drie series metingen uit te voeren en de gemiddelden te berekenen. Deze zetten we dan uit in diagram 12.27; de curve moet in principe met die van 12.28 overeenkomen. De karakteristiek vertoont hetzelfde beeld als dat van de laadcurve. Het is gemakkelijk te controleren door de laadcurve op transparant papier over te trekken en dan op fig. 12.27 te leggen.

Alvorens verder te gaan, een korte samenvatting van de tot nu toe verkregen inzichten.

Samenvatting

1. Bij het begin van het opladen werkt de condensator een moment als een kortsluitbrug; daarna lijkt het gedrag op dat van een groter wordende weerstand waar een stroom doorheen loopt. Als de condensator opgeladen is, dan werkt hij als een onderbreking. Dit geldt alleen voor de gelijkstroomkring, bij wisselstroom ligt het anders zoals we nog zullen zien.
2. De opgeladen condensator werkt als een energiebron met meer of minder opgeslagen energie, die hij aan een verbruiker (weerstand, lampje, enz.) kan afgeven.
3. In beide processen loopt er een stroom: de laad-, resp. ontladstroom. De stromen lopen in tegengestelde richting.
4. De spanning U_C op de condensator wisselt niet van polariteit. Zij is niets anders dan een maat voor het potentiaalverschil tussen de condensatorplaten.
5. Beide processen hebben een bepaalde tijd nodig. Bovendien verlopen ze niet gelijkmatig (lineair) maar hebben ze een niet-lineaire functie, waarover in hoofdstuk 12.5.4 nog kort iets wordt gezegd.

12.5 De tijdconstante van de RC-schakeling

12.5.1 Algemeen

De serieschakeling van een condensator met een weerstand heet kortweg een RC-schakeling. Deze schakeling speelt een heel belangrijke rol in de gelijkstroom- en de wisselstroomelektronica (transmissie-, radio- en televisietechnieken).

We zullen ons er daarom in moeten verdiepen. Zonder kennis van deze schakeling zijn vele elektronische schakelingen gewoon niet te begrijpen.

Een RC-schakeling heeft als belangrijkste kenmerk zijn tijdconstante, die wordt aangegeven met de Griekse letter τ (spreek uit: tau). De tijdconstante is gelijk aan het produkt van R en C .

In formules dient de letter τ cursief te worden geschreven, om druktechnische redenen gebeurt dat vaak niet. In een formule ziet de tijdconstante er zo uit:

$$\tau = R \cdot C \text{ (in seconden)}$$

R wordt in ohm en C in farad aangegeven. Het is gemakkelijker rekenen als we R in Mega ohm ($M\Omega$) en C in microfarad (μF) nemen, ook dan krijgen we τ in seconden.

Hoe komt het dat het produkt van weerstand en capaciteit nu uitgerekend de tijd geeft? We gaan daarvoor even rekenen met de symbolen, trouwens altijd een aardig controlemiddel om te zien of een vraagstuk juist is opgelost.

We hebben $\tau = RC$, voor R nemen we $\frac{E}{I}$ volgens de wet van Ohm.

voor C zetten we $\frac{Q}{E}$, maar $Q = I \cdot t$ (zie pag. 178).

$$\text{We krijgen dan } \tau = R \cdot C = \frac{E}{I} \cdot \frac{I \cdot t}{E} = t$$

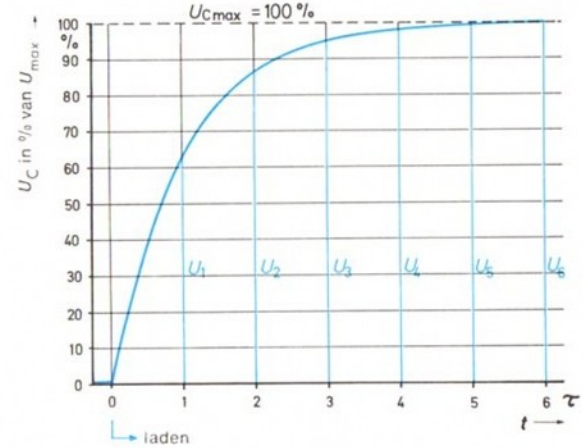
Wie dit interessant vindt kan eenzelfde controle toepassen niet met de symbolen voor de grootheden, maar voor eenheden. De uitkomst krijgen we dan in s.

$$\tau = R \cdot C = \Omega \cdot F = \frac{V}{A} \cdot \frac{A \cdot s}{V} = s$$

12.5.2 Theoretische laadcurve

Wiskundig is aan te tonen dat de tijdconstante de tijd is waarin de spanning U_C op een condensator vanaf de beginwaarde (b.v. 0 volt) stijgt met 63% van het verschil tussen de beginwaarde en de max. bereikbare spanning U_{max} . (b. v. van de aangelegde batterijspanning). In fig. 12.29 is deze spanning U_C met U_1 aangegeven.

Stel dat het 8 seconden duurt, vanaf het inschakelen van de batterij (U_C is op dat moment nul) tot het moment dat $U_C = 63\%$ van de batterijspanning. De



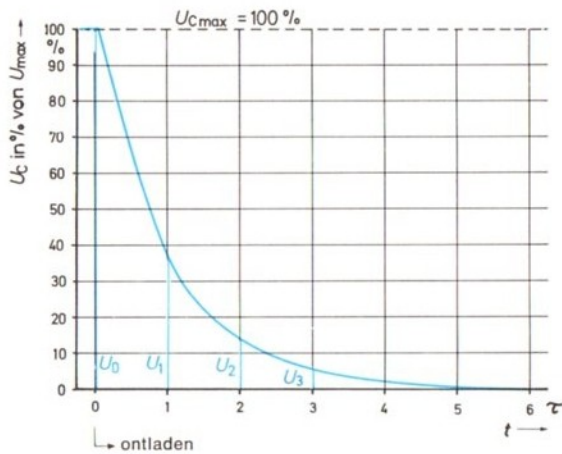
12.29

tijdconstante is dus 8 seconden. Hoe hoog zal de condensatorspanning na de volgende 8 seconden zijn, oftewel 2τ ?

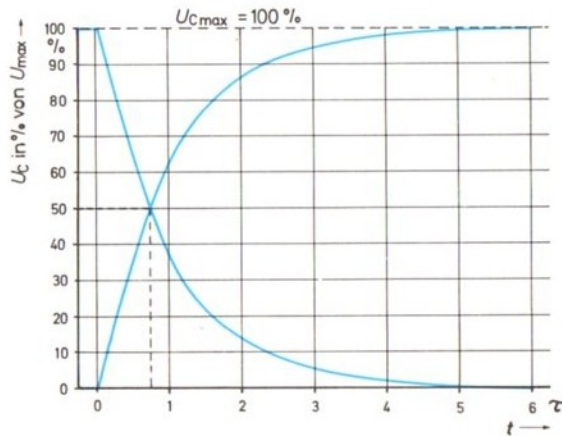
Volgens de definitie stijgt de spanning dan weer met 63% van het verschil tussen beginwaarde en max. bereikbare spanning. De beginwaarde is nu niet 0, maar 63%. Het verschil is 37%. En hiervan moeten we 63% nemen, dat is $0,63 \times 37 = 23,3\%$. Dus na 2τ is de condensatorspanning $63\% + 23,3\% = 86,3\%$ van de max. bereikbare spanning.

Waaruit blijkt dat van de 9e t/m de 16e seconde de snelheid waarmee de spanning stijgt steeds kleiner wordt.

In de derde trap of tijdconstante τ gaat de spanning weer 63% van het verschil omhoog. Dat verschil bedraagt nu nog maar $100 - 86,3 = 13,7\%$. Na $3\tau = 24$ seconden is de condensatorspanning $86,3 + (0,63 \times 13,7) = 86,3 + 8,6 = 94,9\%$ van de max. bereikbare spanning. Deze waarde (van 94,9%) noemen we U_3 . Na 3τ (in ons voorbeeld 24 sek) ontbreekt er nog zo'n 5% van de max. bereikbare spanning.



12.30



12.31

Op dezelfde wijze kunnen we U_4 , de spanning na 4τ die $98,1\%$ van U_{max} is, berekenen. Na 5τ is de condensatorspanning U_5 opgelopen tot $99,3\%$ van de maximaal bereikbare spanning. Na elke volgende tijdconstante τ stijgt de spanning met 63% van het verschil, theoretisch betekent het dat U_{max} nooit wordt bereikt. Praktisch is na $t = 5 \tau$ de condensator opgeladen of ontladen.

Na een periode van 5 tijdconstanten is een condensator in een RC-schakeling praktisch opgeladen of ontladen.

Technisch belangrijk is nog de tijd waarin een condensator op de helft van de max. bereikbare spanning komt. Uit diagram 12.29 blijkt dat dit ongeveer in $\frac{2}{3} \tau$ het geval is. (In ons voorbeeld ongeveer 5,3 sek.

Interessant is ook het volgende. Als we de RC-schakeling aansluiten op een bron die een konstante – van de spanning onafhankelijke – stroom levert (met elektronische schakelingen is zo iets bij benadering te doen), dan wordt de condensator lineair, dat betekent met konstante snelheid, opgeladen. En de tijd die daarvoor nodig is, is precies de tijdconstante.

12.5.3 De theoretische ontladcurve

Ook de U -curve van de ontlading loopt volgens hetzelfde wiskundige principe (fig. 12.30). Na $t = 1 \tau$ is de spanning U van praktisch U_{max} gedaald tot 37% van U_{max} . In fig. 12.30 is deze spanning met U_1 aangegeven.

Na $t = 2 \tau$ is U tot $13,7\%$ van de beginwaarde (in dit geval U_{max}) gedaald ($U_2 = 37 - 37 \cdot 0,63 = 13,7\%$). Zo krijgen we achtereenvolgens $U_3 = 5,1\%$; $U_4 = 1,9\%$ en $U_5 = 0,7\%$.

In de praktijk geldt dat de condensator na 5τ ontladen is.

In fig. 12.31 zijn fig. 12.29 en 12.30 samengevoegd. Uit dit spanning/tijddiagram blijkt tevens dat een condensator na ongeveer $\frac{2}{3} \tau$ voor de helft is opgeladen resp. ontladen.

Na een periode van $\frac{2}{3} \tau$ is de condensator van een RC-schakeling voor de helft opgeladen, resp. ontladen.

12.5.4 Wat is een e-functie?

Een functie (zie pag. 27) die verloopt als beschreven voor de laad- en ontladcurve, heet een e-functie of exponentiële functie. We kunnen daar niet verder op ingaan, want dat zou ons op een wiskundig zijspoor voeren.

In een dergelijke functie speelt het getal „e“, dat door de wiskundige Leonhard Euler (1707–1783) werd bepaald, een beslissende rol. Het heeft de waarde $e = 2,71828 \dots$

Omdat vele natuurlijke groeiprocessen volgens dergelijke e-functies verlopen, heet het getal e ook wel het natuurlijke grondgetal of een natuurconstante.

12.5.5 Bepalen van tijdkonstanten

1. Proef

- Plaats in schakeling 12.22 achtereenvolgens de waarden voor R en C , zoals in tabel 12.32 aangegeven. Bepaal voor elke RC-schakeling de bereikbare U_{Cmax} (zie proef 12.20) bij een spanning van de bron $U_{Bat} = 3$ V. Noteer de gevonden waarden in tabel 12.32.
- Daarna meten we de tijd t die nodig is om C tot de helft van U_{max} op te laden; die tijd is gelijk aan $\frac{2}{3} \tau$ van de betreffende RC-schakeling (kolom 5).
Ter oriëntatie zijn in fig. 12.33 enige laadcurves weergegeven.
- Met de meetwaarde van t kunnen we de tijdconstante van elke RC-schakeling berekenen: $\tau = \frac{3}{2} t$ (laatste kolom).
- Met de formule $C = \tau/R$ kunnen we de werkelijke capaciteit van de condensator berekenen (tabel 12.34).

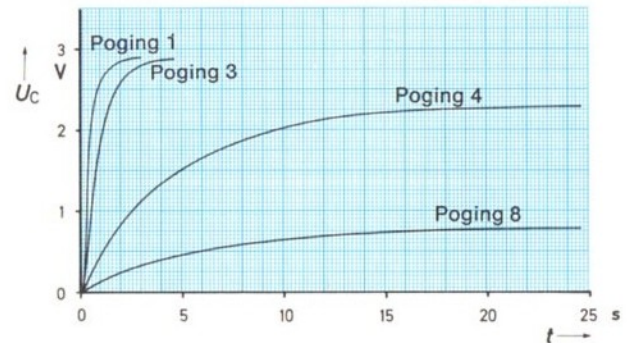
Het is mogelijk dat de door u verkregen waarden aanzienlijk afwijken van de opdruk; voor elektrolytische condensatoren gelden toleranties tot $+30\%$, -10% . Merk de betreffende elco met een plaketiketje waarop de werkelijke waarde staat.

2. Proef (belangrijk!)

Onderzoek of de tijdconstante van een RC-schakeling voor spanningen van verschillende hoogte gelijk blijft of verandert.

12.32

proefnr	R in k Ω	C in μ F opdruk	U_{Cmax} in V	τ in s gemeten	τ in s berekend
1	1	470 (C ₁)			
2		470 (C ₂)			
3		940			
4	10	470 (C ₁)			
5		470 (C ₂)			
6		940			
7	47	47			
8		470 (C ₁)			
9		470 (C ₂)			
10	68	47			

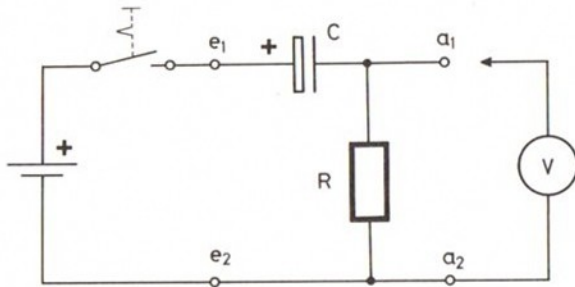


12.33

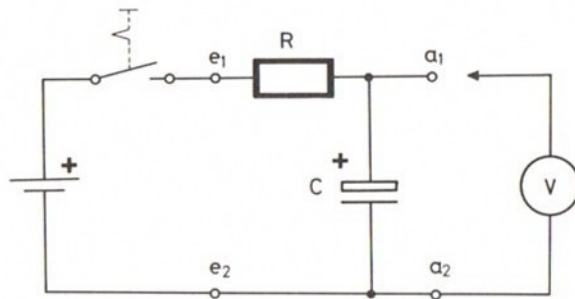
12.34

C in μ F opdruk	C in μ F werkelijk
47 470 (C ₁) 470 (C ₂)	

12.6 De RC-schakeling als vierpool



12.35



12.36

12.6.1 De condensator als dwarsschakel of als langsschakel

Een condensator en een weerstand kunnen we volgens fig. 12.35 of fig. 12.36 in serie schakelen. De tijdconstante van de beide schakelingen is gelijk omdat in beide gevallen een $470 \mu\text{F}$ -condensator en een $10 \text{ k}\Omega$ -weerstand in serie staan.

De laadstroom zal in beide schakelingen eveneens gelijk zijn.

Proef

We beschouwen nu elk van de schakelingen als een vierpool met de ingangen e1 en e2 en de uitgangen a1 en a2. Na elkaar bouwen we de beide schakelingen en bepalen we in welke schakeling de voltmeter onmiddellijk de volle spanning aanwijst en in welke dat pas het geval is als de condensator geheel is opgeladen.

Resultaat

We zien dat het verschil maakt of in een dergelijke vierpool de weerstand of de condensator als langsschakel resp. als dwarsschakel wordt gebruikt. In schakeling 12.35 is de condensator als langsschakel en de weerstand als dwarsschakel gebruikt, in schakeling 12.36 is het precies andersom.

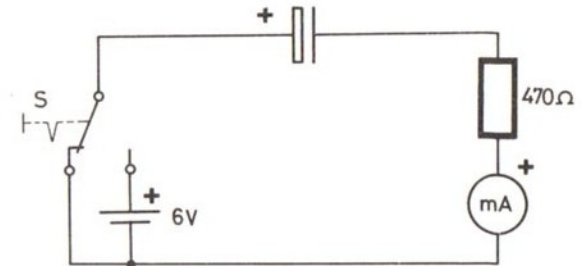
Als de weerstand de dwarsschakel is, dan is de spanning bij het begin van het laadproces even hoog als de batterijspanning. De spanning daalt naarmate het opladen vordert en wordt nul wanneer de condensator is geladen. Voor de meting mag de voltmeter ingeschakeld blijven, wanneer we bij de berekening van de tijdconstante rekening houden met het feit dat de laadweerstand R (in het voorbeeld $10 \text{ k}\Omega$) door de parallel geschakelde inwendige weerstand van de meter ($30 \text{ k}\Omega$) wordt verminderd (in het voorbeeld tot $7,5 \text{ k}\Omega$).

12.6.2 De RC-schakeling als spanningsdeler

1. Proef

Bouw de schakeling van fig. 12.37, let daarbij op de juiste poolaansluitingen van batterij, condensator ($C = 940 \mu\text{F}$) en stroomsterktemeter. In de getekende stand van de schakelaar S heeft de condensator zich ontladen over de 470Ω -weerstand. Bedien de schakelaar en de condensator wordt opgeladen; de wijzer van de milli-ampèremeter zal derhalve even naar rechts uitslaan. Alvorens de schakelaar weer in de andere stand te zetten, de volgende vraag: in welke richting zal de wijzer bij het ontladen uitslaan (Denk hierbij ook aan proef 12.6).

12.37

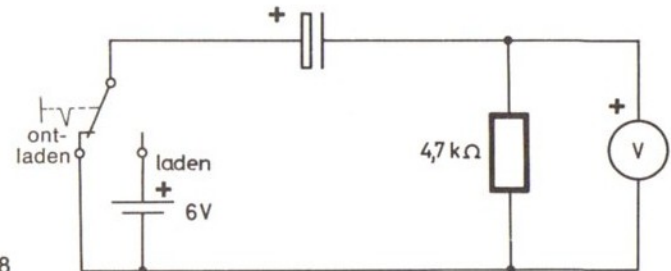


2. Proef

We gaan nu eens kijken hoe de spanning op de weerstand zich gedraagt. Hiervoor gebruiken we schakeling 12.38. Het proces is gemakkelijker te volgen als we in plaats van de 470Ω , de $4,7 \text{ k}\Omega$ -weerstand nemen.

Als we de schakelaar op „laden“ zetten, dan zal de voltmeter direct uitslaan, waarna de wijzer langzaam naar 0 terugloopt. Maar welke kant zal de wijzer uitslaan als we de schakelaar op „ont-laden“ zetten? (gebruik geen gevoelige meetapparatuur!)

12.38

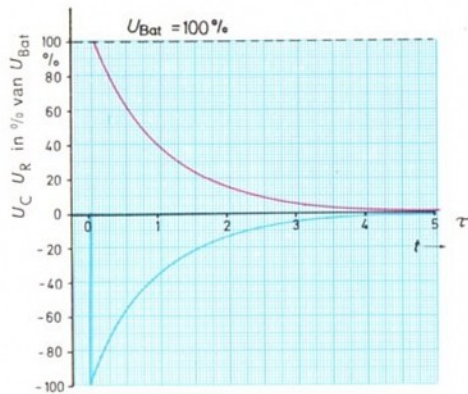


Resultaat

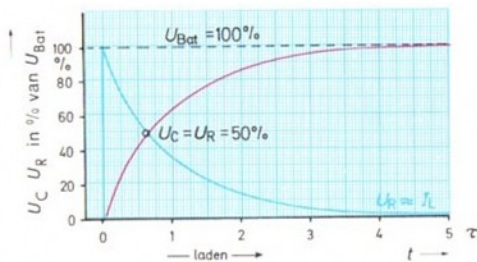
De voltmeter slaat de tegenovergestelde richting uit als bij het opladen.

Slotconklusie

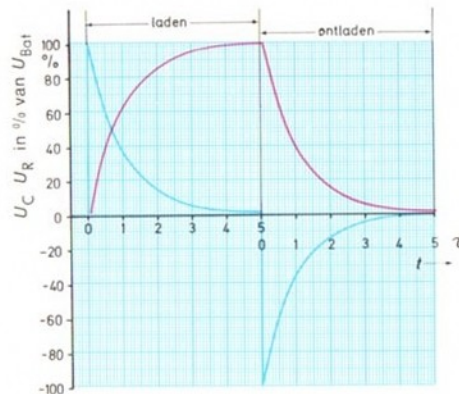
De polariteit van de spanning op de weerstand van een RC-schakeling geeft antwoord op de vraag of de condensator oplaadt of ontladtd. Maar niet of de condensator geheel is opgeladen of leeg. In beide gevallen zal de voltmeter niets aanwijzen.



12.39



12.40



12.41

Wie daar zin in heeft kan voor schakeling 12.38 de curves uitzetten van de spanning op de weerstand. Bepaal in elk geval de τ -waarde van deze schakeling voor het laden en ontladen (na $\frac{2}{3} \tau$ is $U_R = \frac{1}{2} U_{Bat}$). Zal de waarde van τ voor het opladen even groot zijn als voor het ontladen?

Uw diagram moet overeenkomen met fig. 12.39. In deze grafiek is de spanningscurve voor de ontlading onder het nulpunt uitgezet. Deze voorstelling van zaken wordt gekozen om aan te geven dat de spanning op de weerstand van polariteit is veranderd. In fig. 12.40 zien we het diagram voor de spanning op de condensator. Deze heeft, zoals in hoofdstuk 12.4 reeds vastgesteld, alleen positieve waarden!

In beide diagrammen is de spanning op de weerstand en de condensator niet in volts uitgedrukt, maar in procenten van de batterijspanning. Dit heeft natuurlijk het voordeel dat de curve voor elke willekeurige spanning geldt. Ook de tijdas is genormaliseerd. De tijd is namelijk niet in seconden uitgedrukt maar in eenheden van de tijdconstante τ . Dit diagram geldt dan ook voor elke willekeurige RC-waarde.

Tijdens het laden is de som van U_R en U_C gelijk aan de batterijspanning U_{Bat} . Wie naast de curve van U_R ook nog die voor U_C wil tekenen, hoeft deze laatste niet te meten. Deze spanning is namelijk met de volgende vergelijking te bepalen:

$$U_C = U_{Bat} - U_R$$

Tijdens het ontladen is de (+)spanning op de condensator even groot als de (-)spanning op de weerstand.

Fig. 12.41 geeft de beide spanningsgrafieken in één diagram. Heel anschouwelijk blijkt ook hier dat de som $U_R + U_C$ op elk tijdstip de waarde U_{Bat} geeft. Anders gezegd: weerstand en condensator vormen tezamen een spanningsdeler.

In een RC-schakeling zal de spanning op de weerstand van polariteit wisselen bij de overgang van laden naar ontladen. De spanning op de condensator behoudt dezelfde polariteit.

12.6.3 De belaste RC-schakeling

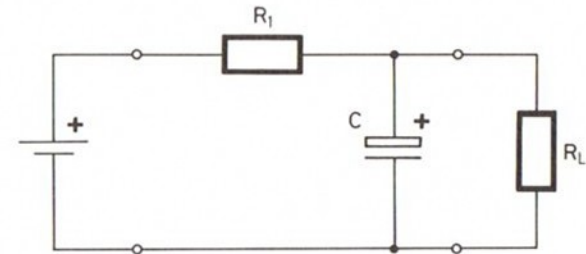
Het geval dat we parallel aan de weerstand van de RC-schakeling een tweede weerstand als belasting schakelen, is niet „spannend“. Wat er gebeurt? De waarde van de tijdconstante verandert. Anders wordt het als we parallel met de condensator een weerstand schakelen, zoals in fig. 12.42 is gedaan. Alleen wanneer R_L veel groter is dan R , mogen we de schakeling nog als een simpele RC-schakeling behandelen. Maar zelfs bij het aansluiten van meetapparatuur kunnen er moeilijkheden ontstaan. Om die reden hebben we in hoofdstuk 12.4.2 een tijdrovende manier voor het meten van U_C toegepast.

In het geval dat de belastingsweerstand niet mag worden verwaarloosd, kunnen we schakeling 12.42 beter tekenen zoals in fig. 12.43 is gedaan. Nu blijkt veel duidelijker dat we een spanningsdeler voor ons hebben die bestaat uit 2 weerstanden; waarvan één met een parallel geschakelde condensator. Onmiddellijk na het aansluiten van de belaste spanningsdeler op de bron, is – als gewoonlijk – de spanning U_C op de condensator eerst nul; de condensator sluit de kring kort.

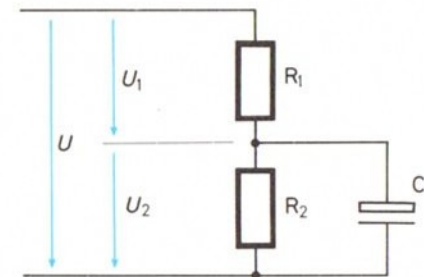
Als de condensator zich heeft opgeladen, zal C als een oneindig grote weerstand werken. Op dat moment werkt alleen de spanningsdeler R en R_L . Iets wat u waarschijnlijk al in proef 12.20 had vastgesteld toen de voltmeter parallel met de condensator en in serie met de weerstand R lag.

Maar hoe staat het nu met de tijdconstante τ ? Gaat het opladen nu sneller of langzamer dan in een schakeling zonder belastingsweerstand op de condensator?

Probeer zelf het antwoord te vinden.



12.42



12.43

Bouw de schakeling van fig. 12.44. Deze komt overeen met die van fig. 12.43. De RC -schakeling bestaat uit de weerstand R (serieschakeling: $R_{AS} = 8.3 \text{ k}\Omega + R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R = R_{AS} + R_1 = 18.3 \text{ k}\Omega$) en de capaciteit $C = 940 \mu\text{F}$ ($470 \mu\text{F} \parallel 470 \mu\text{F}$). De tijdconstante τ van deze RC -schakeling bedraagt $R \cdot C = 0,0183 \text{ M}\Omega \cdot 940 \mu\text{F} = 17.2 \text{ sek}$. De belasting van de RC -schakeling bestaat uit de belastingsweerstand R_L , verkregen door parallelschakeling van $R_2 = 47 \text{ k}\Omega$ en R_i van de voltmeter $= 30 \text{ k}\Omega$, hetgeen resulteert in een weerstand van $18.3 \text{ k}\Omega$.

De weerstanden R en R_L hebben beide een waarde van $18.3 \text{ k}\Omega$. De spanningen U_R en $U_L = U_C$ moeten na het opladen van C dan ook even hoog zijn. Voor $U = 6 \text{ V}$ is $U_R = U_C = 3 \text{ V}$.

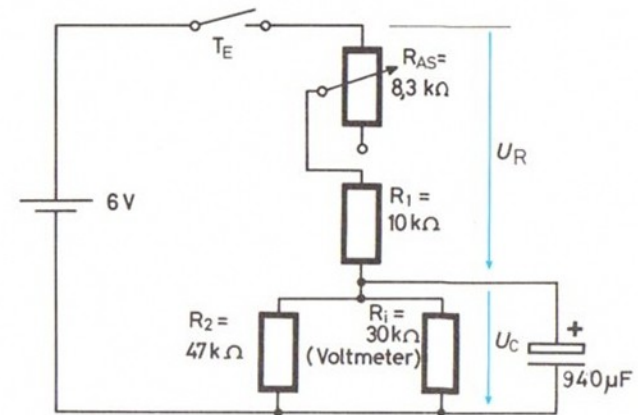
Het in de schakeling opnemen van de voltmeter als belastingsweerstand heeft het voordeel dat we de waarde van U_C direct kunnen aflezen. De meetapparatuur heeft nu geen invloed op de meting.

We zetten op de schakeling de batterijspanning U_{Bat} en wachten tot C is opgeladen. Daarna stellen we met de potmeter de waarde van R_{AS} zo in, dat de voltmeter precies een $1/2 U$ aanwijst; dan is $R = R_L$. We ontladen nu de condensator door er een 33Ω -weerstand op aan te sluiten.

Theoretisch zou de spanning op de condensator na 1 tijdconstante $\tau = 17.2 \text{ sek}$. op 63% van $3 \text{ V} = 1.9 \text{ V}$ moeten zijn gekomen. Meet de tijd tussen het indrukken van T_E en het moment waarop $U_C 1.9 \text{ V}$ is geworden (vanaf 0 V). Doe deze meting drie keer en bepaal het gemiddelde.

Meet daarna de tijd die U_C nodig heeft om van 0 V tot 3 V te stijgen. Tenslotte meten we nog de tijd om na het loslaten van T_E van 3 V op 37% van $3 \text{ V} = 1.1 \text{ V}$ te komen. Vergelijk deze tijd met de berekende tijdconstante $\tau = 17.2 \text{ sekonden}$.

12.44



Resultaat

Het opladen gaat sneller dan op grond van de vooraf berekende tijdconstante mocht worden verwacht. De ontlading over $R_L = R_2 \parallel R_i$ verloopt echter precies met de snelheid bepaald door de tijdconstante.

Slotconklusie

Als we in een RC -schakeling de condensator belasten, dan wordt het laadproces verkort; dit komt omdat de maximaal bereikbare hoogte van U_C afhankelijk is van de delerverhouding $R : R_L$. Hoe kleiner de waarde van R_L , des te sterker wordt de activiteit van de condensator beperkt. (Dit is na te gaan door voor R_2 een waarde van $1 \text{ k}\Omega$ te nemen i.p.v. $47 \text{ k}\Omega$). De schakeling wordt een simpele spanningsdeler bestaande uit weerstanden. Stel dat C is opgeladen en we de verbindingen met de spanningsbron verbreken, dan gebeurt er het volgende. De condensator ontladend zich alleen via R_L , waarmee hij in serie ligt. R speelt in het geheel geen rol meer. Alleen de tijdconstante $\tau = R_L \cdot C$ bepaalt de snelheid van de ontlading.

12.7 RC-cascade

Als we parallel met de dwarschakel van een RC -schakeling een tweede RC -schakeling zetten, dan ontstaat er een RC -cascade, volgens fig. 12.45a. De figuren 12.45 (a) en 12.45 (b) geven dezelfde schakeling weer.

1. Proef

We zetten de schakeling op met $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ en $C_1 = C_2 = 470 \text{ }\mu\text{F}$. Als spanning nemen we bijv. 3 V, verkregen met 2 batterijtjes. Bepaal de tijdconstante van de schakeling volgens de bekende methode (3 x meten) door de voltmeter kortstondig aan te sluiten. Nog beter is het maar meteen de grafiek voor U_{C_2} /tijd te tekenen.

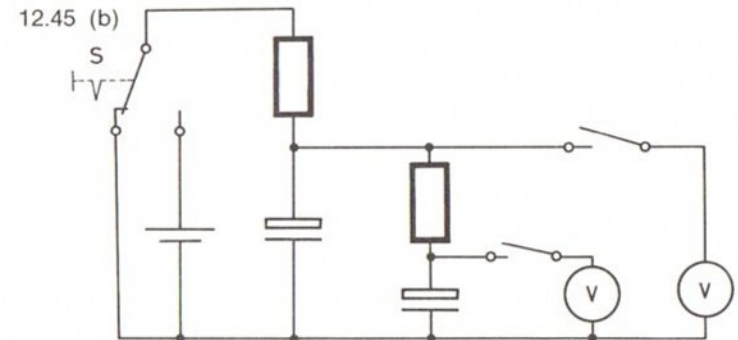
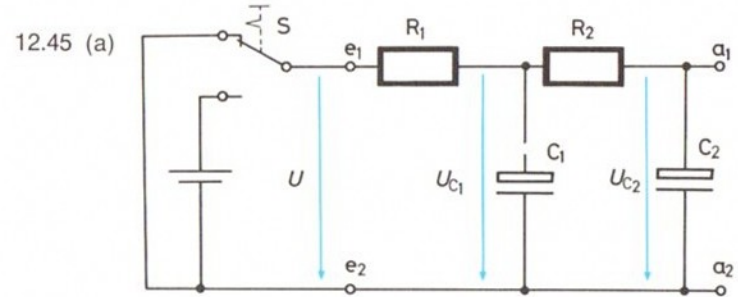
Resultaat

Het opladen van C_2 duurt in vergelijking met de eenvoudige RC -schakeling veel langer. De oorzaak ligt uiteraard in de cascade. Eerst moet C_1 tot een bepaalde hoogte zijn opgeladen alvorens er een merkbare laadstroom naar C_2 kan lopen. Kondensator C_2 laadt zich, zagezegd op volgens een e -functie van een e -functie. Een dergelijke schakeling dient b.v. om grote schakelvertragingen te verschaffen.

Als beide condensatoren zijn opgeladen, dan moet ook U_{C_2} even hoog zijn als U_{Bat} . Dat is alleen juist als de cascade niet wordt belast, b.v. door een voltmeter.

Wie in schakeling 12.45 (b) voor R_1 de voltmeter met $R_i = 30 \text{ k}\Omega$ in de plaats zet en voor R_2 de $47 \text{ k}\Omega$ -weerstand, krijgt een eierklok. Het duurt ± 3 minuten voordat U_C ongeveer even hoog is als U_{Bat} . Dit is te zien aan de wijzer van de voltmeter (welke hier overigens als stroomsterktemeter dienst doet), die dan weer op nul staat.

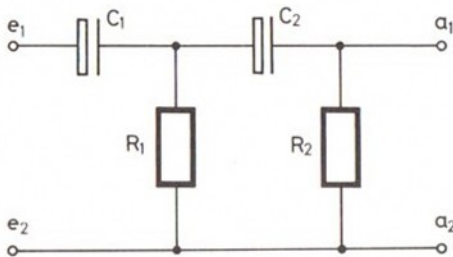
Wie het interessant vindt, kan de cascade met een derde schakel uitbreiden. Deze bestaat uit een $47 \text{ }\mu\text{F}$ -kondensator en de $4,7 \text{ k}\Omega$ -weerstand. De oplaadtijd is dan lang genoeg om een ei hard te koken.



2. Proef

In schakeling 12.45 (b) zijn de beide condensatoren even groot. Als we schakelaar S omzetten, dan ontladen de condensatoren zich. Welke zal nu het eerste leeg zijn?

Probeer hier achter te komen door steeds heel kort (even aantippen) de voltmeter op C_1 en C_2 aan te sluiten om de spanning te meten. Wat verandert er als de capaciteit van C_1 niet $470 \mu\text{F}$ is maar slechts $47 \mu\text{F}$? En wat gebeurt er als we C_2 een capaciteit geven van $47 \mu\text{F}$?



12.46

3. Proef

Onderzoek hoe de diverse spanningen in de cascadeschakeling 12.46 zich gedragen tijdens het laadproces. C en R zijn nu van plaats verwisseld. Let op: het ontladen mag niet gedaan worden als in schakeling 12.45; elke condensator moet uit de schakeling worden gehaald en apart kortgesloten. Als we het ontladen zouden doen volgens 12.45 dan wordt condensator C_2 opgeladen door C_1 maar met de verkeerde polariteit. En dat kan een elektrolytische condensator niet hebben. Alleen bij een spanning beneden de 3 V zouden we de ontlading volgens 12.45 mogen laten gebeuren.

Resultaat

Aan het einde van het laadproces is in schakeling 12.46 alleen de condensator C_1 opgeladen, de andere condensator is leeg.

12.8 Afvlakkondensator

In hoofdstuk 11 hebben we gezien hoe we met behulp van een diode van een wisselspanning (zij-aansluitingen van trafo mot 4) een gelijkspanning kunnen maken.

1. Proef

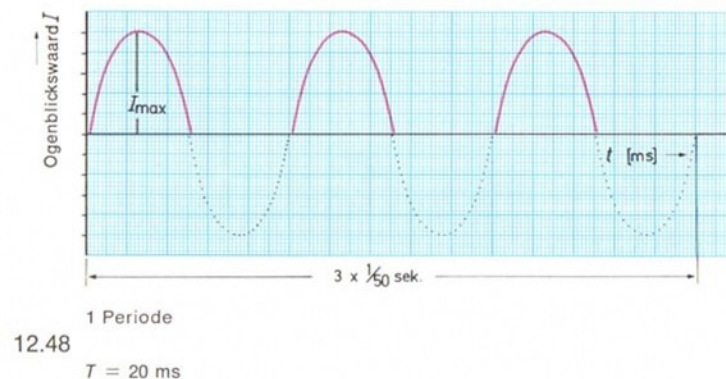
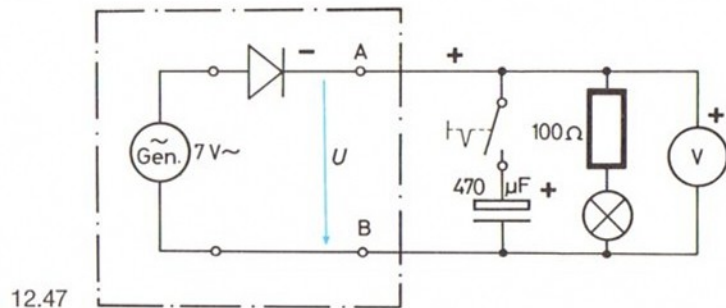
In schakeling 12.47 sluiten we een gloeilampje (ter beveiliging in serie met een $100\ \Omega$ -weerstand) aan op een dergelijke gelijkspanningsbron. We meten een spanning van ongeveer $3\ \text{V}$ zolang we de condensator niet aansluiten. Het lampje zal vrij zwak branden. Schakelen we de condensator in dan gaat het lampje veel feller branden en wijst de voltmeter ongeveer $8\ \text{V}$ aan. Hoe kan dat? De verklaring vindt u hieronder in kleine letters en hoewel normaal geldt dat die vluchtig gelezen mogen worden, deze keer niet. De verklaring is belangrijk voor het begrijpen van het volgende hoofdstuk en hobbylabor 2.

In fig. 12.48 zien we de grafische voorstelling van de stroom in een gelijkstroomkring met diode, maar zonder condensator. De stroomsterkte is uitgezet tegen de tijd. In dit stroom/tijd-diagram is precies als bij de RC -schakelingen op de horizontale as de tijd uitgezet; de maat verschilt enigszins: $1,3\ \text{cm} \triangleq 10$ milliseconden (ms) oftewel $1/100$ seconde. Het diagram laat zien hoe de stroomsterkte periodiek verandert in een tijdsbestek van $60\ \text{ms} = 3/50$ seconde. Vergelijken met voorgaande stroom/tijd- of spanning/tijd-diagrammen, zijn de tijdseenheden nu erg klein, maar dit verandert niets aan het principe. Nieuw in dit diagram is de steeds terugkerende, de periodieke, verandering.

In het voorbeeld zien we drie tijdperiodes getekend met drie cyclussen, dat zijn de curves. Een tijdperiode wordt gerekend vanaf het moment dat een curve van z'n nulpunt omhoog gaat, z'n top bereikt, weer nul wordt en dan vanuit nul weer omhoog gaat. In de figuur valt de eerste gestippelde curve onder de nullijn dus ook in de eerste tijdperiode, de tweede gestippelde curve valt in de tweede periode, de derde curve in de derde periode. In plaats van periode spreken we ook van trillingstijd. In formules gebruiken we als symbool voor één periode de letter T . Een volgend begrip waar we mee werken is de frekwentie f , dat is het aantal perioden of trillingen per seconde. In formule:

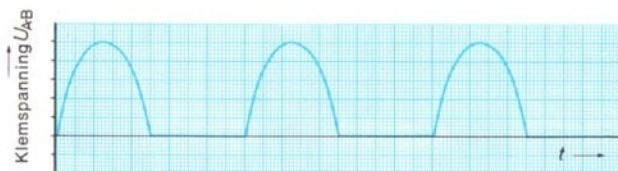
$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{in Hz} = \text{herz})$$

Uit fig. 12.48 blijkt dat in de stroomkring met de diode slechts voor de helft van de tijd (steeds voor een halve periode) een stroom loopt, waarvan de stroomsterkte bovendien geen moment hetzelfde blijft. Deze schommelt tussen nul en de max. waarde I_{max} . Zonder de diode in de schakeling zou de stroom in de tweede helft van de periodes steeds de andere kant op hebben gelopen, hetgeen met de gestippelde curves is aangegeven.

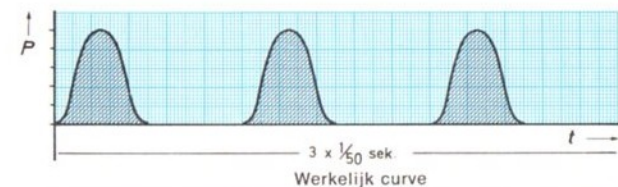


In fig. 12.49 worden het bijbehorende spanning/tijd- en het vermogen/tijddiagram gegeven, waarbij opgemerkt dat deze diagrammen alleen gelden wanneer we de in schema 12.48 getekende gloeilamp vervangen door een belastingsweerstand van konstante waarde. Zoals we weten verandert de weerstandswaarde van gloeilampen in relatie tot hun temperatuur.

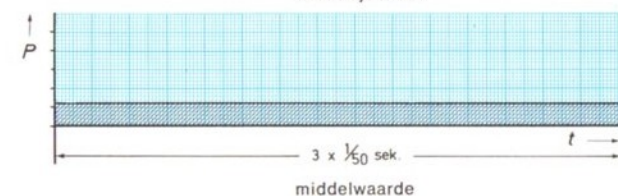
Na elke halve trilling of halve golflengte, komt er een pauze waarin er geen stroom loopt en er natuurlijk ook geen spanning staat op de punten A en B in fig. 12.47. Net zo min wordt er vermogen afgenomen of arbeid geleverd. De pauze is net zo lang als de tijd dat er wel stroom loopt. Interessant voor de berekening van het vermogen, dat b. v. door de aangesloten weerstand wordt omgezet in warmte en door de gloeilamp in licht, is de gemiddelde waarde van spanning en stroom.



12.49



12.50



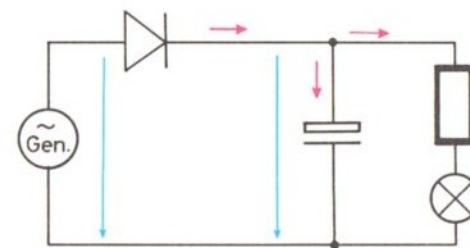
In fig. 12.49 is de gemiddelde waarde voor het vermogen gestippeld aangegeven. De som van de oppervlakken gevormd door de curves en de tijdas (de hoedjes zogezegd), moet gelijk zijn aan het oppervlak gevormd door de rechte lijn voor de gemiddelde waarde en de tijdas. In fig. 12.50 zien we beide oppervlakken gescheiden getekend. De beide gearceerde oppervlakken zijn aan elkaar gelijk.

Wat voor gevolgen heeft nu het opnemen van de 470 μF -condensator in schakeling 12.51?

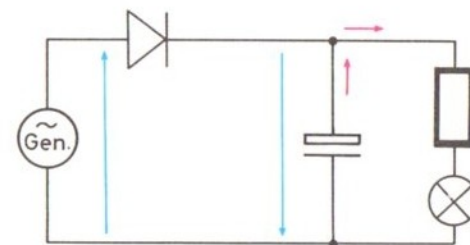
Op het moment dat er stroom door de diode kan (12.51 a), levert de bron behalve energie voor de lamp ook nog de energie om de condensator op te laden, Exact gezegd: zolang de spanning op de condensator lager is dan de spanning U loopt er door de gelijkrichter-diode een stroom naar de lamp en een laadstroom naar de condensator.

Nu draait de wisselspanning om, de (+) wordt een (-) en omgekeerd en er kan geen stroom door de diode lopen (fig. 12.51 b). Op dat moment zal de opgeladen condensator zich ontladen via weerstand en lamp en aan deze zijn energie afgeven. De condensator vult de gaten op tijdens de leverpauzes van de spanningsbron. De condensator in deze schakeling toegepast, wordt afvlakcondensator genoemd. Hij vult als het ware het golfkarakter af en vult de leemtes op.

12.51 (a)

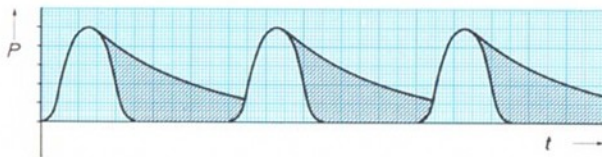


12.51 (b)

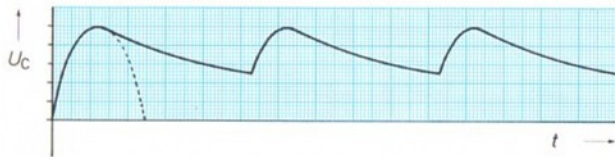


In het vermogen/tijddiagram voor de lamp (fig. 12.52) is dit extra vermogen dat de condensator aan de lamp levert, gearceerd getekend. De gemiddelde waarde van het totaal aan de lamp afgegeven vermogen wordt dank zij de condensator groter, zoals we aan het felle branden van de lamp hebben gezien.

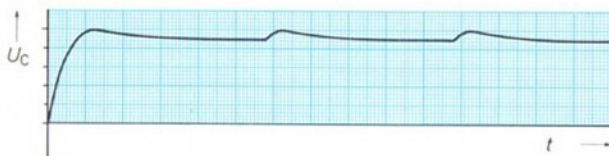
We interesseren ons echter meer voor het verloop van de spanning in de tijd – en niet alleen op meettechnische gronden. De spanningscurve (fig. 12.53) lijkt veel op die van de vermogenscurve. Als de condensator maar „groot genoeg“ is, dan daalt de spanning tussen de toppen nauwelijks, zoals in fig. 12.54 is weergegeven.



12.52



12.53



12.54

Nu moeten we nog een probleem oplossen: welke capaciteit moet de condensator hebben opdat hij zoals we heel simpel zeggen – groot genoeg is om de klappen op te vangen.

Het antwoord moet luiden: dat hangt van het doel af waarvoor de schakeling wordt gebruikt. Duidelijk is dat het om de tijdconstante van de condensator C gaat en de belastingsweerstand R_4 , wanneer de afstand in tijd tussen twee spanningstoppen is gegeven (de trillingstijd). Stel, dat de spanning U_C in de tijd tussen twee toppen tot 37% van de hoogste spanning mag dalen. In dat geval kan τ (de tijdconstante) iets kleiner zijn dan de trillingstijd. In ons geval met een netfrequentie van 50 Hz en een diode bedraagt de periode of trillingstijd T tussen twee toppen $1/50$ sek = 20 ms. Mag de spanning in die tijd slechts enkele procenten dalen, dan moet de condensator een veel hogere tijdconstante hebben! Inderdaad hoger, want het moet langer duren voor de condensator tot op 37% van z'n max. bereikbare spanning is ontladen. Het doelmatigst is het een grotere capaciteit C te nemen. De condensator in de ft-gelijkrichter bouwsteen* van hobby 4 heeft daarom een capaciteit van 2200 μF !

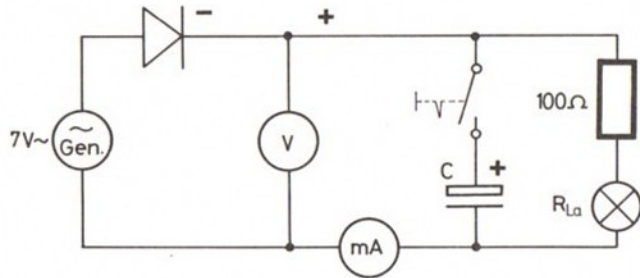
Het zal nu ook duidelijk zijn waarom we in de proeven steeds batterijen als bron hebben gebruikt en niet de ft-trafo. De condensator in de schakelingen zou de gelijkgerichte spanning soms wel, soms niet hebben verhoogd, zodat de meter steeds andere waarden zou hebben aangewezen.

Overigens: de in fig. 12.54 nog overgebleven spanningschommeling heet ook wel restgolf van een gelijkspanning. Het is de netfrequentie die het karakter van de restgolf bepaalt. (De frequentie is een maat voor de snelheid waarmee de perioden elkaar opvolgen).

In hoofdstuk 14 wordt besproken hoe die restgolf hoorbaar is te maken in de vorm van een bromtoon. De restgolf noemt men ook wel bromspanning of netbrom. In de meeste gevallen is hij hinderlijk en moet hij er uit. In de gelijkrichter bouwsteen gebeurt dat ook.

Terug naar de praktijk.

* de gelijkrichter bouwsteen is ook apart verkrijgbaar in de speelgoedwinkel.



12.55

2. Proef

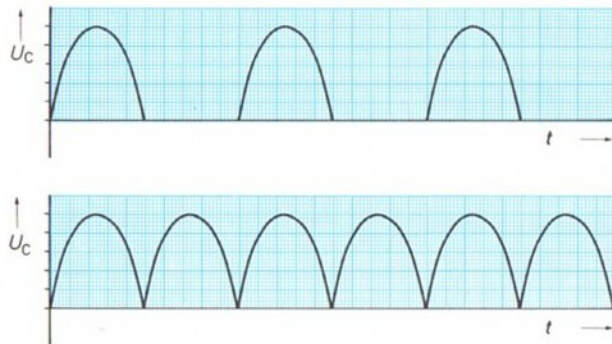
Meet de stroomsterkte en de spanning in schakeling 12.55. Met en zonder ingeschakelde condensator. Als afvlakcondensator gebruiken we resp. 47 – 470 – 940 μF . Met welke capaciteit is het resultaat het grootst?

Ontwerp een tabel om de verschillende gemeten waarden in te noteren.

Is in deze schakeling een 470 μF -condensator voldoende voor normale doeleinden?

Het antwoord luidt bevestigend wanneer het inschakelen van de tweede 470 μF -condensator niets meer toevoegt aan de helderheid van de lamp, de spanning en de stroomsterkte.

Hebben we genoeg aan de 47 μF -condensator als de belasting alleen bestaat uit de voltmeter ($R_i = 30 \text{ k}\Omega$)?



12.56

3. Proef

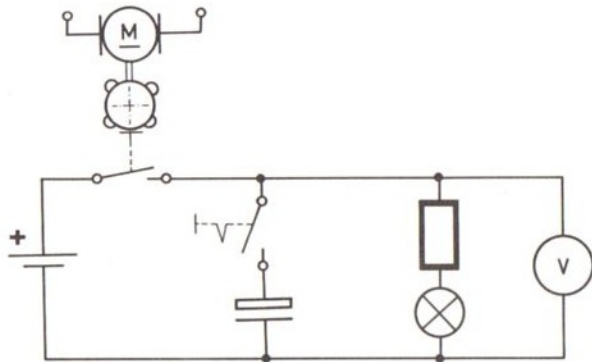
Herhaal nu de afvlakproeven met de gelijkspanningsbussen van de trafo. U kunt dan vaststellen dat de lamp bij het gebruik van een 470 μF -condensator bijna even helder brandt als bij het aansluiten op de bussen A-B in fig. 12.47. Het betekent dat de topspanning in beide gevallen ongeveer hoog is. Wanneer u de spanning zonder condensator meet, zal blijken dat deze bijna twee keer zo hoog is als in de proef van 12.47.

De verklaring hiervoor is dat de gelijkspanning van de trafo niet met behulp van een enkele diode wordt verkregen maar met 4 dioden. Deze zorgen er voor dat de pauzes, de ruimtes tussen twee halve golven worden opgevuld. In fig. 12.56 zien we onder elkaar de gelijkrichter met één diode (eenfasige gelijkrichter) en met 4 dioden (tweefasen gelijkrichter). Met hobbylabor 2 kunt u deze schakeling zelf bouwen.

Gebruiken we een batterij als spanningsbron, dan zijn condensatoren natuurlijk overbodig, want een batterij levert een ideale gelijkspanning.

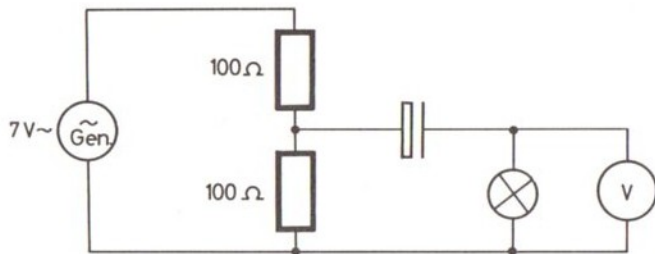
4. Proef

Wie een ft-motor en nokkenschijven heeft, kan een „motor-drukknop“ (pulsgever) bouwen. Wie alleen een ft-drukknop heeft, schakelt met de hand een lamp aan en uit (fig. 12.57). Als we snel schakelen (minstens 3 x per seconde) zal de voltmeter bij benadering een gemiddelde waarde aanwijzen.



12.57

Door afvlakcondensatoren in te schakelen kunnen we zoals is gedaan voor de gelijkgerichte 50 hz stroom – de stroomonderbreking praktisch opheffen of elimineren.



12.58

12.9 De condensator als weerstand in een wisselstroomkring

Zoals we hebben gezien werkt een condensator in een gelijkstroomkring eerst als een kortsluitbrug. Dat is aan het begin van het laadproces. Maar als de condensator is opgeladen, dan werkt hij als een oneindig grote weerstand. Een dergelijk gedrag is al merkwaardig genoeg. Even wonderlijk is het dat een condensator wisselstroom doorlaat. Een film- of draadweerstand daarentegen, kortom alles wat we tot nu toe een weerstand hebben genoemd (behalve de magneetspoel), gedraagt zich in een wisselstroomkring precies zo als in een gelijkstroomkring. Om dit verschil tot uitdrukking te brengen heten alle weerstanden die voldoen aan de Wet van Ohm: $U = I \cdot R$, Ohmse weerstanden. Van een condensator zeggen we daarentegen dat hij een capacitieve weerstand heeft in een wisselstroomkring. We zullen niet verder op dit onderwerp ingaan, maar met twee proeven aantonen dat de condensator wisselstroom doorlaat. We hebben daarvoor een ft-trafo mot. 4 nodig.

1. Proef

Bouw de schakeling van 12.58. Op de normale elektrolytische condensatoren mogen we bij permanent gebruik alleen een wisselspanning aanleggen die behoorlijk lager is dan de toelaatbare gelijkspanning. We moeten daarom werken met een spanningsdeler van 2 maal 100 Ω. Op de polariteit van de condensator hoeven we nu niet te letten omdat er een wisselspanning op komt te staan.

Resultaat

Het lampje brandt zwakjes, hoewel de voltmeter niets aanwijst. De condensator moet dus op de een of andere wijze stroom doorlaten. We mogen ook zeggen dat 47 μF-condensator en lamp een spanningsdeler vormen.

2. Proef

We vervangen de $47\ \mu\text{F}$ -kondensator door een $470\ \mu\text{F}$ -kondensator, het lampje brandt nu iets helderder.

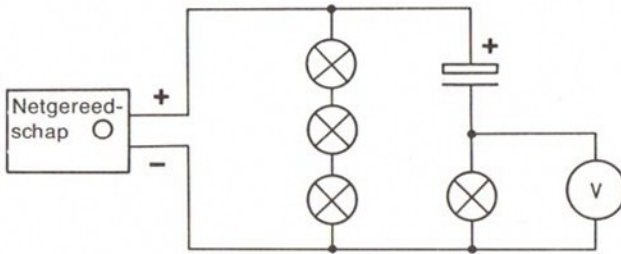
Slotkonklusie

Er blijkt uit dat de capacatieve weerstand van de $47\ \mu\text{F}$ -kondensator groter is dan die van de $470\ \mu\text{F}$ -kondensator. Overbruggen we deze laatste met een kabeltje, dan verandert de helderheid van het lampje niet. We mogen daaruit konkluderen dat de capacatieve weerstand van de $470\ \mu\text{F}$ -weerstand aanzienlijk kleiner is dan de weerstand van de lamp.

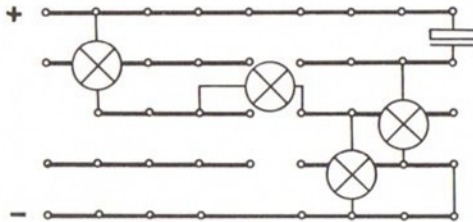
Wie al iets van de wisselstroomtheorie weet, kan met de volgende formule de capacatieve weerstand berekenen:

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \ (\Omega)$$

Voor f moeten we de frequentie in herz nemen, de capaciteit in farad; π is 3,14. De $470\ \mu\text{F}$ -kondensator is $0,00047\ \text{F}$. Voor een frequentie van $50\ \text{Hz}$, is de weerstand voor wisselstroom dan ongeveer $7\ \Omega$.



12.59



12.60

3. Proef

Bouw schakeling 12.59 volgens stekkerschema 12.60. We sluiten de schakeling aan op de gelijkspanningsbussen van de trafo.

Resultaat

Merkwaardig genoeg blijkt ook het lampje achter de kondensator te branden. Tenzij het tovenarij is, zal de trafo naast de gelijkstroom ook nog een wisselstroom moeten leveren. Door de helderheid van de lampen te vergelijken, kunnen we een schatting maken: de wisselspanning op de lamp zal misschien een kwart zijn van de gelijkspanning die de trafo levert.

4. Proef

We gaan nu onderzoeken of ook bij een éénfase gelijkrichter een wisselstroom optreedt zoals dat het geval is bij een tweefasen gelijkrichter. De éénfase gelijkrichter bouwen we volgens 12.61 en stekerschema 12.62.

Resultaat

Het lampje achter de condensator, waar alleen een wisselstroom doorheen loopt, brandt nu zelfs iets helderder dan de drie andere lampjes! Daaruit blijkt dat bij een éénfase gelijkrichter het aandeel van de wisselspanning (en daarmee van de wisselstroom) hoger is dan bij de tweefasen gelijkrichter. We kunnen de wisselspanning op grond van de helderheid der lampen op meer dan 30% schatten.

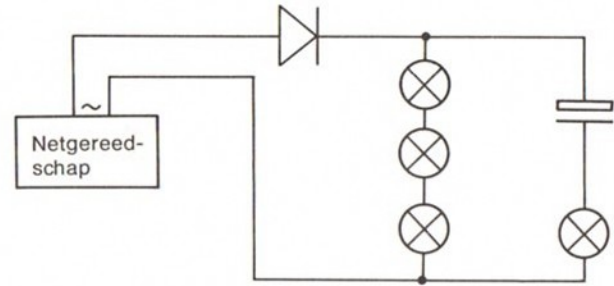
Slotconklusie

De condensator C_1 werkt in deze schakeling en in die van 12.59 als een stroomwissel. Voor de gelijkstroom is hij een zeer hoge weerstand, zodat de stroom liever door de linker tak gaat. De wisselstroom zal liever door de rechtertak gaan omdat de condensator praktisch geen weerstand biedt en het lampje maar $\frac{1}{3}$ van de weerstand heeft die de drie in serie geschakelde lampen bieden.

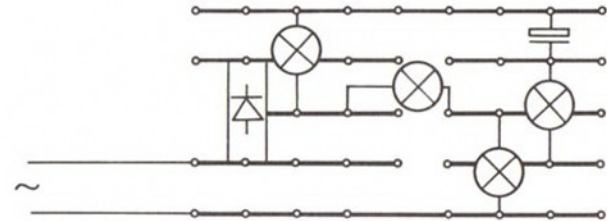
We zien nu ook hoe we de brom eruit moeten krijgen. We leggen de tweede 470 μF -condensator parallel met de energiebron en de brom verdwijnt. In een éénfase gelijkrichter moet de condensator natuurlijk achter de diode parallel worden geschakeld.

We kunnen de gelijkgerichte, maar nog niet afgevlakte wisselstroom ook als een soort mengsel van gelijk- en wisselstroom opvatten. De gelijkgerichte stroom heeft dan nog een stukje wisselstroom (de bromstroom) in zich. Bij tweefasen gelijkrichting is dat kleiner dan bij éénfase gelijkrichting. Dat de „brom“ een echte wisselspanning is, blijkt ook uit het feit dat de voltmeter niets aanwijst, hoewel de lamp brandt.

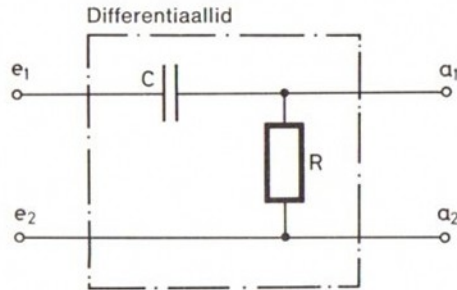
12.61



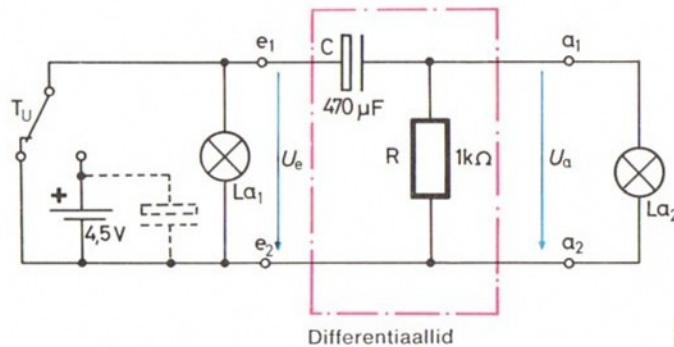
12.62



12.10 De differentiator



12.63



12.64

De vierpoolschakeling als in fig. 12.63 is bekend. Het is een RC -schakeling met de ingangen $e_1 - e_2$ en de uitgangen a_1 en a_2 . We gaan nu een bepaalde eigenschap van deze vierpool onderzoeken; we gaan hem toepassen als verschiltschakeling: de differentiator.

Het begrip differentiëren is uit de hogere wiskunde overgenomen van de differentieelrekening. Heel algemeen betekent differentiëren: in kleine stukjes verdelen, onderscheiden.

1. Proef

Bouw schakeling 12.64. In plaats van de 4,5 V batterij mogen we nu ook de trafo gebruiken, waarbij dan wel een afvlakcondensator van $470 \mu\text{F}$ moet worden geschakeld. We werken met de laagst instelbare spanning, dat spaart de lampen. Met T_U is naar keuze de spanningsbron in te schakelen of zijn de ingangen kort te sluiten. Het lampje La_1 geeft de stand van schakelaar T_U aan. Om de kring te sluiten is op de uitgangen het lampje La_2 gezet.

Wat doen La_1 en La_2 bij het bedienen van T_U en wat gebeurt er als we de $1 \text{ k}\Omega$ -weerstand uit de schakeling halen?

Resultaat

Zolang knop T_U wordt ingedrukt, brandt La_1 . Lamp La_2 licht heel even op bij het indrukken en eveneens bij het loslaten. In deze schakeling kan de $1 \text{ k}\Omega$ -weerstand worden verwijderd omdat alleen de lamp (weerstand 100Ω) bepaalt wat er in de stroomkring gebeurt. De $1 \text{ k}\Omega$ -weerstand heeft daarop nauwelijks enige invloed (zie hoofdstuk 9.2).

Waarom het lampje La₂ alleen even brandt bij het in- en uit-schakelen, zal u duidelijk zijn op grond van de voorgaande proeven met RC-schakelingen. Eveneens is het zo dat een vergroting van C of R de tijdsduur van het opladen en ontladen beïnvloedt. We vervangen nu de 470 μF-kondensator door één met een capaciteit van 47 μF. Test eveneens de parallelschakeling van de beide 470 μF-kondensatoren. Verandert daardoor de helderheid van lamp La₁? En het oplichten van La₂?

Het differentiëren bestaat hierin dat een verandering aan de ingang van de schakeling op de uitgang een kort signaal, een impuls bewerkstelligt. Afgezien van het signaal op lamp La₁, kunnen we aan de stroomrichting en de polariteit van de uitgangsspanning zien of aan de ingang in- of uitgeschakeld wordt. Op deze manier hebben we uit een permanent of konstant signaal (b.v. ingeschakeld) een impuls verkregen.

Waarvoor is een dergelijke differentiator te gebruiken? Wel, overal waar het niet om de schakelstand zelf gaat maar om het signaleren van een verandering in een bestaande toestand. Het maakt daarbij niets uit of de impuls aan de uitgang van de differentiator alleen een lampje doet oplichten of dat de impuls in een volgende schakeling wordt verwerkt.

De waarde van de condensator en de weerstand in de RC-schakeling bepalen de vorm van de impuls die op de uitgang van de differentiator ontstaat. (In elk geval moet met de waarde van de weerstand die op de uitgangen is aangesloten, rekening worden gehouden bij de bepaling van de weerstand van de RC-schakeling.

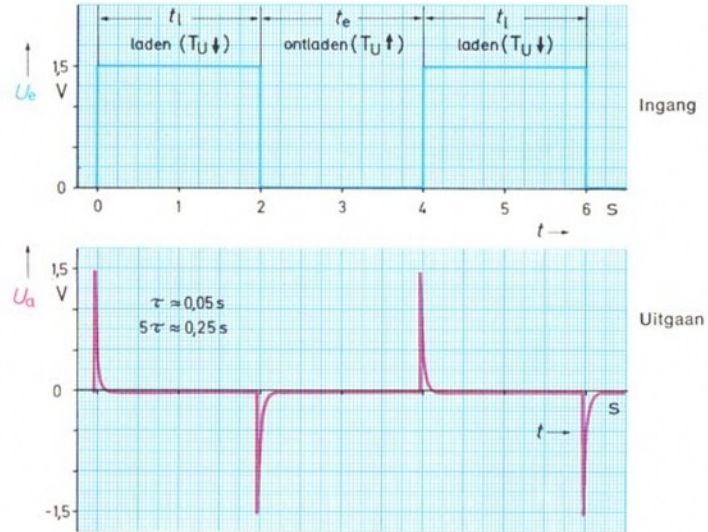
Als de tijdconstante van deze schakeling klein is, dan is de impuls kort; is de tijdconstante daarentegen lang, dan zal ook de impuls langzaam afzwakken. Neem het lampje La₂ uit de schakeling 12.64 en zet de voltmeter (30 kΩ) op de uitgangen. Laat de weerstand R achtereenvolgens zijn 1 kΩ, 10 kΩ en de 30 kΩ van de voltmeter alleen. Aan de spanningsveranderingen kunnen we dan zien dat de impulsen verschillend zijn.

Als we T_v te vroeg loslaten wordt bij een grote tijdconstante de uitgangsimpuls verkort. Is de tijdconstante daarentegen klein genoeg, dan lukt dat niet. In dat geval zijn de impulsen korter dan de tijd tussen het twee keer indrukken van de knop.

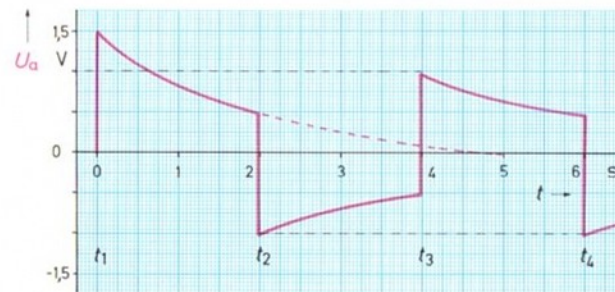
In fig. 12.65 zien we onder elkaar de grafieken van de bediening van T_v en het resultaat op de uitgang van een differentiator met een zeer kleine tijdconstante τ.

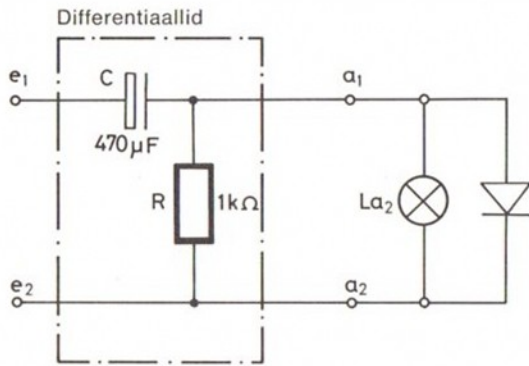
In fig. 12.66 zien we het resultaat van een schakeling met een grote tijdconstante.

12.65



12.66

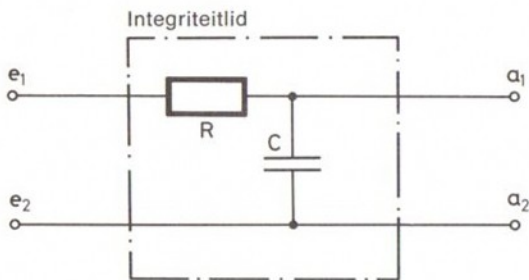




12.67

2. Proef

Schakel nu in de schakeling 12.64 parallel met lamp La_2 , een diode. Al naar de poolaansluitingen zal nu alleen het indrukken of het loslaten een impuls op de uitgang geven. Schakel de diode om te beginnen zo, dat alleen het indrukken van T_u (batterij inschakelen) een impuls op de uitgang geeft. Voldoet schakeling 12.67 aan deze eis?



12.68

12.11 De integrator

Als we in een differentiator R en C van plaats verwisselen, krijgen we een integrator. In een dergelijke RC -schakeling ligt de weerstand voor de condensator die dwars tussen beide uitgangen in de schakeling staat (zie fig. 12.68).

De uitgangsspanning U_o wordt van de condensator afgenomen. U_o is in de integrator gelijk aan U_c .

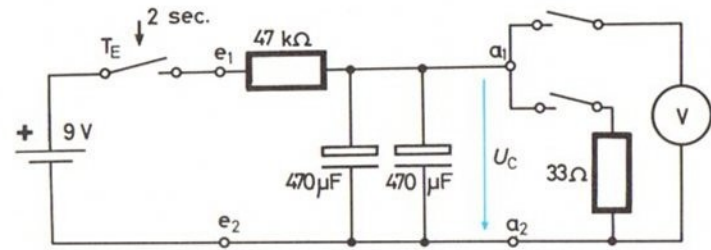
Het begrip integrator komt van integraalrekening, eveneens een onderdeel van de hogere wiskunde. In het algemeen betekent integreren zoveel als samenvoegen tot een geheel, tot één systeem maken.

Het spanningsverloop van een condensator en hoe zijn spanning wordt opgebouwd, hebben we al uitvoerig besproken. We willen nu eens kijken wat er op uitgang a_1 – a_2 van de integrator gebeurt als we achter elkaar een aantal korte impulsen geven op de ingang e_1 – e_2 . De pulsen verkrijgen we b.v. door het snel in-, en uitschakelen van een batterij.

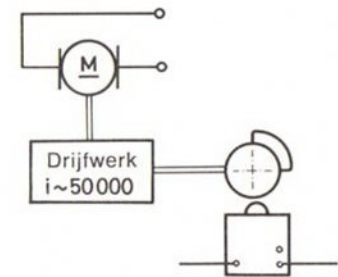
12.11.1 De onbelaste integrator

Eerst nemen we het geval dat op de uitgang van een dergelijke RC-schakeling geen verbruiker (of één met een buitengewoon hoge weerstand) staat geschakeld. We mogen daarom in de volgende proef het meetapparaat met z'n betrekkelijk lage inwendige weerstand van $30\text{ k}\Omega$ niet op de uitgangen laten staan. De condensator zou dan elke keer als de batterij werd uitgeschakeld (dus steeds tussen twee impulsen in) via de voltmeter een weinig ontladen en daarmee het resultaat vervalsen.

Bovendien zou $U_c = U_a$ slechts een deel van U_{cmax} bereiken omdat R en R_i in deze schakeling een spanningsdeler zouden vormen. We willen nu nagaan wat er met de spanning U_a gebeurt als we op de ingang verschillende soorten impulsen geven.



12.69



12.70

1. Proef (ijken van de integrator)

We bouwen de schakeling volgens fig. 12.69. Meet eerst op de normale manier hoe hoog de spanning op de uitgang maximaal kan worden. Nadat de condensator over een $33\ \Omega$ -weerstand is ontladen, start de eigenlijke proef. Elke keer drukken we b.v. T_E 2 seconden lang in.

Met behulp van onderdelen uit ft-dozen kunnen we het indrukken automatisch doen volgens fig. 12.70. In beide gevallen – met de hand of mechanisch – is het belangrijk dat het ingedrukt houden precies 2 seconden duurt. Waar het om gaat is dat de impulsen even lang duren.

Meet steeds na elke twee impulsen heel kort de spanning op de condensator en noteer de gevonden waarden in de tabel 12.71. Geef net zolang impulsen tot de spanning U_c ongeveer de helft is van de vooraf verkregen en gemeten maximale spanning U_{cmax} .

12.71

$$U_{cmax} = \dots V$$

aantal impulsen	2	4	6	8	10
U_c in V					
aantal impulsen	12	14	16	18	20
U_c in V					
aantal impulsen	22	24	26	28	30
U_c in V					

Zet in fig. 12.72 de spanning U_C in afhankelijkheid van het aantal impulsen (van elk 2 sekonden). Dit diagram dient als standaard voor onze volgende proef.

2. Proef

We sluiten beide condensatoren kort over de 33Ω -weerstand om de schakeling in de beginstand te krijgen.

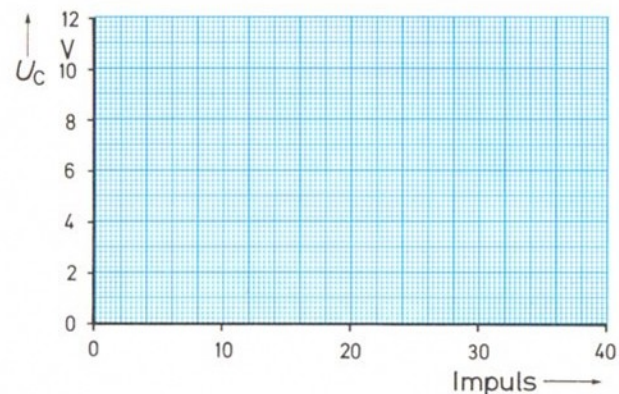
We draaien de zaken nu om en geven een willekeurig aantal impulsen (van elk 2 sek) op de ingang van de integrator. Het aantal impulsen mag echter niet hoger zijn dan het totaal van de vorige proef. Hoe lang de pauzes tussen de impulsen zijn, is niet belangrijk. Daar we echter geen speciaal voor dit doel gebouwde condensatoren hebben, is het verstandig de proef niet te lang te laten duren. De elektrolytische condensatoren vertonen namelijk een verschijnsel dat zelfontlading (lek) heet.

Let er op dat de duur van de impulsen even lang is als bij het bepalen van het standaarddiagram 12.72 (in ons geval 2 sekonden). Nadat alle impulsen zijn gegeven, meten we de spanning. Met de ijkcurve kunnen we nu voor deze spanning in het diagram het aantal pulsen aflezen dat we hebben gegeven.

De meetfout, t. w. het verschil tussen het aantal uit het diagram en het werkelijk gegeven aantal pulsen, mag niet meer dan 10% zijn. Vooropgesteld dat de pulsen bij de ijking en deze laatste proef even lang duurden.

We sluiten de condensatoren kort over de 33Ω -weerstand. We zetten daarmee de schakeling weer in de beginstand. Herhaal de proef met andere aantallen impulsen.

12.72



3. Proef

Na de schakeling weer in de beginstand te hebben gezet, geven we nu impulsen die twee keer zo lang duren en daarna half zo lang (1 sek.). Ook dan kunnen we uit het diagram het aantal aflezen. Het aantal dat het diagram verschaft moeten we door 2 delen als de pulsen 4 sek. duren en met 2 vermenigvuldigen als ze 1 sek. duren.

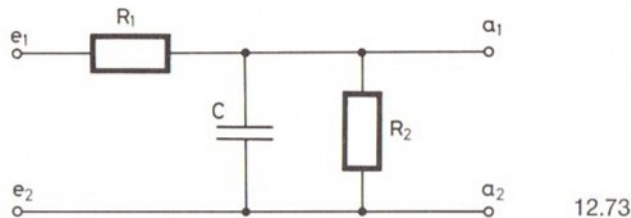
Herhaal de proeven met langere en kortere pulsen, waarbij ze per proef eenzelfde en bekende tijdsduur hebben. Na de omrekening kunnen we uit het diagram steeds bij benadering het aantal gegeven impulsen aflezen.

12.11.2 De belaste integrator

De tot nu toe behandelde schakelingen hebben het nadeel dat de condensator na een zeker aantal impulsen opgeladen, zeg maar, vol is. De pulsen die daarna volgen hebben geen invloed meer op de uitgangen. Om redenen van de vereiste nauwkeurigheid is het verstandig met tellen op te houden wanneer U_c de helft is geworden van de bronspanning. Waarom dat is, blijkt onmiddellijk als we diagram 12.25 nog even opslaan: alleen in het eerste stuk stijgt de spanning zo'n beetje evenredig met de tijd.

Proef

In schakeling 12.73 zal de condensator C tijdens elke pauze tussen twee impulsen op de ingang, via weerstand R_2 iets van zijn lading kwijt kunnen raken.



Als de ontlading langzamer gaat dan het opladen door de impulsen dan kunnen we nu veel meer pulsen tellen dan met de vorige schakeling. Een nadeel: duurt de pauze tussen twee pulsen te lang, dan is de condensator weer geheel ontladen.

De integrator heeft in dat geval zijn „geheugen“ verloren en begint bij de volgende puls bij nul te tellen. Dergelijke telschakelingen zijn dan ook alleen geschikt voor toepassingen waarbij de impulsen elkaar regelmatig opvolgen en met de juiste tijdkonstante. Ze worden b.v. gebruikt voor het meten van toerentallen.

12.12 De opbouw van condensatoren

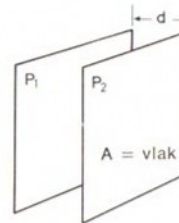
12.12.1 Kapaciteit als eigenschap van het onderdeel

Tot nu toe hebben we de capaciteit C van een condensator beschouwd als een vaststaande elektrische grootte, los van de aard van de condensator. Aan het slot van dit hoofdstuk iets over het verband tussen capaciteit, afmetingen en eigenschappen van het materiaal.

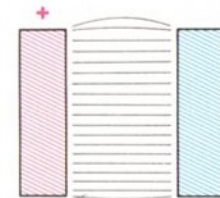
Uitgedrukt in een formule ziet dat verband er zo uit:

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

De grootte ϵ (de Griekse letter epsilon) komt hierna aan de orde. In fig. 12.74 is in beeld gebracht wat de letters A en d betekenen.



12.74



12.75

elektrisch veld

Dat de capaciteit evenredig is met het oppervlak van de platen hebben we al kunnen zien. De $470 \mu\text{F}$ -condensator is veel groter dan de $47 \mu\text{F}$ -condensator. Nieuw is dat ook de afstand „ d “ tussen de platen een rol speelt.

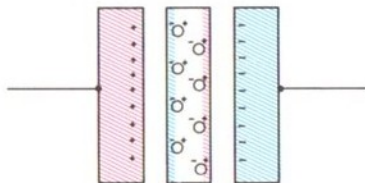
De capaciteit blijkt groter te zijn naarmate de platen dichter bij elkaar staan, naarmate d kleiner is. De verklaring is, dat tussen de platen van een opgeladen condensator krachten werken, veroorzaakt door de aantrekking van ongelijknamige elektrische ladingen.

In fig. 12.75 zijn deze aantrekkingskrachten weergegeven met zogeheten krachtlijnen. Men spreekt van een elektrisch veld dat zich tussen de platen van een opgeladen condensator vormt of opbouwt. Hoe kleiner de afstand d , hoe sterker de werking van het veld en hoe meer elektronen op de negatieve plaat een plaatsje kunnen veroveren. Conclusie: hoe kleiner de afstand tussen de platen, hoe groter de capaciteit van de condensator.

12.12.2 Het diëlektricum

Rest nog de grootheid ϵ , de diëlektrische konstante genaamd. Deze karakteriseert een hoogst merkwaardige eigenschap van bepaalde isolerende stoffen die tussen de platen worden gebracht om de capaciteit te verhogen. Een dergelijke stof heet diëlektricum, dat is een stof zonder enige merkbare elektrische geleiding.

Allereerst heeft het diëlektricum de taak de platen elektrisch te scheiden, zelfs als men de platen sterk samenperst. We hebben reeds gezien dat de capaciteit stijgt naarmate de afstand tussen de platen kleiner wordt. Er komt nog een ander effect bij. Als we een daartoe geschikt diëlektricum in het elektrisch veld zetten, dan reageren de moleculen van dat diëlektricum als in fig. 12.76 weergegeven. Ze draaien hun (-)pool naar de plusplaat en hun (+)pool naar de minplaat. De technicus zegt: elk moleculair gedraagt zich als een dipool, een ding met 2 polen.



12.76

Deze oriëntatie van de moleculen verschafft de condensator met een goed diëlektricum een groter opnamevermogen, een grotere capaciteit. De dipolen oefenen namelijk extra aantrekkende en afstotende krachten uit op de elektronen. We zullen nu niet nader op deze interessante fysische processen ingaan, alleen nog een opmerking: de diëlektrische konstante wordt voor de verschillende stoffen aangegeven in een verhoudingsgetal tot de diëlektrische konstante van lucht.

12.12.3 Diëlektrische sterkte

Minstens zo belangrijk als de capaciteit is de diëlektrische sterkte. Deze geeft aan welke spanning we maximaal op de condensator kunnen zetten, zonder deze te beschadigen.

Als er namelijk teveel elektronen op de negatieve plaat komen, zal de aantrekkingskracht zo groot worden dat de elektronen door het diëlektricum heen schieten, er ontstaat een vonk (een doorslag) waardoor platen en diëlektricum kunnen worden beschadigd. Het gaat gepaard met een knal die het einde van de condensator aankondigt.

De diëlektrische sterkte is voor de 470 μF -condensator met 16 V aangegeven en voor de 47 μF met 25 V. In hobbylabor werken we niet met spanningen van die hoogte, zodat we hier verder geen aandacht aan hoeven te besteden.

12.12.4 Typen van condensatoren

Er zijn verschillende typen condensatoren voor de meest uiteenlopende doeleinden en met heel verschillende formaten. Bijzonderheden zullen we u besparen en alleen een korte bespreking van de voornaamste typen geven.

Keramische condensatoren

Het diëlektricum bestaat uit een speciale keramische stof, die op beide zijden van de metalen drager (de condensatorplaat) wordt aangebracht. De capaciteit loopt van enige picofarads tot enkele nanofarads.

Rolkondensatoren

In fig. 12.77 zien we het principe. Door het oprollen zijn grote vlakken en een grote capaciteit in een klein volume te krijgen.



Het diëlektricum kan uit een zeer dunne folie bestaan, zodat de afstand tussen de platen buitengewoon klein wordt, hetgeen aan de vergroting van de capaciteit bijdraagt.

Tot deze groep behoren ook de condensatoren vervaardigd uit metaalfolie, gescheiden door papierstroken. De meeste condensatoren tussen 1 μF en enkele μF worden op deze wijze gemaakt.

Elektrolytische condensatoren

Een type condensator met vele varianten, maar de oude elektrolytische condensator met een vloeistof – de elektrolyt – wordt niet meer gemaakt.

Aluminium elektrolytische condensatoren

Deze condensatoren worden tegenwoordig gewikkeld of opgerold. De ene laag bestaat uit een zeer dunne aluminiumfolie. De andere uit een absorberend materiaal met de elektrolytische vloeistof.

En waar is nu het diëlektricum?

Dat is nu de truc van de elco. Als de (+)elektrode aan (+)potentiaal en de (-)elektrode aan (-)potentiaal wordt gelegd, dan ontstaat op de aluminiumfolie een vliesdunne, zeer stabiele oxydelaag die goede diëlektrische eigenschappen heeft. (Dit proces heet formeren en wordt door de fabrikant gedaan).

Dit is ook de reden waarom elco's een polariteit hebben en altijd op de juiste polen moeten worden aangesloten. Als we een elco verkeerd om aansluiten, dan wordt de oxydelaag afgebroken en gaat er een sterke kortsluitstroom lopen, die de condensator onherroepelijk defekt maakt. (In grote elco's kan ook gas worden gevormd, zodat de condensator ontploft).

Een foute aansluiting tot max. 3 V kan de elco wel verdragen, wat daarboven komt is uit den boze. De elco kan, dank zij het extreem dunne diëlektricum, een capaciteit hebben van duizenden μF , waarbij de omvang zeer klein blijft. Ze worden hoofdzakelijk toegepast als afvlakcondensatoren of in tijdschakelingen die een zeer grote tijdconstante nodig hebben.

Alle elco's hebben het nadeel dat de elektrolyten verouderen door uitdrogen en veranderingen in de samenstelling. De capaciteit van een elco kan dus met de tijd zodanig veranderen dat de schakeling niet meer op de juiste wijze funktioneert.

Van een nieuwe condensator mag de tolerantie, de afwijking van de aangegeven waarde, hoogstens + 30% en -10% zijn.

Een nadeel is ook dat de oxydelaag geen ideale isolator is, na het uitschakelen van de spanningsbron volgt zelfontlading. De condensator lekt. Elektronen kunnen door de oxydelaag heen op de andere plaat komen en zo het spanningsverschil kleiner maken. U kunt dit zelf als volgt nagaan. Laadt een elco op, meet de spanning en laat hem 1 tot 2 uur liggen, waarna u de spanning opnieuw meet.

Er zijn ook bipolaire elektrolytische condensatoren waarvoor de polariteit geen rol speelt. Ze worden alleen voor speciale doeleinden (flitsapparaten b. v.) gebruikt.

Tantalium elektrolytische condensatoren

Het laatste snuffje is tantalium als anode in plaats van aluminium. Het tantalium-pentoxyde, dat ontstaat door het aanleggen van een spanning, heeft een veel grotere diëlektrische constante dan het aluminiumoxyde. Elektrolytische condensatoren met tantalium hebben dan ook veel kleinere afmetingen bij dezelfde capaciteit.

Variabele condensator

Dit zijn condensatoren waarvan we met een knop de capaciteit kunnen veranderen. Het is een type condensator dat uitsluitend in de radiotechniek wordt gebruikt.

13 De spoel in de gelijkstroomkring

De meeste elektrische energie wordt verkregen door het omzetten van andere energievormen. Een belangrijke rol daarbij spelen de elektro-magnetische principes, zoals die in dynamo's worden toegepast. Het simpelste voorbeeld is de fietsdynamo, maar ook het principe van de elektromotor berust op de magnetische verschijnselen die bij een elektrische stroom optreden.

Nu heeft de „gelijkstroom“-elektronikus minder te maken met de magnetische werking van de elektrische stroom en omgekeerd de invloed van magnetisme op een elektrische stroom, dan de konstrukteur van elektrische machines, maar dat neemt niet weg dat in elk geval de principes van de wisselwerking tussen elektriciteit en magnetisme bekend moeten zijn.

Overigens, voor de „wisselstroom“-elektronikus behoren die wisselwerkingen tot zijn dagelijks brood.

13.1 Het magnetisch veld

13.1.1 Het magnetische veld van de aarde

In de doos ligt een eenvoudig kompas. De kompasnaald is van staal en kan in zijn zwaartepunt op een stalen punt draaien (fig. 13.1). De blauwe punt wijst – zoals bekend – naar het noorden, de andere kant naar het zuiden. De naald is gemaakt van een zeer goede kwaliteit staal en gemagnetiseerd door de fabrikant. Wat we daaronder verstaan komt nu aan de orde.

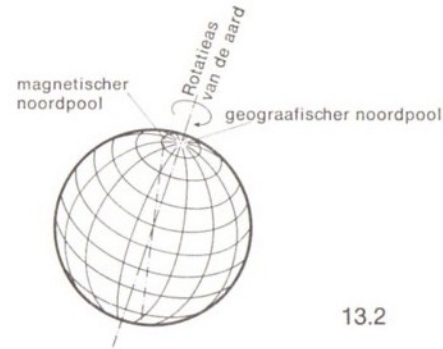
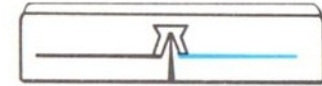
Proef

Stel het kompas op, ver verwijderd van de magneet uit de doos. Ook grotere ijzeren voorwerpen mogen niet in de nabijheid staan. De blauwe punt wijst naar de magnetische noordpool. Helaas is er een verschil in plaats tussen de geografische noordpool en de magnetische noordpool (fig. 13.2).

Als we het kompas neerleggen zal de naald eerst heen en weer schommelen en dan tot stilstand komen in de richting noord-zuid. Daarna draaien we de kompasroos met z'n schaalverdeling van 360° in de juiste stand. Zie fig. 13.3. Het verschil tussen geografische en magnetische noordpool bedraagt ongeveer 11° .

Het andere eind van de naald wijst nu naar de magnetische zuidpool van de aarde.

13.1



13.2



13.3



Verder is bekend dat een magnetische noordpool alleen niet bestaat, noch een magnetische zuidpool. De twee tegengestelde polen zijn er altijd tegelijk, zoals een gulden altijd twee kanten heeft. Er zijn dus altijd twee polen, ook al kunnen ze ver uit elkaar liggen zoals het geval is met het aardmagnetisme. Hetzelfde geldt voor de kompasnaald, bij de magnetisering zijn er een noord- en een zuidpool ontstaan.

Een magneet – of een systeem van magneten – heeft altijd een noord- en een zuidpool.

Het is een belangrijk punt dat niet vergeten mag worden. In de techniek wordt vaak de werking rond één pool onderzocht en besproken. Gemakkelijk kan dan de indruk ontstaan dat er geen andere pool bestaat. Maar er is altijd een of andere kunstgreep, een trucje, toegepast als we de werking van de andere pool mogen verwaarlozen.

13.1.2 De permanente magneet

Behalve het kompas bevat hobbylabor ook een staafvormige permanente magneet (fig. 13.4) – Qua principe is deze niet anders



13.4

dan de kompasnaald. Hij is wel veel sterker en trekt b.v. ijzeren spijkertjes tot op een afstand van enige centimeters naar zich toe.

1. Proef

Ga na welke onderdelen in hobbylabor door de magneet worden aangetrokken en welke niet. Onderzoek: lampen, weerstanden, potentiometer, pincet, ft-stekkers, condensatoren, spoel, ijzerkern, magneetanker enz. Noteer de resultaten in tabel 13.5.

Elektrische meetapparatuur in geen geval onderzoeken!

13.5

Materiaal	antrekken	niet antrekken
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		
.....		

2. Proef

We hangen de staafmagneet vrij draaibaar op; het ene eind wijst dan naar het noorden, het andere eind naar het zuiden. In feite hebben we nu een zeer simpel kompas, een en ander is weergegeven in fig. 13.6. Hoe we de ophanging ook draaien of keren, de staafmagneet gaat altijd in de richting noord-zuid staan.

Ook bij deze proef is er een belangrijke voorwaarde: in de nabijheid mogen zich geen andere magneten bevinden of grote ijzeren voorwerpen. Een staafmagneet trekt ijzeren voorwerpen naar zich toe, maar zal omgekeerd omdat hij vrij opgehangen is, naar ijzeren voorwerpen of magneten draaien.

We zouden kunnen zeggen dat het aardmagnetisme overvleugeld, verdrongen wordt door andere invloeden van buitenaf. Een en ander is gemakkelijk na te gaan. Breng de ijzerkern van de spoel in de nabijheid van de staafmagneet. (Wanneer de draad waaraan de magneet hangt te kort of te stijf is, dan zal ook de torsiekracht die ontstaat door de draaiing, een rol gaan spelen). We gaan nu met het oog op volgende proeven de noordpool – het einde dat naar het noorden wijst – van de staafmagneet een kenmerk geven, b.v. een klein plaketketje.

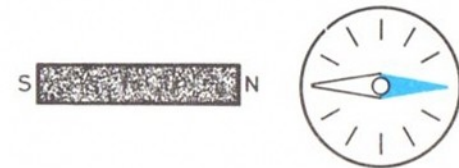


13.6

13.1.3 Noord- en zuidpool

Proef

We brengen de noordpool van de staafmagneet nu naar het kompas toe zoals in fig. 13.7 (a) is getekend. De noordpool van de naald zal uitwijken, terwijl de zuidpool wordt aangetrokken. Welke



13.7 (a)

punt van de naald wordt aangetrokken als u de staafmagneet omkeert? De werking is onafhankelijk – zoals u zelf kunt nagaan – van de richting waaruit de magneet het kompas nadert.

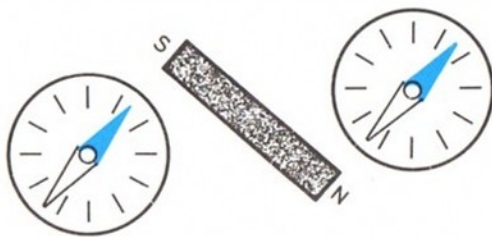
Slotconclusie

Het resultaat toont duidelijk aan dat gelijknamige polen elkaar afstoten en ongelijknamige elkaar aantrekken!

Vroeger is dus een fout gemaakt toen het deel van de naald dat naar Groenland wees, dezelfde aanduiding kreeg als de aardrijkskundige noordpool.

Een van beide zou een zuidpool moeten zijn.

Gelijknamige polen stoten elkaar af; ongelijknamige trekken elkaar aan.



13.7 (b)

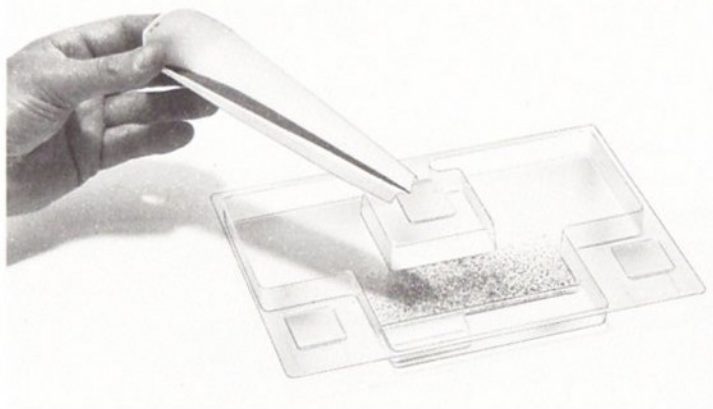
Toen men tot dit inzicht kwam is het volgende afgesproken: de blauwe naaldpunt en de aardpool zijn beide noordpolen, hoewel de noordpool van de aarde werkt als een magnetische zuidpool! In fig. 13.7 (b) zien we dat de polen precies aan het einde van de magneet liggen.

13.1.4 Krachtlijnen

Bij een condensator spraken we van een elektrisch veld tussen het (+)potentiaal en het (-)potentiaal dat op de platen was aangebracht.

Zou er tussen twee ongelijke magnetische polen ook zoiets als een veld kunnen zijn? Bij de platen was het de invloedssfeer van de aantrekkende krachten tussen (+) en (-) dat we een veld noemden. Bij een magneet zou het dus te maken moeten hebben met de aantrekkende kracht tussen beide ongelijknamige polen. Inderdaad is er een magnetisch veld en het bestaat ervan is wat gemakkelijker aan te tonen dan dat van een elektrisch veld.

13.8



Let er op dat bij deze en alle volgende proeven het ijzerpoeder niet in direct contact komt met de magneet. Het kost u uren om het poeder er weer af te krijgen.

1. Proef

Voor het bewijs nemen we wat ijzerpoeder. Als we het tussen de noord- en zuidpool (het krachtveld) brengen, dan rangschikken de ijzerdeeltjes zich langs de zogeheten krachtlijnen tussen beide polen. Ze gaan als het ware in het gelid staan en maken zo de krachtlijnen zichtbaar.

Strooi wat ijzerpoeder (uit het kleine zakje in de cassette) op een transparant plaatje; b.v. zoals in fig. 13.8 op het deksel van de hobbylabordoos. Verdeel het poeder zo gelijk mogelijk, liever wat te weinig dan teveel!

In fig. 13.9 zien we het onderstel waarop we het deksel met het ijzerpoeder kunnen laten zakken. De magneet leggen we over de opening tussen de twee dwarsbalkjes heen.

Als we het deksel nu laten zakken, kunnen we tussen magneet en poeder een afstand houden van 5-10 mm. De stalen nokken in de ft-bouwstenen hebben bij dit soort oriënterende proeven geen invloed. De bouwstenen zelf zijn van kunststof en niet-magnetisch. We tikken voorzichtig tegen het deksel en we zien dan hoe het poeder een patroon gaat vertonen zoals in fig. 13.10 is gefotografeerd. Leg desnoods een wit papier onder het deksel, dan is een en ander beter te zien.

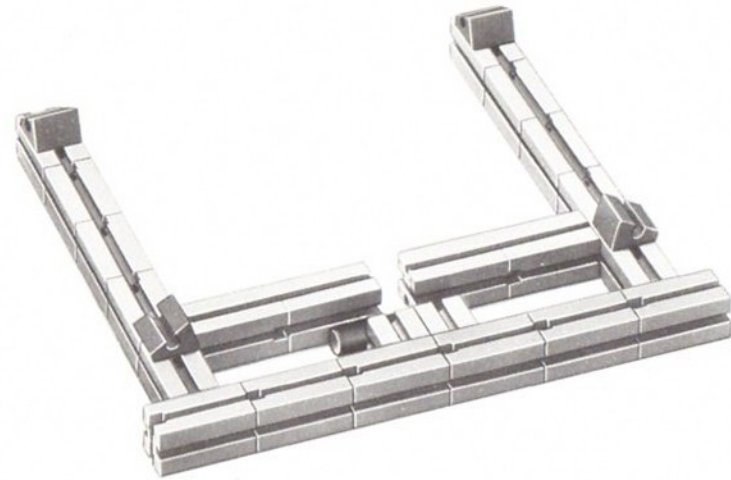
Hoe ontstaat dit beeld in ijzerpoeder?

Elk ijzerdeeltje wordt bij de nadering van de permanente magneet zelf een klein magneetje met een noord- en een zuidpool. Ongelijknamige polen trekken elkaar aan en zo ontstaan al snel de ketens van kleine magneetjes (de ijzerdeeltjes) als we even tegen het deksel tikken. De deeltjes wippen even omhoog, zodat ze vrij komen en kunnen draaien. De ketens geven de richting aan van de krachtlijnen die tussen de noord- en zuidpool lopen. Nu plaatsen we heel voorzichtig het deksel met het krachtlijnenpatroon direct op de magneet waarbij we zorgen dat de polen ongeveer op dezelfde plaats in het patroon komen als bij de vorige proef.

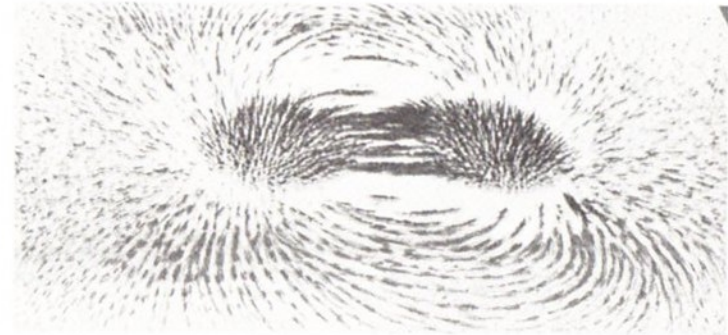
De ijzerdeeltjes zullen zich nu dicht op elkaar boven de magneet-polen groeperen. Aan het principe verandert niets, alleen zijn de magnetische krachten groter geworden, waardoor de deeltjes meer naar de polen schuiven.

Figuur 13.11 toont schematisch hoe de krachtlijnen van een staafmagneet lopen.

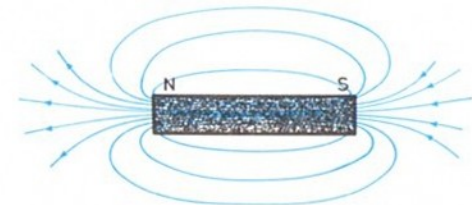
De figuur geeft natuurlijk alleen een doorsnedebeeld langs de middellijn van de staafmagneet. Het beeld dat we met het ijzerpoeder kregen is in één vlak gelegen dat bovendien niet door het midden van de magneet loopt. Voor onze doeleinden hebben de verschillen echter geen betekenis.



13.9



13.10



13.11

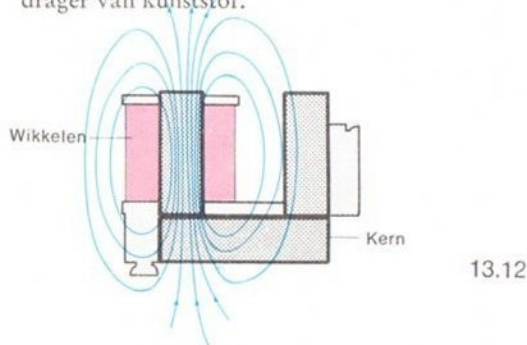
2. Proef

Wanneer we de staafmagneet loodrecht met een kant tegen de onderkant van het deksel houden, dan zien we aan het ijzerpoeder hoe de krachtlijnen als een stralenkrans naar de pool toe lopen.

13.1.5 De elektromagneet

Elektromagneten onderscheiden zich allereerst van permanente magneten doordat hun magnetische werking ophoudt zodra er geen stroom meer doorheen loopt.

Aan de hand van fig. 13.12 gaan we eens kijken welke onderdelen een dergelijke magneet heeft. Er is een u-vormige ijzeren kern, die uit drie delen bestaat. Op de benen van de u komt de spoeldrager van kunststof.

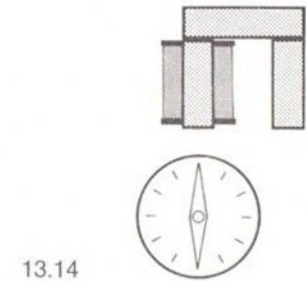
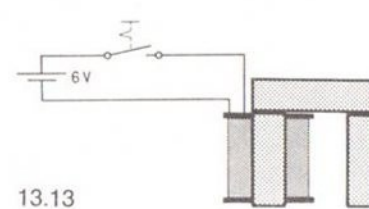


Op de ene zijde van de spoeldrager zit een wikkeling van ongeveer 1500 wikkelingen koperdraad met een diameter van 0,15 mm. De wikkelingen zijn ten opzichte van elkaar geïsoleerd. Bij de fabricage is de draad tevens voorzien van een dunne, isolerende laklaag. De draad wordt daarbij door een lakbad getrokken. Een transparante folie beschermt de wikkeling; de uiteinden van de draad zijn aan twee bussen gesoldeerd.

Voor het inbouwen in fischertechnik-modellen heeft de spoel twee nokken.

Proef

Bouw de schakeling van fig. 13.13. Zodra we de stroom ingeschakeld hebben, kunnen we aan de polen van de elektromagneet spijkers, ft-assen, ankerplaten en andere ijzeren voorwerpen hangen.



Ga na of de magnetische werking aan beide benen even groot is. Zijn beide benen noordpolen of zuidpolen of is de ene een noord- en de andere een zuidpool? Doet de polariteit van de aangelegde spanning er iets toe?

Met behulp van de kompasnaald kunt u snel uw mening controleren.

Resultaat

Zodra we de stroom uitschakelen vallen zwaardere voorwerpen van de polen af. Lichtere blijven kleven, ook na het afzetten van de stroom. Dit verschijnsel zullen we later onderzoeken. Als we de lichte voorwerpen er eenmaal hebben afgehaald, blijven ze niet opnieuw hangen, tenzij we natuurlijk eerst weer de stroom inschakelen.

Omdat deze magneet ijzeren voorwerpen kan opheffen, heet hij hef-magneet, het symbool er voor zien we in fig. 13.15.



13.2 De magnetische kring

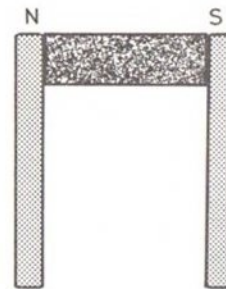
13.2.1 De poolschoen

1. Proef

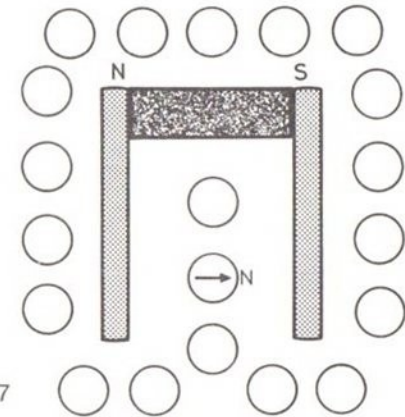
Plaats tegen de platte kanten van de permanente magneet een ft-as 60 of een dikke spijker zoals in fig. 13.16 getekend. Leg het geheel plat op tafel. Bepaal met behulp van de kompasnaald hoe de krachtlijnen lopen en waar de zuid- en de noordpool liggen.

Zet het kompas daartoe op de plaatsen neer als in fig. 13.17 aangegeven. Noteer verder in de cirkeltjes welke pool van het kompas (N of Z) door de magneet en de poolschoenen wordt aangetrokken. Geef bovendien met een pijltje de richting van de naald aan. Een voorbeeld is in fig. 13.17 opgenomen.

Belangrijk is natuurlijk om te weten hoe het magnetisch veld tussen de beide staven (de poolschoenen) er uit ziet. In dit geval zijn de poolschoenen simpelweg een verlenging van resp. de noord- en de zuidpool. Poolschoenen hoeven niet de vorm van een rechte staaf te hebben, ze mogen de vorm hebben die het best past bij het doel waarvoor ze moeten dienen.

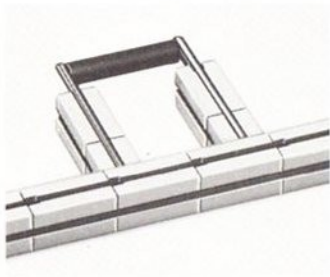


13.16

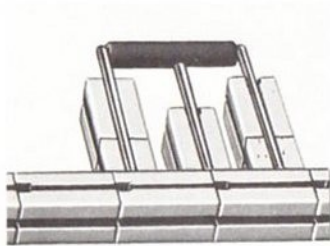


13.17

De kompasnaald staat altijd in de richting van de krachtlijnen.



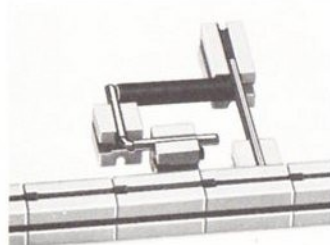
13.18



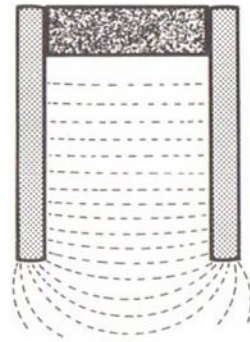
13.20



13.21

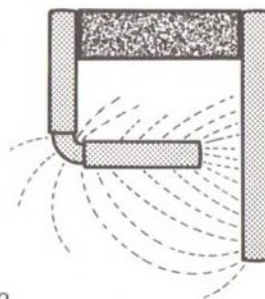


13.22



13.19

13.23



2. Proef

We gaan met ijzerpoeder onderzoeken hoe de krachtlijnen tussen de beide poolschoenen lopen. Welke richting de ijzerdeeltjes krijgen weten we al: dezelfde als de kompasnaald in de vorige proef. We strooien zo gelijkmatig mogelijk ijzerpoeder op het transparante deksel. De magneet plaatsen we in een raam zoals in fig. 13.18 aangegeven.

We krijgen nu een beeld van de krachtlijnen dat overeenkomt met fig. 13.19. Er blijkt uit dat de krachtlijnen tussen de beide poolschoenen parallel lopen. Het is het principe van de hoefijzermagneet. In werkelijkheid bestaan de benen van deze permanente magneet natuurlijk niet uit losse ronde staven, maar is een stuk ijzer in de vorm van een hoefijzer gebogen. We plaatsen nu in het midden van onze „hoefijzermagneet“ een as, zoals in fig. 13.20 en kijken wat er met de krachtlijnen gebeurt.

Daarna veranderen we als in fig. 13.21 de poolschoenen. Teken het resultaat, de krachtlijnen, in fig. 13.21.

3. Proef

Vervang nu de ene rechte poolschoen door een haakse poolschoen (ft-hoekas) en teken de krachtlijnen in fig. 13.22.

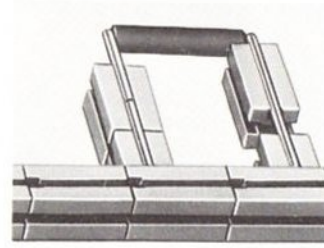
Krachtlijnen die niets bijdragen aan het doel van de magneet, vormen tezamen het spreidingsveld. In fig. 13.23 zien we hoe ook op de bocht krachtlijnen uit treden die aan het magnetisch veld tussen de uiteinden van de poolschoenen niets bijdragen.

4. Proef

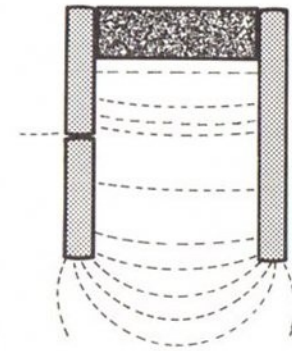
De linker poolschoen stellen we nu samen uit twee ft 30 assen. Als rechter poolschoen nemen we weer een ft – as 60. Een en ander is in fig. 13.24 afgebeeld.

We krijgen dan een beeld overeenkomstig fig. 13.25 en op het breukpunt een storing in het veld. Het lijkt er op alsof op dit punt krachtlijnen uit de poolschoen ontsnappen. Duidelijk zal zijn dat er minder krachtlijnen ontsnappen naarmate de beide uiteinden steviger tegen elkaar aan liggen. Exacter gezegd, hoe minder de eenheid van het ijzer verbroken wordt. Vandaar b.v. dat hoefijzermagneten uit één stuk worden gemaakt. Er zijn dan geen breukpunten waar krachtlijnen het ijzer kunnen verlaten.

Nog iets anders zal u wel zijn opgevallen. Hoe sterker de werking van de magneet, als we b.v. het ijzerpoeder dichter bij de poolschoenen brengen, des te beter vormt zich de keten van ijzerdeeltjes. Anders gezegd: des te meer krachtlijnen lopen er. We mogen daaruit konkluderen, dat als de sterkte van de magneet toeneemt, er meer krachtlijnen zijn.



13.24



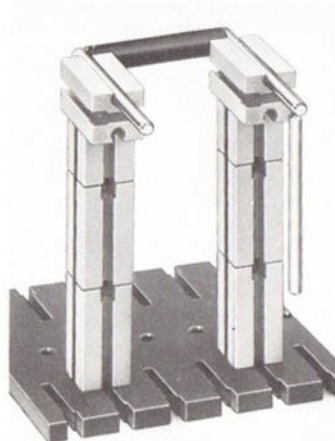
13.25

5. Proef

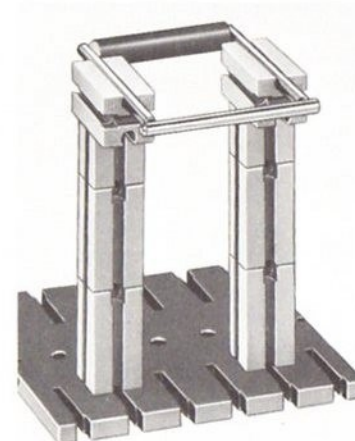
Hang nu volgens fig. 13.26 aan het vrije eind van de poolschoen een ft-as 60 en maak een schatting van de kracht (magnetische aantrekkingskracht) waarmee de poolschoen de as vasthoudt. Mogen we nu verwachten, dat de magnetische aantrekkingskracht twee keer zo groot zal zijn als de as tegen beide poolschoenen aan ligt, zoals in fig. 13.27?

De kracht kunnen we bepalen met behulp van ft-bouwstenen of de ft-veerbalans.

13.26



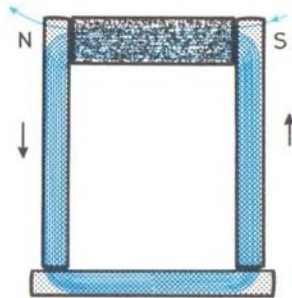
13.27



13.2.2 De gesloten magnetische kring

Hoe komt het nu dat als de as tegen beide poolschoenen aan ligt, de aantrekkingskracht veel groter is?

Door de as tegen de schoenen aan te leggen, hebben we een gesloten ijzeren kring gemaakt, waarin alle krachtlijnen zich verzamelen. We kunnen het verschijnsel op eenzelfde manier verklaren als bij de elektrische stroomkring, zie fig. 13.28.



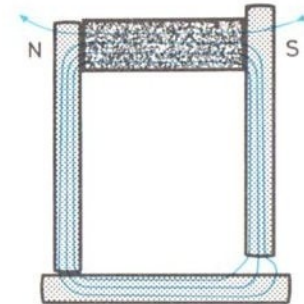
13.28

Precies als in een elektrische stroomkring onderweg geen stroom verloren kan gaan, zo is het ook onmogelijk dat een magnetische krachtlijn ergens ophoudt. De lijn in fig. 13.28 die op de zuidpool naar binnentreedt en er aan de noordpool weer uitgaat, moet in gedachten naar links en rechts worden doorgetrokken.

Gaat men er van uit dat de krachtlijnen aan de noordpool naar buiten treden, dan moeten ze aan de zuidpool alle weer in de magneet gaan. De krachtlijnen laten zien langs welke banen de magnetische aantrekkingskracht werkt. We praten echter niet over een magneetstroom, magnetische stroom of iets dergelijks, maar over de magnetische flux. Deze is groter naarmate de verschillende onderdelen van de magnetische kring minder weerstand bieden aan de krachtlijnen.

Precies zoals elk materiaal een typische elektrische geleiding (het omgekeerde van de weerstand) heeft, zo heeft ook elke stof een kenmerkende magnetische geleiding die echter permeabiliteit heet. In hoofdstuk 13.4.4 wordt deze grootheid (evenals andere) van het magnetische veld besproken. We willen er alleen nog dit van zeggen: de magnetische flux wordt uitgedrukt in het aantal krachtlijnen per oppervlak. Het symbool er voor is de Griekse letter Φ (Phi), de eenheid is Weber (Wb).

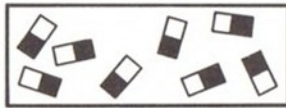
Als een elektrische stroomkring open is, dan loopt er geen stroom. Maar in een magnetische kring werkt een onderbreking van het



13.29

ijzeren lichaam niet als een oneindig grote weerstand voor de kracht- of veldlijnen. In een magnetische kring is dan ook vaak rekening gehouden met een luchtspleet, hoewel er dan minder krachtlijnen uit de magneet van de noordpool naar de zuidpool lopen. Dat is ook de reden waarom de aantrekkingskracht zo klein is als we een ijzeren voorwerp maar aan één poolschoen ophangen. (Meer over luchtspleten in magnetische kringen geeft hoofdstuk 13.4.5).

Ijzer heeft vergeleken met gassen en vloeistoffen en met allerlei niet-magnetische metalen en vaste stoffen, een zeer kleine magnetische weerstand, oftewel een grote permeabiliteit. Hetzelfde geldt voor nikkel en kobalt. Men verklaart het magnetisme van deze metalen als volgt. De molekulen van deze stoffen zijn kleine magneetjes, magnetische dipolen geheten. Zolang er van buitenaf geen magnetisch veld op inwerkt, liggen de dipolen ongeordend binnen de roosterstructuur van het metaal (fig. 13.30 a). Brengen we nu het metaal binnen het veld van een sterke magneet, dan zal een groot deel van de dipolen, precies als de kompasnaald, zich



13.30 (a)

in de richting van de krachtlijnen rangschikken. Ze komen evenwijdig aan elkaar te liggen waarbij de noordpolen van de dipolen naar de zuidpool wijzen van de magneet (fig. 13.30 b). Als het veld klein is, zal ook maar een klein deel van de dipolen zich schikken naar de richting van het veld. (Met behulp van een elektronische proefschakeling is het mogelijk om het in het gelid springen van de dipolen



13.30 (b)

hoorbaar te maken). In sommige metalen lukt het de dipolen met een betrekkelijk zwak veld te ordenen, in andere metalen gaat het alleen met een zeer sterk veld.

Alle ijzersoorten hebben één ding gemeen: er kunnen niet meer dipolen gericht worden dan er zijn. Molekulen die geen dipolen zijn, kunnen in 't geheel niet worden gericht. Voor elke ijzerlegering is er een magnetische verzadiging. Het aantal krachtlijnen kan niet boven deze grenswaarde uitkomen, hoe sterk de magneet ook is die het veld levert.

13.3 Welke stoffen zijn te magnetiseren?

We hebben reeds onderzocht welke materialen uit hobbylabor door magneten wel en welke niet worden aangetrokken. We moeten bij de stoffen die worden aangetrokken nog onderscheid maken tussen stoffen die daardoor zelf magneten worden en die na het wegvallen van het veld hun magnetisme verliezen.

13.3.1 Niet-magnetische stoffen

Alle niet-metalen en van de metalen o.a. aluminium, koper, tin, zink en messing, worden niet door een magneet aangetrokken. Hun molekulen zijn geen dipolen. Brengen we zulke stoffen in een magnetisch veld, dan verandert dat niet.

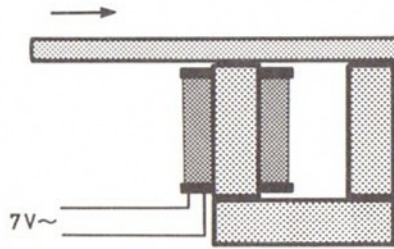
Volledigheidshalve zij nog vermeld, dat er ook stoffen zijn, die het aantal krachtlijnen in een veld verminderen. Ze hebben het tegenovergestelde effect van ijzer dat krachtlijnen in zich verzamelt. Men noemt deze groep diamagnetische stoffen (een voorbeeld is bismuth).

13.3.2 Ferromagnetische materialen

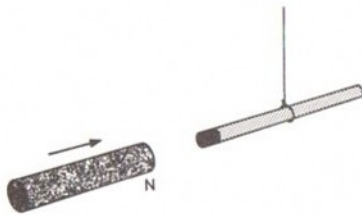
De aanduiding „ferro“ betekent dat het om een groep stoffen gaat die zich overeenkomstig gedragen als ijzer (Latijns: ferrum). We zullen ons nu voorlopig beperken tot ijzer en zijn legeringen. In de volgende proef gaan we de werking van een magnetisch veld op ijzer onderzoeken.



13.31



13.32



13.33

1. Proef

We hangen een ft-as 60 (of een spijker) aan een draad op. Figuur 13.31 toont daarvoor een simpele constructie. Het ene einde van de as merken we met een stukje zelfklevend plakband. Voor we met de proef beginnen, moeten we de as volledig van magnetisme ontdoen. Dit demagnetiseren doen we met de magneetspoel waar we de wisselspanning van de trafo op zetten. We schuiven de as (zie fig. 13.32) langs de beide poolschoenen in de aangegeven richting en maken de afstand langzaam groter in dezelfde richting. Met de kompasnaald kunt u controleren of de as gedemagnetiseerd is. De kompasnaald mag niet van stand veranderen wanneer we hem met een willekeurig einde van de as naderen. Gebeurt dat toch, dan moeten we de demagnetisering herhalen.

Hang de as nu aan de draad en breng de noordpool van de staafmagneet heel voorzichtig naar het gemerkte uiteinde van de as. Houd daarbij de richting aan als getekend in fig. 13.33. Zorg met één vinger dat as en magneet elkaar niet aanraken wanneer ze daartoe dicht genoeg bij elkaar gebracht zijn.

2. Proef

Herhaal de proef nu met de zuidpool van de staafmagneet, zorg er weer voor dat as en magneet elkaar niet aanraken.

Resultaat

De magneet – of het nu de zuid- of de noordpool is – trekt het gemerkte eind van de as aan.

Nadat we de staafmagneet hebben weggehaald, controleren we de magnetische werking van de as. Als we deze nu in de nabijheid van de kompasnaald brengen, dan constateren we een zwakke uitslag. De as wordt onder invloed van het sterke magnetische veld van de staafmagneet, zelf zwak magnetisch. Aan welke kant ligt resp. in de eerste en in de tweede proef de noordpool?

3. Proef

Nu raken we met de noordpool van de staafmagneet opzettelijk het gemerkte eind van de staaf aan. We scheiden magneet en as weer en nu blijkt de laatste zelf een behoorlijk sterke magneet te zijn geworden. Is het aangeraakte eind een noord- of een zuidpool geworden? Gebruik de kompasnaald om het antwoord te vinden. We bewegen nu de staafmagneet heel voorzichtig in de richting als in fig. 13.33, met z'n zuidpool naar het gemerkte einde van de as.

Belangrijk is dat dit heel langzaam gebeurt. Het gemerkte uiteinde is door de magnetisering een sterke zuidpool geworden en moet daarom bij de nadering wegdraaien. Gelijksnamige polen stoten elkaar af; het andere eind van de as wordt aangetrokken.

4. Proef

Nu brengen we de zuidpool van de staafmagneet snel naar het gemerkte uiteinde van de as. Nu krijgt deze geen tijd om zich te draaien – en wordt hij andersom gemagnetiseerd. Halen we de permanente magneet weg, dan blijkt het gemerkte einde een noordpool geworden, wat we met de kompasnaald kunnen vaststellen.

Slotconclusie

Na wat in hoofdstuk 13.2.2 over het verloop van de krachtlijnen is gebleken, zal het duidelijk zijn dat de as bij aanraking veel sterker wordt gemagnetiseerd dan zonder het contact met de permanente magneet.

13.3.3 Tijdelijk en permanent magnetische materialen

Ferromagnetische materialen kunnen we in twee groepen verdelen. Materialen die bij het richten van hun moleculaire dipolen het magnetisme vasthouden, noemen we permanent magnetisch of ook wel magnetisch harde stoffen. Het zijn dus stoffen die na het wegvallen van het magnetisch veld het opgewekte magnetisme bijna geheel behouden.

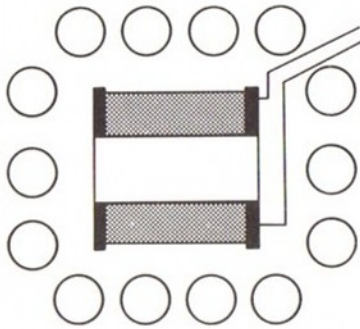
De tweede groep stoffen wordt magnetisch onder invloed van een aangelegd magnetisch veld, maar zodra dit wegvalt verdwijnt ook het magnetisme bijna weer geheel. Deze stoffen heten tijdelijk magnetisch of magnetisch zacht. Dit soort materiaal wordt b.v. gebruikt voor elektromagneten. Meestal blijft er een zwak restmagnetisme over dat echter ongewenst is!

13.3.4 Het restmagnetisme

Er zijn ijzersoorten die praktisch geen restmagnetisme overhouden nadat het magnetisch veld is verwijderd. Ze zijn echter erg duur en meestal slecht te verwerken (draaien, boren, enz.). In de techniek past men daarom simpele trucjes toe. Bijzonder vervelend is het restmagnetisme in elektromagneten. Na het uitschakelen van de stroom wordt de aantrekkingskracht van de magneet niet nul. Een aangetrokken ijzeren staaf blijft aan de poolschoen kleven in plaats van er af te vallen. Met een laklaag of een folie op de poolschoenen is het euvel te verhelpen. Hoofdstuk 13.4.6 komt nog op het restmagnetisme terug.

13.4 Het elektromagnetische veld

13.4.1 Inleidende proef



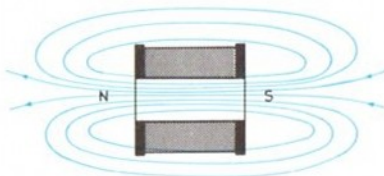
13.34

Sluit de magneetspoel – zonder ijzeren kern – aan op een gelijkspanningsbron en onderzoek met behulp van de kompasnaald of er magnetische krachtlijnen zijn ontstaan. Fig. 13.34 toont de standen van het kompas. Noteer steeds in welke richting de (blauwe) noordpool van de naald wijst. Noteer in fig. 13.34 ook welk spoelkontakt op de (+) en welk op de (-) van de bron is aangesloten.

Draai de stroomrichting in de spoel om, door de aansluitingen op de (+) en de (-) te verwisselen. Herhaal de proef met de kompasnaald, in welke richting wijst deze nu in de getekende posities?

In beide gevallen werkt er een magnetische kracht op de naald. Al naar de polariteit van de aangelegde spanning ontstaat op het eind van de spoel een noord- of een zuidpool. In fig. 13.35 is de richting van de krachtlijnen getekend, zoals u dat ook „in grote lijnen“ met de kompasnaald heeft vastgesteld. Figuur 13.35 is een doorsnede.

De proef toont aan dat een elektrische stroom een magnetisch veld opwekt zonder dat daar een ijzeren kern voor nodig is.

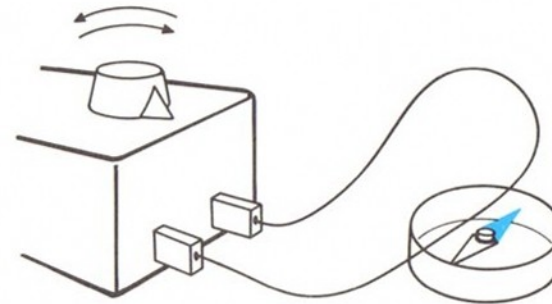
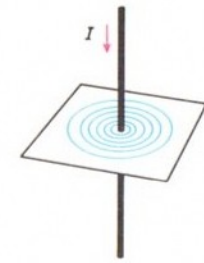


13.35

13.4.2 Het magnetisch veld om een geleider

De Deense natuurkundige Oerstedt heeft als eerste ontdekt dat een stroom die door een geleider loopt – dus ook één enkele draad – om die geleider een magnetisch veld opbouwt of opwekt. In fig. 13.36 zien we de krachtlijnen rond een geleider lopen. De lijnen moeten we ons als gesloten ringen voorstellen. Een kracht- of veldlijn kan niet ergens ophouden, zoals we weten van onze experimenten met permanente magneten. De magnetische veldlijnen omgeven de geleider als buizen.

13.36



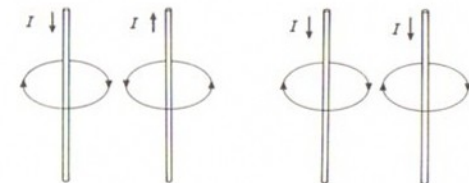
13.37

1. Proef

Het opgewekte magnetische veld kunnen we ook als volgt aantonen. Leg, zoals in fig. 13.37 getekend, een draad parallel met de kompasnaald. We sluiten de draad even aan op de gelijkspanning van de trafo. Zodra de stroomsterkte groot genoeg is, zien we de kompasnaald wegdraaien.

Wat gebeurt er nu als we twee draden boven de kompasnaald houden? We moeten daarbij onderscheid maken tussen twee mogelijkheden. De stromen in de beide draden lopen in tegengestelde richting of ze lopen beide in dezelfde richting, zie fig. 13.38.

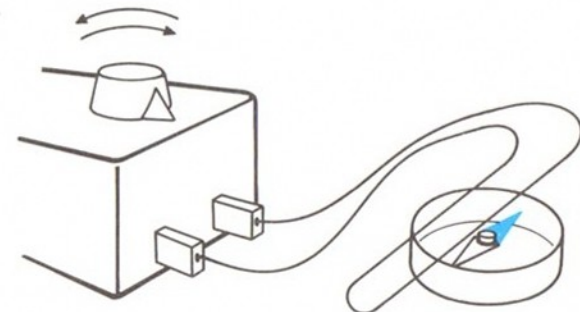
Wat zal het resultaat zijn?



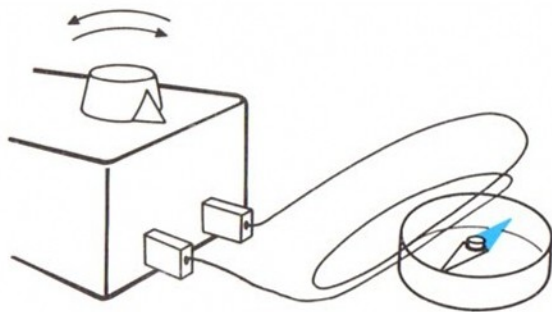
13.38

2. Proef

Laten we eerst eens kijken wat er gebeurt als de stromen in tegengestelde richting lopen. Fig. 13.39 laat de proefopstelling zien en hoe we de draad over de kompasnaald voeren.



13.39



13.40

3. Proef

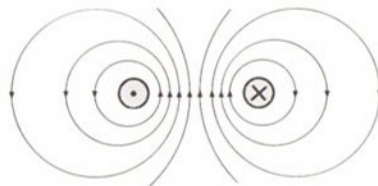
In fig. 13.40 zien we hoe we de stroom in beide draden in dezelfde richting over de kompasnaald laten lopen. In principe doen we niets anders dan een spoeltje winden met 2 wikkelingen.

Resultaat

U zult zien dat de naald in het geval van de tegengestelde stroomrichtingen niet uitslaat; bij de gelijke stroomrichtingen slaat de naald ongeveer twee keer zo ver uit als bij de ene draad.

Slotconclusie

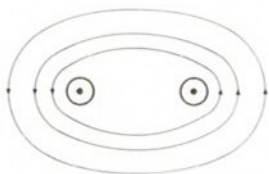
Wanneer er een stroom door geleiders gaat, ontstaan er rond die geleiders magnetische velden die elkaar beïnvloeden. Wanneer de stroom in tegengestelde richting loopt, zullen de geleiders elkaar afstoten, met ijzervijssel kunnen we nagaan (fig. 13.41) dat de beide magneetvelden om de geleiders elkaar proberen te verdringen.



13.41

In fig. 13.41 kijken we op de doorsnede van twee geleiders. In het cirkeltje met de punt (links) komt de stroom van onder het papier loodrecht naar boven, het veld loopt dan (door ons gezien) tegen de klok in. In het cirkeltje met het kruis (rechts) loopt de stroom van ons af dwars door het papier naar beneden, nu loopt het veld (weer door ons gezien) met de klok mee.

Als omgekeerd in 2 geleiders die dicht bij elkaar liggen, stromen in dezelfde richting lopen, dan zullen de geleiders elkaar aantrekken. In fig. 13.42 zien we dat de krachtlijnen elkaar versterken en één veld gaan vormen om de beide geleiders heen.

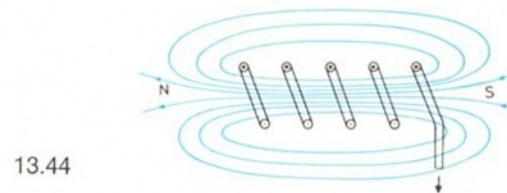
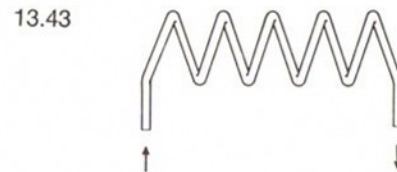


13.42

De afstotende en aantrekkende krachten tussen stroomvoerende geleiders, hebben over het algemeen geen storende invloed op communicatie-apparatuur. Bij de bouw van sterke zenders en machines (zoals generatoren en motoren) moet er wel rekening mee worden gehouden.

Een spoel bestaat uit een aantal wikkelingen van geïsoleerd draad op een kern. Zo'n spoel kan één of vele lagen van wikkelingen hebben. We beschouwen een laag en krijgen dan fig. 13.43. Teken we nu de velden, dan krijgen we een totaalbeeld als in fig. 13.44, dat bestaat uit de magnetische velden die rondom de wikkelingen ontstaan.

Destijds is de afspraak gemaakt dat de krachtlijnen aan de noordpool van een magneet uittreden en aan de zuidpool naar binnen gaan. Op deze wijze is ook de richting van de veldlijnen om de enkele geleider vastgelegd. Het gemakkelijkst is die te onthouden met de kurketrekkerregel. Als we de kurketrekker in de richting van de stroom (technische stroomrichting van + naar -) draaien, geeft het handvat de richting van de krachtlijnen aan. Andersom gezegd: draaien we het handvat in de richting van de klok (de trekker in de kurk) dan loopt de stroom van ons af. Op deze wijze zijn ook de lijnen in fig. 13.41 en 13.42 getekend.



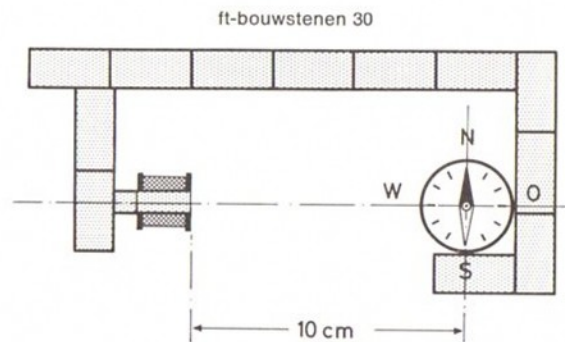
13.4.3 De werking van een ijzeren kern in de spoel

In hoofdstuk 13.4.2 zagen we dat het motto: „eendracht maakt macht“ ook op spoelen wordt toegepast. De vele windingen bij elkaar, laag op laag, geven een veel sterker magnetisch veld dan de enkele winding.

Er is nog een andere mogelijkheid om de magnetische aantrekkingskracht van de spoel te verhogen. In het hart van de spoel plaatsen we een stuk ijzer: een ijzeren kern. We gebruiken het kompas om dit aan te tonen. De grotere uitslag van de naald bewijst dat het magnetisch veld sterker is geworden.

Proef

Bouw de opstelling van fig. 13.45. De afstand tussen spoel en kompas bedraagt 10 cm. Draai de opstelling nu zo dat de in noord-zuidrichting staande kompasnaald loodrecht op de as van de spoel staat.



kern	hoek tussen N en kompasnaald in °
zonder ijzer	
ft-as 30	
ijzeren kern 22 x 8 x 8 (van u-kern)	
kern volgens 13.47	
kern volgens 13.48	
U-kern volgens 13.49	
gesloten ijzeren kern volgens 13.50	

Let er op dat voor alle volgende proeven dezelfde spanningsbron wordt gebruikt, b.v. de trafo met de knop geheel naar rechts en met een 470 μ F-kondensator als afvlakkondensator. Door de spoel loopt dan steeds een stroom van dezelfde sterkte. Eerst werken we zonder kern in de spoel. Als we de stroom inschakelen slaat de naald iets uit. Die uitslag noteren we in tabel 13.46. Nu schuiven we een kort ijzeren staafje, b.v. de ft-as 30, in de spoel, schakelen de stroom in en krijgen een veel grotere uitslag. We herhalen de proef met een ijzeren kern van 22 x 8 x 8 mm (losschroeven van de u-vormige kern). Wat is nu het resultaat? De volgende stap is dat we de kern van een poolschoen voorzien (fig. 13.47). Bevestigt de proef wat u verwacht had?

(Let op: het kompas moet 8 mm naar rechts, daar de poolschoen 8 mm dik is.)

We herhalen de proef nu met de poolschoen tegen de achterkant van de kern (fig. 13.48) en dan nog een keer met twee poolschoenen (fig. 13.49). Het kompas moet nu weer 8 mm terug! Tenslotte sluiten we de magnetische kring met de ankerplaat (fig. 13.51) uit de doos.

13.47



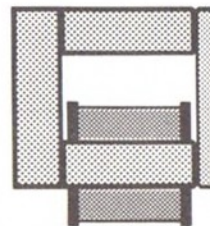
13.48



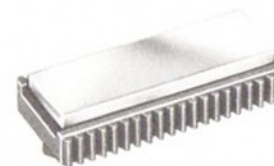
13.49



13.50



13.51



Resultaat

Bij de vorige proeven zagen we dat de magnetische kracht van de spoel behoorlijk toenam. De ijzeren kern zorgt er voor dat meer krachtlijnen uit de noordpool treden en weer op de zuidpool naar binnen gaan.

In de voorlaatste proef met de open u-kern moet u de grootste uitslag hebben gemeten. Het opzetten van de ankerplaat verzwakt de magnetische werking op de kompasnaald! Hoe kan dat, terwijl toch het aantal krachtlijnen groter wordt als we de kring sluiten? De verklaring is vrij simpel. We meten met de naald niet het aantal krachtlijnen in het ijzer, maar het spreidingsveld en wanneer er meer krachtlijnen in de gesloten magnetische kring lopen, zal het spreidingsveld zwakker worden.

13.4.4 Enkele belangrijke magnetische grootheden

Om exacte uitspraken te kunnen doen over spoelen, elektromagneten etc. zijn er verschillende grootheden die betrekking hebben op magnetisme. We zullen hier maar kort op ingaan en u niet vermoeien met ingewikkelde berekeningen.

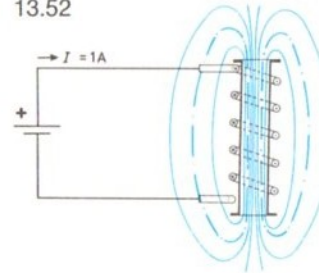
De magnetische flux

In hoofdstuk 13.2.2 is al iets gezegd over de magnetische flux Φ , die het aantal kracht- of veldlijnen door een gegeven oppervlak is en in „Weber“ (Wb) wordt gemeten. Vastgelegd is $1 \text{ Wb} = 10^8$ krachtlijnen (= 100 miljoen krachtlijnen). Vroeger werd ook wel als eenheid de maxwell (M) = 1 krachtlijn gebruikt.

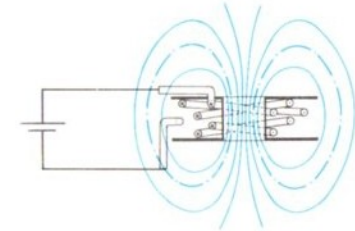
De omstroming

In fig. 13.52 is een spoel getekend met 5 windingen, die naast elkaar (in een laag) liggen. Nu zal de magnetische sterkte van de spoel toenemen met het aantal windingen (N) en de stroomsterkte I die door de spoel loopt. Het product van stroomsterkte en aantal windingen heet omstroming. Vroeger ook wel stroomwindingsdichtheid genoemd. In formules gebruiken we de Griekse letter Θ (theta): $\Theta = I \cdot N$ (A · W = ampèrewindingen)

13.52



13.53



De magnetische veldsterkte

In fig. 13.53 is een spoel getekend met dezelfde omstroming als die in fig. 13.52, maar met een andere opbouw. De spoel is in meer lagen gewikkeld en daardoor korter geworden. Het aantal windingen is hetzelfde gebleven. De gemiddelde lengte van de krachtlijnen (l, in de eenheid m), is nu korter geworden. Dit betekent echter dat de magnetische krachtwerking groter is dan bij de spoel met één laag – gelijke omstroming vooropgesteld. De magnetische krachtwerking wordt veldsterkte genoemd. Met korte spoelen in meer lagen verkrijgt men een grotere veldsterkte dan met lange spoelen met minder lagen.

Het symbool voor de magnetische veldsterkte is H. Er geldt nu:

$$H = \frac{\Theta}{l}$$

Als eenheid voor de magnetische veldsterkte krijgen we: ampèrewinding per meter = $\frac{\text{AW}}{\text{m}}$

Vroeger werd als eenheid voor de veldsterkte de oerstedt (Oe) gebruikt; $1 \text{ Oe} = 0,8 \text{ AW/cm}$.

Magnetische fluxdichtheid of magnetische inductie

De magnetische fluxdichtheid is het aantal krachtlijnen dat loodrecht staat op een vlak (symbool A) van 1 m^2 . Het aantal krachtlijnen wordt gegeven door de magnetische flux, voor de fluxdichtheid („ B “) krijgen we dan:

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} = \text{T}$$

De eenheid „Weber per m^2 “, wordt naar de fysicus Tesla genoemd 1 tesla (afgekort T).

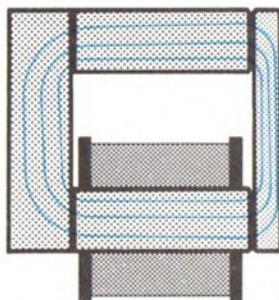
De magnetische fluxdichtheid B is evenredig met de veldversterkte H . Bovendien is de fluxdichtheid ook groter als het materiaal minder weerstand biedt aan de magnetische flux. Anders gezegd, als de permeabiliteit (zie pag. 226) groter is. Het symbool voor de permeabiliteit is μ , spreek uit mu; er bestaat het volgende verband:

$$B = \mu \cdot H \text{ of } \mu = \frac{B}{H}$$

De permeabiliteit

De permeabiliteit wordt verkregen uit 2 factoren: $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
 μ_0 is de magnetische konstante. De magnetische fluxdichtheid van een spoel zonder kern bedraagt: $B = \mu_0 \cdot H$.

μ_r (= relatieve permeabiliteit) is een getal dat aangeeft hoeveel keer de fluxdichtheid B groter wordt wanneer de krachtlijnen niet door lucht maar door een ander materiaal lopen; b.v. zoals in fig. 13.54 door ijzer. μ_r is eenzelfde soort konstante als de dielektrische konstante ϵ_r .



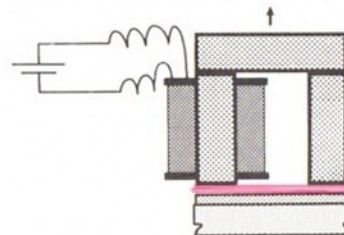
13.54

13.4.5 De luchtspleet

Het aantrekkingsvermogen van een elektromagneet is sterk afhankelijk van de afstand tussen het stuk ijzer (b.v. het anker van een elektromagnetisch relais) dat moet worden aangetrokken en de poolschoenen. We gaan nu twee dingen onderzoeken. De invloed van de luchtspleet op het draagvermogen en de afhankelijkheid van de spanning.

1. Proef

Tussen de poolschoenen van de elektromagneet en de ankerplaat leggen we zoveel lagen dun papier (fig. 13.55) dat het anker bij



13.55

het optillen van de magneet er nog net aan blijft hangen. Steeds voegen we een velletje papier toe tot de luchtspleet zo groot is dat het anker van de magneet afvalt wanneer we die optillen.

De trafo zetten we eerst op de laagste spanning die we met een $470 \mu\text{F}$ -kondensator afvlakken. Wie ft-bouwstenen heeft kan de proef met het 3-, 4-, 6-, 12-, 24-voudige gewicht van de ankerplaat herhalen. De ankerplaat en een bouwsteen 30 hebben ongeveer hetzelfde gewicht.

Bepaal nu de luchtspleet waarbij het anker nog net wordt meegenomen. De grootte van de spleet drukken we uit in lagen papier en niet in mm. Vooropgesteld natuurlijk dat alle stroken papier even dik zijn.

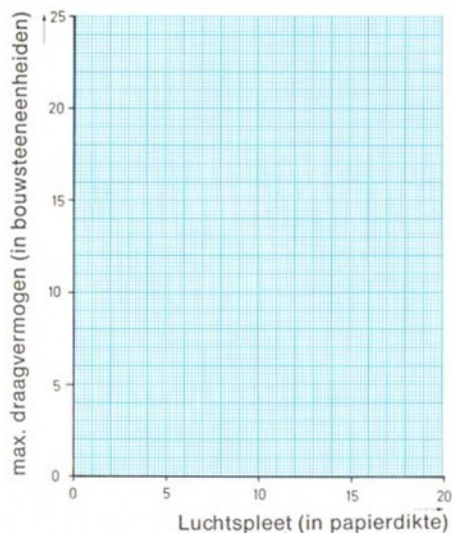
Noteer de gevonden waarden in tabel 13.56. Het gewicht dat de elektromagneet mee kan nemen, drukken we heel eenvoudig uit in het aantal bouwstenen. Met de verkregen waarden kunnen we in diagram 13.57 een grafiek uitzetten. Deze zal overeen moeten komen met fig. 13.58. Herhaal de proef nu met de hoogste spanning die de trafo kan leveren (470 μ F-kondensator niet vergeten).

Resultaat

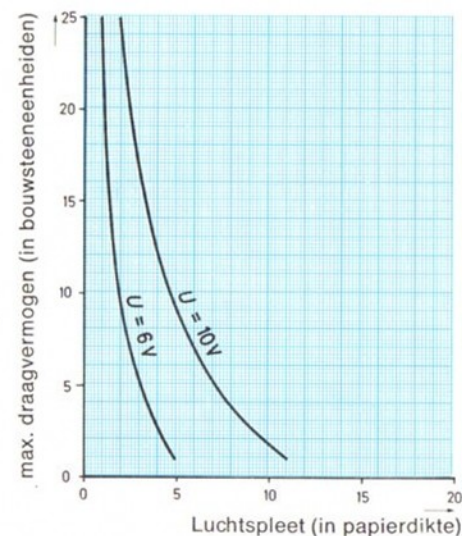
Uit het diagram blijkt dat het maximale draagvermogen van de magneet sterk afhangt van de luchtspleet tussen poolschoenen en anker. De spleet hoeft maar weinig groter te worden om het hefvermogen drastisch te verminderen. Omgekeerd is het zo dat als we de grootte van de luchtspleet halveren, de magneet tien keer zoveel trekt. Ook de hoogte van de spanning heeft invloed op het draagvermogen.

13.56

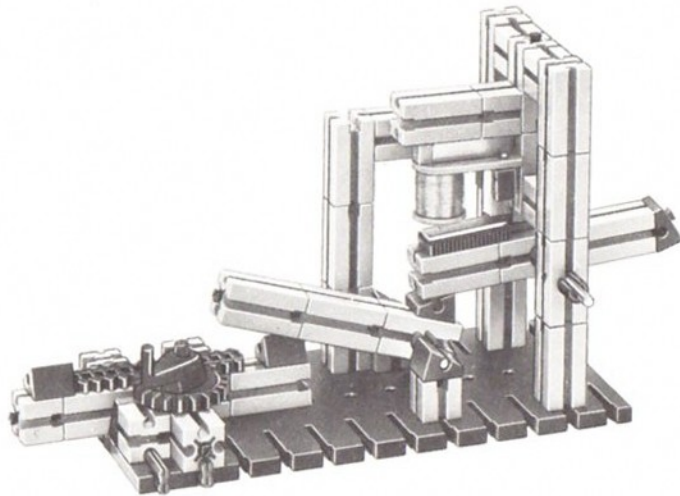
U (afgevlakt) in V	gewicht in aantal bouwstenen	max. luchtspleet in papierlagen
	1	
	3	
	6	
	12	
	24	
	1	
	3	
	6	
	12	
	24	



13.57



13.58



13.59

2. Proef

Met het toestel van fig. 13.59 kunnen we een soortgelijke proef doen, maar dan met een draaibaar magneetanker. Figuur 13.60 toont bouwfase 1 van het onderstel met de elektromagneet en de arm met het anker. Stel het anker en de magneet zo af, dat de ankerplaat beide poolschoenen kan raken.

Tussen het aangetrokken anker en één van de polen mag geen luchtspleet meer zijn. Hang voorlopig nog geen tegenwicht aan de vrije arm van het anker. De magneet moet het anker aantrekken zodra de stroom wordt ingeschakeld en de afstand tussen anker en poolschoenen niet al te groot is. De afstand daartussen is met de tandstang en het tandwiel te regelen.

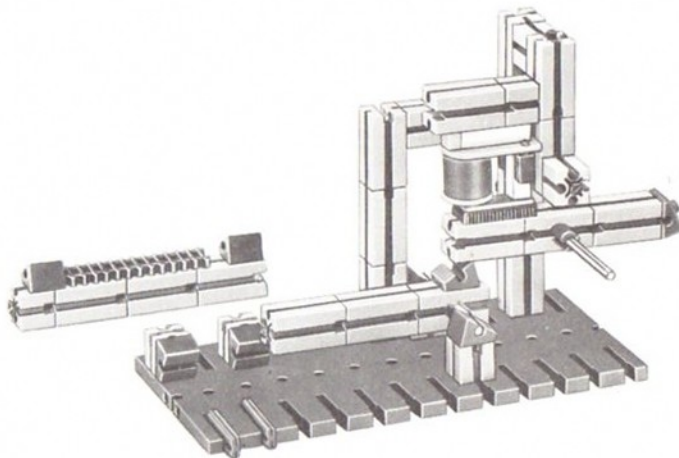
Bepaal – met en zonder afvlakkondensator – voor verschillende spanningen de grensafstand waarbij de magneet nog net het anker omhoog trekt.

Verwissel nu de poolschoenen; het been met de wikkeling komt nu dichterbij het draaipunt van het anker te zitten.

Wat verandert er als we op het rechter eind van het anker een tegenwicht plaatsen? Trekt de magneet nu over een grotere of kleinere afstand? Controleer uw antwoord.

Wijzig het draaipunt van het anker zodanig dat dit precies onder de buitenkant van een poolschoen komt te liggen. In dat geval verkleint u de luchtspleet met een poolschoen en moet de magneet meer kunnen trekken. Om het anker zonder storingen te laten terugvallen (afvallen) is het verstandig een stukje plakband op beide poolschoenen of op het anker te plakken.

In feite toont fig. 13.59 het model van een elektromagnetisch relais, waarvan het anker contacten bedient die stroomkringen openen of sluiten.



13.60

13.4.6 Remanentie en koërcitiefkracht

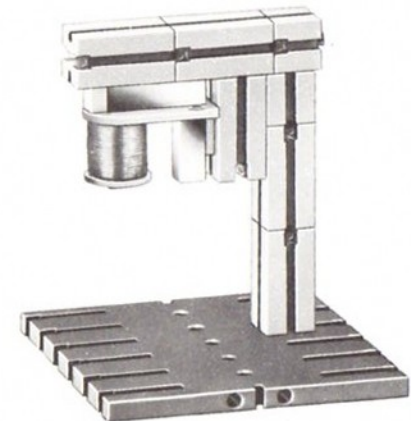
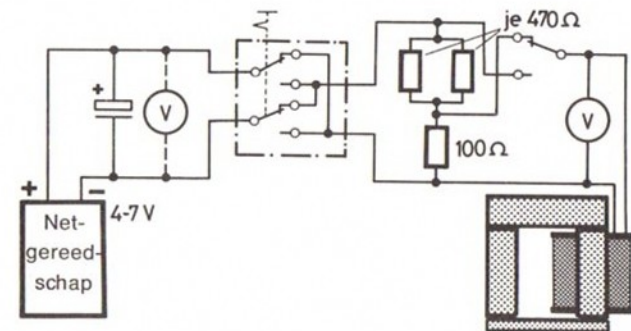
We gaan ons eens wat nader verdiepen in het kleven van het anker na het uitschakelen van de stroom. We bouwen daartoe de schakeling 13.61. De elektromagneet monteren we b.v. als in fig. 13.62.

1. Proef

Met de poolomkeerschakelaar kan op de spanningsdeler de polariteit worden verwisseld. Met de trafo kunnen we de spanning regelen die op de spanningsdeler staat. De spanningsdeler is opgebouwd uit twee parallel geschakelde $470\ \Omega$ -weerstand in serie met een $100\ \Omega$ -weerstand. In fig. 13.61 – getekend in de ruststand van de drukknop – ligt de magneetspoel parallel met de $100\ \Omega$ -weerstand; drukken we de knop in dan komt de volle spanning op de spoel te staan. Met de knop kunnen we de spanning op de spoel in twee stappen veranderen en met de trafo kunnen we de spanning fijn afregelen. Let op dat de kondensator steeds op de goede polen van de trafo is aangesloten. In plaats van de poolomkeerschakelaar en de drukknop kunnen we natuurlijk ook de kabeltjes verwisselen.

Zet de trafo eerst op de hoogste spanning. De voltmeter zal dan ongeveer 2 volt aanwijzen. Druk de knop in en hang het anker aan de elektromagneet. Draai nu de knop van de trafo naar nul terug. Het anker blijft hangen, kleven, hoewel er geen stroom door de spoel loopt. De verklaring hiervoor is dat na het uitschakelen van de stroom een klein deel van de gerichte dipolen (zie fig. 13.30) niet terugkeert in de ongeordende toestand. Een deel blijft dus gericht en dat geeft een restmagnetisme.

13.61



13.62

We weten dat we door het ompolen van de stroom die door de spoel loopt, noord- en zuidpool verwisselen. Tijdens dat omkeren van het magnetisme (het draaien van de moleculaire dipolen met 180°) moet er theoretisch een kort moment zijn dat de dipolen dwars door elkaar liggen. Op dat moment is het magnetisme volledig verdwenen. Ga dit na door de polariteit van de schakeling om te keren. We proberen het eerst op de hoogste spanning, knop van de trafo geheel naar één kant en de drukknop indrukken. Het anker valt niet af. Ook niet als we de drukknop niet indrukken. Het anker valt pas af als we enkele bouwstenen aan de ankerplaat hangen en nogmaals ompolen.

Verklaring

Het andersom magnetiseren van de moleculaire dipolen gaat niet gelijktijdig. Op een bepaald punt, waar precies weten we niet, trekt de magneet het anker weer aan voordat hij het anker op andere punten heeft losgelaten. Hangen we een groter gewicht aan het anker dan is de resterende kracht in het korte moment van het andersom magnetiseren, niet voldoende om het anker vast te houden.

2. Proef

Laten we de zaak eens wat verder onderzoeken. We draaien de trafo helemaal open en laten de spanning dan langzaam naar nul teruglopen. Zet de poolomkeerschakelaar om en laat de spanning heel voorzichtig opkomen van 0 tot 2 volt. Op ongeveer 1 volt moet de ankerplaat afvallen (gebeurt dat niet, dan moet u parallel met de twee 470Ω -weerstanden, 1000Ω schakelen om de spanning op de spoel hoger te krijgen). Als het anker reeds terugvalt bij de laagste spanning van de trafo, dan schakelen we een 470Ω - en een 1000Ω -weerstand parallel in plaats van de twee 470Ω -weerstanden.

Resultaat

De kring bestaande uit U-kern en ankerplaat wordt eerst gededemagnetiseerd. Dat gebeurt bij een spanning van ongeveer 1 volt met de tegenovergestelde polariteit. De dipolen van het ijzer liggen dan weer schots en scheef door elkaar.

3. Proef

Tenslotte onderzoeken we of de sterkte van het magnetisch veld invloed heeft op de spanning die nodig is om te demagnetiseren. Eerst leggen we weer de volle spanning aan op de spoel en bepalen we de spanning met tegengestelde polariteit die we nodig hebben om de ankerplaat te doen afvallen.

Daarna herhalen we de proef maar we draaien de trafo niet verder open dan strikt noodzakelijk is om de ijzeren kern met het anker weer te magnetiseren. Is er nu een andere spanning nodig om het anker te laten afvallen?

Resultaat

Het restmagnetisme is praktisch onafhankelijk van de voorgaande magnetisatie! Om de remanentie (zo heet het restmagnetisme) op te heffen, hebben we in onze proeven een tegenspanning nodig van ongeveer 1 V. Deze waarde heeft betrekking op de ijzersoort van onze U-kern en het anker en geldt alleen voor de speciale vorm van deze spoel. Om de remanentie van het ijzer te bepalen, moeten we in veldsterkte gaan rekenen en daar verschaft deze proef niet voldoende gegevens voor.

De omgekeerde veldsterkte die nodig is voor volledige demagnetisatie ($B = 0$) heet de koërcitiefkracht. We sluiten het onderwerp hierbij af, wie er meer over wil weten verwijzen we naar de vakliteratuur onder het hoofdstuk: hysteresislus.

13.5 Induktie

Dit hoofdstuk behandelt wat er in een geleider gebeurt, b.v. een spoel, wanneer we die door een magnetisch veld bewegen. Er loopt dan een stroom! Op dit principe berust de stroomopwekking met de dynamo.

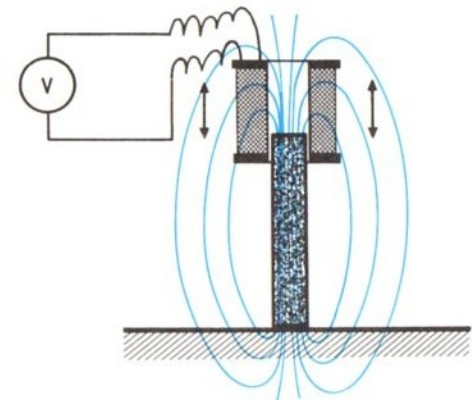
13.5.1 Induktie door beweging

Een stroom door een geleider wekt een magnetisch veld op, maar wat gebeurt er als we dat principe omkeren. Een elektrische stroom wil zeggen: een beweging van ladingdragers. Stel nu dat we een magnetisch veld hebben en een geleider die een deel is van een gesloten kring. Als we nu de geleider door het magnetisch veld bewegen, wat doen de ladingdragers dan?

Proef

In fig. 13.63 zien we de proefopstelling waarmee we een antwoord kunnen krijgen op onze vraag. Voor ons onderzoek nemen we niet een enkele korte draad, maar een hele lange: de windingen van de spoel. Van de spoel moeten we een gesloten kring maken en bovendien moeten we kunnen zien of er inderdaad iets gebeurt in de kring. We sluiten daarom de voltmeter aan op de spoel. Houd de staafmagneet vast en schuif de spoel (de geleider) over de staaf heen. De spoel beweegt dan in het stilstaande magnetisch veld van de staafmagneet (zie fig. 13.63).

Hoe sneller we de spoel bewegen hoe verder de wijzer uitslaat. Let op wanneer de wijzer uitslaat: tijdens de beweging of tijdens de onderbrekingen bij het van boven naar beneden en weer naar boven gaan?



13.63

Slaat de wijzer verder uit naarmate we de spoel sneller heen en weer bewegen? Welk resultaat krijgen we als we de spoel alleen rond het midden van de magneet heen en weer halen en niet tot de uiteinden?

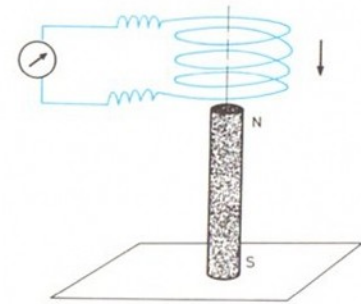
Een volgende vraag is: wanneer slaat de wijzer naar links en wanneer naar rechts uit? Stel nu dat de spoel in fig. 13.64 in de aangegeven richting naar beneden gaat en de wijzer naar rechts moet uitslaan. De vraag is dan welke aansluiting van de spoel we met de (+)pool van de voltmeter moeten verbinden. Alvorens daar een antwoord op te kunnen geven, moeten we nog een factor bepalen, namelijk de richting van de wikkeling. Met de klok mee, of tegen de klok in. Als we de spoel nemen zoals in fig. 13.63 met de aansluitingen naar links, dan zien we één draad naar het hart van de spoel lopen en één draad die aan de buitenkant begint. Deze laatste loopt van links naar rechts op de spoel, tegen de klok in. We kijken daarbij op de kant waar de ijzeren U-kern in de spoel wordt geschoven. Van binnenuit gerekend, zal de andere draad dus met de klok mee, om de spoel moeten zijn gewonden.

In tekening 13.64 is dat de draad die bovenaan begint. We bewegen nu de spoel naar beneden als aangegeven en bepalen op welke pool van de spoel de (+)pool van de voltmeter moet zijn aangesloten om een uitslag naar rechts te krijgen. Noteer welke pool van de spoel dit is.

Maakt het iets uit of we de magneet bewegen en de spoel vasthouden? Wat gebeurt er wanneer we in fig. 13.64 de staafmagneet omkeren: de noordpool beneden en de zuidpool boven?

Resultaat

Als een spoel zich beweegt in een stilstaand magnetisch veld (staafmagneet vast – spoel bewegend) of wanneer een magnetisch veld zich rond een stilstaande spoel (spoel vast – magneet bewegend) beweegt, dan zal in de spoel een stroom gaan lopen. Op de aansluitingen van de spoel wordt een spanning gemeten. Hetzelfde geldt voor een stroomkring bestaande uit één enkele draad, alleen is de opgewekte spanning veel kleiner en hebben we voor het meten er van zeer gevoelige apparatuur nodig.



13.64

Schuiven we de spoel in het midden van de magneet heen en weer, dan slaat de meter niet uit. Het gaat er kennelijk om dat de spoel tijdens de beweging zoveel mogelijk krachtlijnen snijdt. En dat is in het midden van de staaf niet het geval, de spoel wordt hier langs de krachtlijnen verschoven zonder deze te snijden.

13.5.2 De elektromotorische kracht

In vaktiaal overgezet luiden de resultaten van de proeven: een relatieve beweging tussen een geleider en een magnetisch veld induceert een spanning in de geleider. Hetgeen een stroom opwekt. Deze spanning noemt men elektromotorische kracht, afgekort *EMK*. Deze *EMK* hebben we in de voorgaande proeven met behulp van de voltmeter waargenomen.

Voor een goed begrip een *EMK* ontstaat alleen zolang de beweging plaats vindt, zodra er geen beweging meer is – de ruststand – dan is de $EMK = 0$.

De polariteit van de geïnduceerde spanning en de richting van de opgewekte stroom zijn – zoals u zelf al zult hebben vastgesteld – afhankelijk van de richting waarin de geleider zich beweegt en de richting van het magnetisch veld. Op de samenhang zullen we hier echter niet nader ingaan.

Het symbool voor de *EMK* is E , de eenheid is volt. Het verband met de andere grootheden is als volgt in een formule uit te drukken:

$$E = B \cdot l \cdot N \cdot v \text{ (in volt)}$$

waarbij: B = de magnetische fluxdichtheid in Tesla
 l = de lengte van de geleider in het magnetische veld
 N = het aantal windingen
 v = de snelheid van de geleider in m/s

13.5.3 Inductie door verandering van het magnetisch veld

Het is geenzins noodzakelijk de spoel en de daarin geplaatste magneet tegen elkaar in te bewegen om een *EMK* op te wekken die op zijn beurt weer een stroom veroorzaakt.

Het effect treedt ook op als we alleen het magnetisch veld veranderen waarin de spoel zich bevindt. We kunnen dit gemakkelijk nagaan.

1. Proef

Een verandering van het magnetisch veld verkrijgen we b.v. met de proefopstelling van fig. 13.65. Voor de overzichtelijkheid zijn slechts enkele wikkelingen getekend. Let bij het aansluiten van de voltmeter op de richting van de wikkeling.

We verkleinen nu de sterkte van het magnetisch veld waarin de spoel zich bevindt. We trekken daartoe de magneet weg. Het resultaat is dat de meter uitslaat. Naar links of naar rechts? Als de meter naar links uitslaat, verwissel dan de aansluitingen en herhaal de proef.

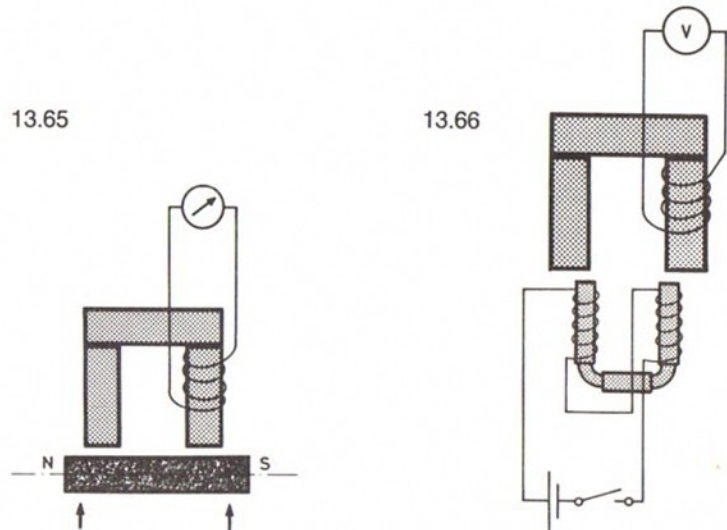
Nu gaan we het magnetisch veld vergroten. We brengen de magneet snel naar de spoel toe. Naar welke kant slaat de wijzer uit? Moeten we de aansluitingen met de voltmeter weer verwisselen om de wijzer naar rechts te laten uitslaan? En wat gebeurt er als we de magneet omkeren: rechts de noordpool en links de zuidpool? Heeft de snelheid waarmee we de magneet bewegen – oftewel het magnetisch veld veranderen – ook invloed op de uitslag van de wijzer? Anders gezegd, wordt de stroomsterkte groter als de veranderingssnelheid stijgt?

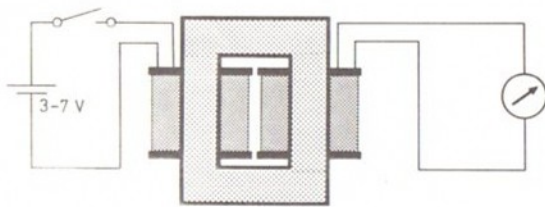
2. Proef

Wie een ft-elektromagneet heeft (hobby 3 of em) zet die in de plaats van de staafmagneet zoals in fig. 13.66 is getekend. We kunnen het magnetisch veld nu veranderen door net als in de vorige proef de U-kernen naar elkaar toe of van elkaar af te bewegen. Maar we kunnen het ook anders doen. Elke keer als we de stroom in de ft-elektromagneet in- of uitschakelen of van richting veranderen, zal ook het magnetisch veld in sterkte wijzigen.

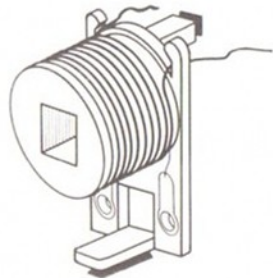
Konklusie

Uit de proeven blijkt dat het de verandering in de sterkte van het magnetisch veld is waar het op aankomt. Hoe groter de verandering en hoe sneller die plaatsvindt, des te hoger zal de geïnduceerde *EMK* zijn en de daardoor veroorzaakte stroomstoot.





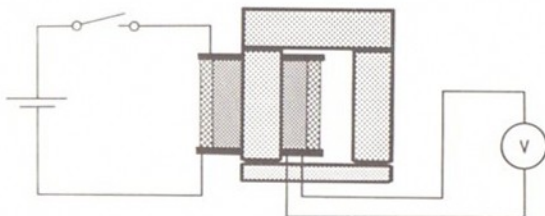
13.67



Slingeren zij bede de draad nog eens om de tap!

13.68

Draai de draaduiteinden één keer om de nok. De uiteinden zijn vertind en kunnen zo in de fl-stekkers worden aangebracht. De isolatie is gemakkelijk te verwijderen als het blanke eind is afgebroken. Houd het eind even in een vlammetje en schuur het met schuurpapier schoon, buig het om en steek het in een fl-stekkertje. Niet al te vast schroeven.



13.69

13.5.4 Inductie van een spanning bij twee spoelen

Om een gemeenschappelijke ijzeren kern wikkelt men twee elektrisch van elkaar gescheiden spoelen. Stuurst men door één van de spoelen een elektrische stroom, dan zal in de ijzeren kern een magnetisch veld ontstaan. Figuur 13.67 geeft daarvan een voorbeeld. Zolang dat veld konstant blijft, gebeurt er in de tweede wikkeling niets. Maar als we in de eerste wikkeling de stroomsterkte groter of kleiner maken dan zal ook het veld veranderen in de ijzeren kern, het aantal krachtlijnen wordt groter of kleiner. Dat veranderende veld induceert een spanning in de tweede wikkeling met als gevolg een stroom in de sekundaire (tweede) stroomkring, vooropgesteld dat deze is gesloten.

Proef

Het is niet nodig de beide spoelen gescheiden op de kern te wikkelen. We kunnen ze ook, zoals in fig. 13.68 over elkaar heen wikkelen. De tweede wikkeling maken we zelf. In hobbylabor vindt u daartoe het nodige draad waarmee u in totaal zo'n 80 windingen kunt aanbrengen. De uiteinden van de draad plakken we met een stukje plakband aan de nok (fig. 13.68). We sluiten nu de tweede (zelfgemaakte) wikkeling volgens fig. 13.69 via een maaddrukknop aan op een gelijkspanning, b.v. van de trafo die voorzien is van een $940 \mu\text{F}$ -afvlakkondensator.

Op de aansluitingen van de andere wikkeling zetten we de voltmeter. Vergeet niet de ijzeren kern af te sluiten met de ankerplaat. Elke keer wanneer we de knop indrukken of loslaten, slaat de wijzer even naar links of naar rechts uit. Overigens, de ankerplaat hoeven we alleen de eerste keer tegen de poolschoenen aan te houden, daarna blijft hij kleven dank zij de remanentie.

Resultaat

De proef toont aan dat twee wikkelingen een inductieve werking op elkaar kunnen uitoefenen. Door het inschakelen van de stroom bouwt de ene wikkeling in de spoel en de ijzeren kern een magnetisch veld op. De krachtlijnen die ontstaan snijden de andere wikkeling en induceren daarin een spanningsstoot. Loopt de stroom eenmaal met een konstante sterkte in de ene wikkeling dan verandert het magnetisch veld niet meer en zal er in de andere wikkeling ook niets gebeuren. Alleen veranderingen in de stroom geven een verandering in het magnetisch veld en wekken daarmee een reactie op in de tweede wikkeling.

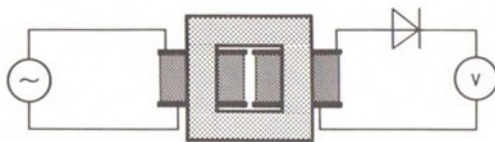
Wanneer we de eerste wikkeling op de spanningsbron hadden aangesloten en de tweede wikkeling op de voltmeter, zouden we natuurlijk ook een spanningsstoot hebben gekregen. Maar die zou te klein geweest zijn om met de voltmeter te registreren. Het gaat namelijk om de verhouding tussen het aantal wikkelingen van beide spoelen.

13.5.5 De spanningstransformatie

We willen nu nog heel kort het volgende in de wisselstroomtechniek belangrijke geval onderzoeken.

Proef

Sluit nu, met of zonder drukknop, de zelfgemaakte wikkeling aan op de wisselspanning van de trafo. Voor de voltmeter zetten we een diode, zoals in fig. 13.70 getekend.



13.70

In de tekening zijn de beide spoelen op aparte benen van de ijzeren kern getekend, dat is alleen gedaan ter wille van de overzichtelijkheid. Wanneer we nu de stroom inschakelen, wijst de voltmeter niet alleen een spanningsstoot aan, maar zolang er door de ene wikkeling een stroom loopt, zal de voltmeter een tamelijk hoge spanning aanwijzen. Wat we hebben gebouwd is een spannings-transformator, kortweg transformator of trafo.

In de praktijk hebben de transformatoren geen massieve ijzeren kern en wel om de volgende reden. Het steeds van richting en grootte wisselend veld roept ook in de kern stromen op, die wervelstromen worden genoemd. Ze betekenen een verlies aan energie. Om nu de wervelstromen te beperken, bestaat de kern van de transformator uit dunne, van elkaar geïsoleerde platen die op elkaar worden geperst.

13.5.6 Zelfinductie

Inductie treedt niet alleen op tussen twee gescheiden spoelen of wikkelingen. Ook de aparte windingen van elke spoel beïnvloeden elkaar. De verandering van het magnetisch veld wekt ook in de spoel zelf een spanning op. Het verschijnsel heet zelfinductie.

Er ontstaat een tegen-EMK die de spanning tegenwerkt en de zelfinductie oproept. Anders gezegd: de zelfinductie in een spoel wil de bestaande elektrische toestand handhaven en werkt daartoe de verandering tegen.

Als op een spoel plotseling een spanning wordt aangesloten, dan ontstaat een tegen-EMK die voorkomt dat de stroom onmiddellijk z'n volle sterkte bereikt. Omgekeerd, als we de stroom opeens uitschakelen ontstaat er ook een tegen-EMK die er nu voor zorgt dat de stroom niet ineens wegvalt, maar langzaam afneemt.

De hoogte van de tegen-EMK hangt onder andere af van de snelheid waarmee de magnetische flux verandert. Daar het uitschakelen een zeer snelle fluxverandering veroorzaakt, kan in een spoel een zeer hoge spanning ontstaan, met als vervelende bijkomstigheid een vonk tussen de contacten. Er zijn ettelijke technische trucjes om dergelijke spanningspieken onschadelijk te maken. Hobbylabor 2 zal er een aantal behandelen.

13.6 Het belangrijkste over spoelen

13.6.1 De zelfinductie

Bij een condensator spreken we van z'n capaciteit, bij een spoel van de zelfinductie met als symbool „L“. De eenheid is de henry afgekort „H“.

Voor de zelfinductie geldt:

$$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l} \text{ (H)}$$

N^2 = het kwadraat van het aantal windingen

A = het oppervlak

l = gemiddelde lengte van de krachtlijnen

Deze drie grootheden zijn bepalend voor de spoel.

Nu is $\mu_0 \cdot \mu_r = \mu$ een grootheid die we voor de hobbylaborspoel kunnen veranderen: met of zonder ijzere kern of een gedeeltelijke kern. Ook in de elektronica worden wel spoelen toegepast met een vast aantal windingen en een verstelbare ijzere kern, waarmee de gewenste zelfinductie is in te stellen.

De zelfinductie ligt voor onze spoel, zonder kern, op ongeveer 300 mH en met gesloten kern rond de 1 H. In de praktijk zijn onderstaande, afgeleide eenheden gebruikelijk.

Afgeleide eenheden:

$$1 \text{ mH} = 0,001 \text{ H}$$

$$1 \text{ } \mu\text{H} = 0,001 \text{ mH} = 0,000001 \text{ H}$$

13.6.2 Schakelsymbool

Als symbool in schakelingen bevat de Engelse literatuur voor een deel de tekening van fig. 13.71. Gaat het om een spoel met kern, dan komt er een streep onder. In het kader van de normalisatie heeft het symbool in de nieuwe Duitse norm de vereenvoudigde vorm gekregen als in fig. 13.72. In Nederland wordt het Engelse symbool gebruikt vgl. Norm NEN 5152.



13.71



13.72



13.6.3 Combineren van spoelen

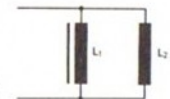
Verschillende spoelen in serie (zie fig. 13.73) hebben een totale zelfinductie van:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$



13.73

13.74



Schakelen we twee spoelen parallel, dan is de totale zelfinductie:

$$L = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

De zelfinducties bij combinaties van spoelen verhouden zich tegenovergesteld als de capaciteiten van condensatoren in gekombineerde schakelingen.

13.7 De spoel als wisselstroomweerstand

Een spoel bestaat uit een aantal windingen die een Ohmse weerstand vormen. De waarde daarvan kunnen we met de bekende methode bepalen. Stel nu, dat er een wisselstroom door de spoel loopt, de magnetische flux verandert dan voortdurend. Het betekent ook dat er door de zelfinductie naast de Ohmse weerstand R_L een weerstand bij komt. Het is de zogeheten inductie reactantie of inductieve weerstand X_L .

Deze is met de volgende formule te berekenen:

$$X_L = 2 \pi \cdot f \cdot L$$

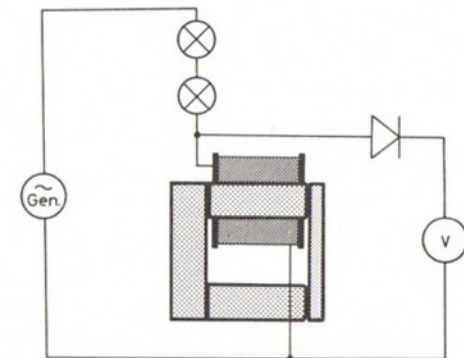
De reactantie stijgt met de groter wordende zelfinductie. De ijzeren kern meer of minder in de spoel schuiven beïnvloedt eveneens de weerstand in de wisselstroomkring. Uit de formule volgt ook, dat de reactantie stijgt als de frekwentie f groter wordt. Een spoel gedraagt zich daarmee precies tegenovergesteld als een condensator, waarvan de capacatieve reactantie daalt als de frekwentie stijgt.

Hoe R_L en X_L samengevoegd moeten worden om de totale weerstand in de wisselstroomkring te berekenen, zullen we nu niet verder behandelen.

Proef

We zetten de schakeling volgens fig. 13.75 op en sluiten deze aan op de wisselspanning van de trafo. Beide lampjes branden zwakjes. Met de voltmeter – in serie met een diode – kunnen we de deelspanning op de spoel niet exact aflezen, wel kunnen we de hoogte er van vergelijken met de deelspanning op beide lampen. Ga na dat de wisselstroomweerstand van de spoel veel hoger is met anker dan zonder anker. Maak een tabelletje en noteer daarin de totale spanning en de deelspanningen in verschillende situaties, met kern, zonder anker; met kern en anker.

De wisselstroomweerstand is ook te berekenen uit de verhouding van de deelspanningen. De weerstand van de lampen bedraagt 100Ω . Meet tevens de deelspanningen als de schakeling wordt aangesloten op de niet-afgevlakte spanning en daarna eveneens op de met een $940 \mu\text{F}$ -condensator afgevlakte en gelijkgerichte spanning.



13.75

13.8 De spoel in een magnetisch veld

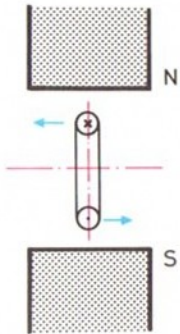
13.8.1 De stroomvoerende geleider in een magnetisch veld

Zoals we reeds weten is er een magnetisch veld rond een geleider waar een stroom doorheen loopt. Als een dergelijke geleider zich met zijn veld in een ander magnetisch veld bevindt, b.v. dat van een permanente magneet, dan moeten de beide velden op elkaar inwerken. Gesteld dat de geleider beweegbaar is, dan zal het magnetisch veld – en daarmee de geleider – een positie gaan innemen waarbij de beide velden elkaar zo weinig mogelijk beïnvloeden. De richting van de beweging hangt af van de richting die het vaste magnetische veld heeft en van de stroomrichting in de geleider. In fig. 13.76 zien we een dergelijke opstelling. De stroomkring wordt door het papier loodrecht gesneden. Het kruisje in het cirkeltje geeft aan dat de stroom hier als het ware van boven naar beneden door het papier heengaat. De punt in het cirkeltje betekent dat de stroom van onder het papier, er doorheen naar boven gaat. (zie ook fig. 13.41).

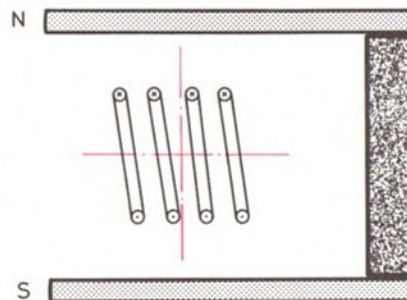
De geleider kan nu draaien op het kruispunt van de rode lijnen. Als de stroom nu loopt zoals dit kruisje en de punt aangeven, dan draait de geleider tegen de klok in, zoals de pijltjes aanwijzen.

Proef

We vervangen de enkele draad nu door een spoel (fig. 13.77) en kunnen daarmee het experimentele bewijs leveren.



13.76



13.77

De toevoerdraden naar de spoel zijn nogal stug en daarom voorzien we de spoel van de ijzeren kern als aangegeven in fig. 13.78.

Daarmee wordt het magnetisch veld van de spoel versterkt.

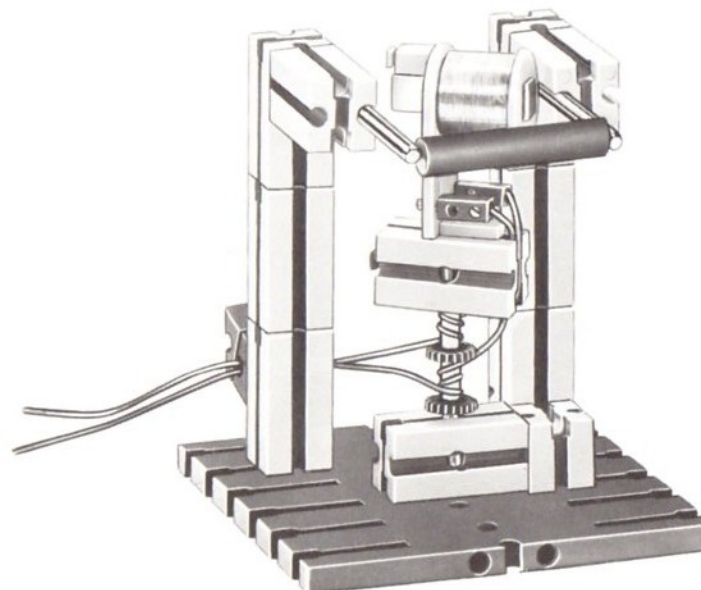
In fig. 13.79 zien we het complete model. De toevoerdraden wikkelen we nog een paar keer om de as (niet zo strak als in 13.79). Beide draden wikkelen we in tegengestelde richting, de spoel kan zich dan, als er geen stroom loopt, precies met de kern loodrecht op de permanente magneet, opstellen.

We zetten een gelijkspanning (0-6 V) op de spoel, zodat er een elektromagnetisch veld ontstaat. Zoals in het voorgaande beschreven zal de spoel dan – al naar de stroomrichting – naar de ene of de andere kant draaien. Hoe hoger de spanning des te sterker de stroom en de kracht die de spoel doet draaien met als gevolg een grotere afwijking van de ruststand. Schakelen we de stroom uit, dan zullen de in een spiraal gewikkelde toevoerdraden de spoel in de ruststand terug willen trekken. Dit lukt niet helemaal omdat de wrijving in de lagers vrij groot is.

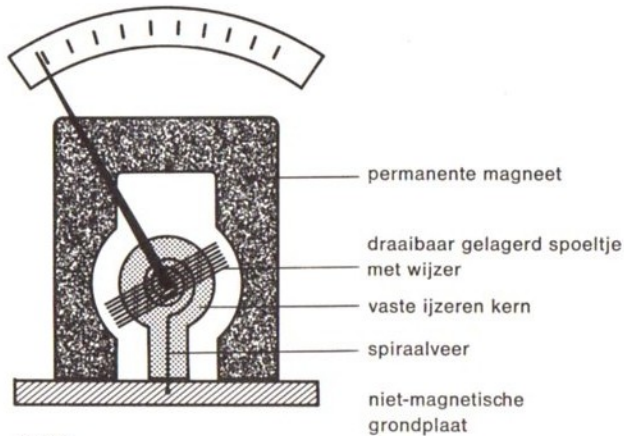


13.78

13.79



13.8.2 Het draaispoel-meetinstrument



13.80

(Vergeleken met fig. 13.79 is deze afbeelding 180° gedraaid.)

Een draaispoelmeter bestaat uit een permanente magneet met twee poolschoenen en een draaibaar gelagerde spoel, zoals in fig. 13.80 afgebeeld. De spoel heeft de vorm van een raampje. De stroomtoevoer geschiedt via spiraalveren. Deze zorgen er bovendien voor dat de spoel en de daarmee vast verbonden wijzer steeds naar de uitgangsstand terugkeren. Dit is de ruststand oftewel de nulstand, waarbij er geen stroom door de spoel loopt. Om de werking te verhogen is tussen noord- en zuidpool van de permanente magneet een ijzeren kern geplaatst waar het spoelraampje omheen draait. De spoel beweegt zich in de luchtspleet tussen magneet en kern. Zodra er nu een stroom door de spoel loopt, ontstaat er een magnetisch veld. Het raampje met de wijzer gaat nu draaien tot het draaimoment dat de kracht levert even groot is als het tegenovergestelde moment dat de beide spiraalveren leveren.

De draaiingshoek is evenredig met de stroomsterkte in de spoel. Als we, zoals bij de ft-voltmeter, geen lineaire schaal wensen, dan moet de luchtspleet tussen magneet en kern met de wel gewenste schaal in overeenstemming worden gebracht.

Het zal nu ook meteen duidelijk zijn dat we met een dergelijke meter geen wisselspanning resp. stroom kunnen meten.

13.8.3 Weekijzer meetinstrument

Met een zgn weekijzer meetinstrument kunnen we een wisselstroom wel meten. Het principe van dit instrument is met de hobbylaborspool duidelijk te maken.

Proef

We nemen een stukje papier van ongeveer 15 x 25 mm, rollen dat op en plaatsen het in de holte van de spoel, zoals getekend in fig. 13.81. Verder leggen we 2 spijkers van 1 mm dik en hoogstens 15 mm lang in het papieren kokertje. De staafjes ijzer kunnen we ook verkrijgen door ze van een paperclip af te knippen met een tangetje.

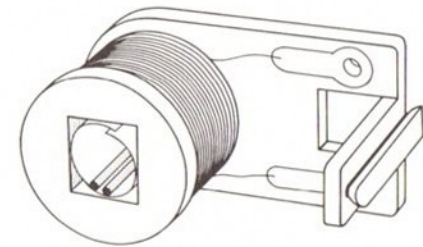
Wat zullen de staafjes doen als er door de spoel een gelijkstroom loopt? En wat gebeurt er als er een wisselstroom doorheen gaat?

Resultaat

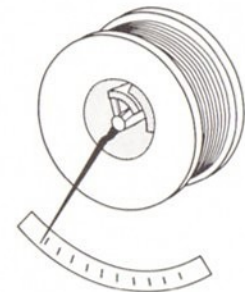
Aan de uiteinden die tegen elkaar liggen, ontstaan gelijknamige polen, dus zullen de staafjes elkaar afstoten. De afstotende krachten worden groter naarmate het magnetisch veld van de spoel sterker wordt. Dat veld is weer afhankelijk van de stroomsterkte.

Het betekent dat de afstand tussen de staafjes een maat is voor de de stroomsterkte. U kunt dit zelf gemakkelijk nagaan door weerstanden van verschillende grootte in serie met de spoel te schakelen. De wisselstroom zal weliswaar in de staafjes een wisselend magnetisch veld opwekken, zodat het magnetisme van de staafjes met de frekwentie van richting verwisselt, maar dat gebeurt in beide tegelijk. Het resultaat is dat zij elkaar toch afstoten en dat hun afstand een maat is voor de gemiddelde waarde van de wisselstroom die door de spoel loopt.

Op dit principe berust het weekijzer meetinstrument, zoals getekend in fig. 13.82. Het ene staafje – een stukje ijzer – is in de spoel gemonteerd, het tweede is draaibaar gelagerd en voorzien van een wijzer. Deze keert ook hier automatisch in de nulstand terug door twee niet-magnetische spiraalveren.



13.81



13.82

14 Het reedrelais

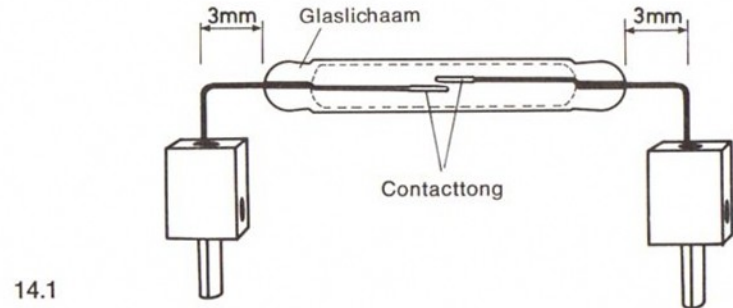
Het onderwerp relais komt uitgebreid aan de orde in de „Experimenten en Modellen“ boeken 3-1 en 3-2. Deze behandelen een aantal praktische toepassingen en bespreken vele, interessante modellen. We zullen ons in dit boek dan ook alleen bezig houden met een relais dat in de moderne techniek steeds meer wordt toegepast: het Reedrelais (spreek uit: Ried-relè).

14.1 Het Reedkontakt

Misschien heeft u zich al eens afgevraagd waar dat kleine glazen buisje in hobbylabor toch voor diende. Aan elke kant ziet een draad met een ft-stekker. Het glazen buisje is een Reedkontakt.

14.1.1 De konstruktie van het reedkontakt

In fig. 14.1 is de konstruktie schematisch weergegeven. Het buisje bevat twee kontakttongen waarvan de uiteinden elkaar overlappen zonder elkaar te raken. De tongen zijn gemaakt van zacht magnetisch ijzer. De tongpunten zijn voorzien van een dun laagje Rhodium, een edelmetaal. Het voorkomt het „klevan“ van de kontakten.



In het glazen buisje is verder ter beveiliging een gas gepompt, voornamelijk stikstof. De druk in het buisje is iets hoger dan die van de buitenlucht. Het gas onderdrukt het ontstaan van vonken tussen de kontaktpunten.

Door vonken verbranden de kontaktpunten en dat bekort hun levensduur. Ook het laagje Rhodium biedt bescherming tegen het inbranden van de kontaktpunten. Rhodium is een edelmetaal, hetgeen betekent dat het geen chemische verbindingen aangaat met andere stoffen. En verbranden is niets anders dan een chemische reactie van een stof met zuurstof.

Daarnaast is Rhodium zeer hittebestendig. In fig. 14.2 is het symbool getekend voor een Reedkontakt dat in de rusttoestand open staat en in de eindtoestand gesloten is. Een dergelijk kontakt heet maakkontakt. Het symbool kennen we al, het Reedkontakt is immers een soort van drukknop die een stroomkring sluit zolang we de knop ingedrukt houden. Soms wordt daarom ook wel eens de naam sluiser of sluitkontakt gebruikt.



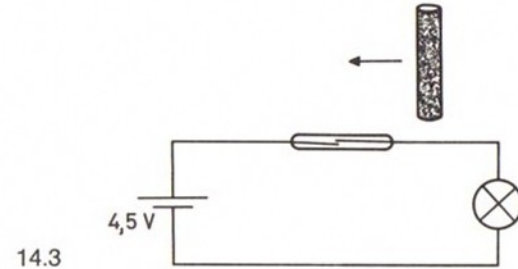
Het Reedkontakt bedienen we met een magnetisch veld. Hoe dat gaat zullen we nu onderzoeken.

14.1.2 Proeven met het reedkontakt

De draden van het Reedkontakt mogen in geen geval vlak naast het glas worden omgebogen. Ze kunnen dan gemakkelijk afbreken. De afstand tussen het buisje en de bocht in de draad moet minstens 3 mm zijn (zie. fig. 14.1).

1. Proef

We bouwen de schakeling op zoals in fig. 14.3 weergegeven. In plaats van het symbool volgens 14.2, hebben we het glazen buisje getekend om verwarring te voorkomen met een maakdrukknop.

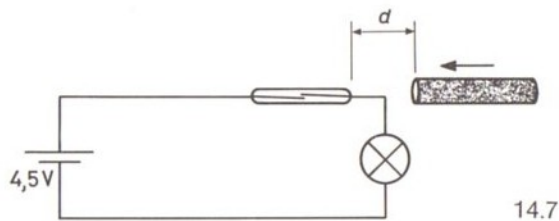
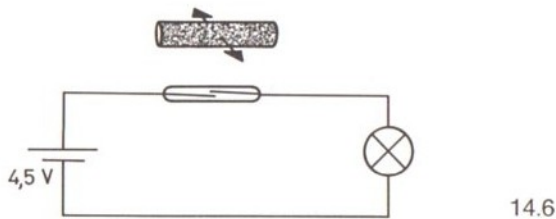
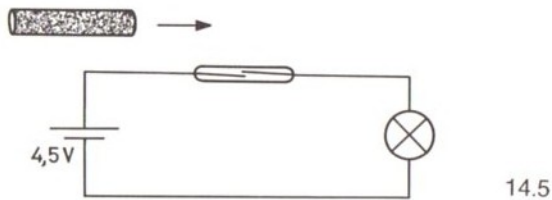
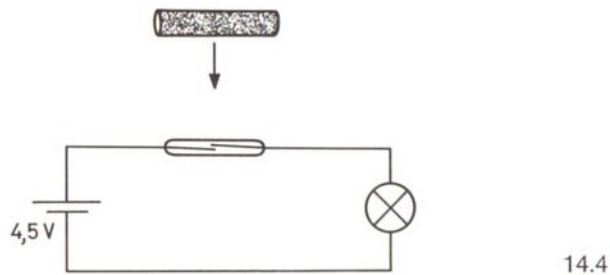


We bewegen het ene eind van de staafmagneet nu langs het glazen buisje. Eenmaal van rechts naar links (zie fig. 14.3) en eenmaal van links naar rechts. Wat doen de kontaktpunten? En wat zal er gebeuren als we de magneet precies boven het midden van de buis houden, loodrecht boven de tongpunten op een afstand van ongeveer 1 cm?

Resultaat

Als we met een pool van de magneet – onverschillig welke – een uiteinde van het buisje tot op ongeveer 2 cm naderen, dan wordt het kontakt gesloten en gaat het lampje branden. Precies in het midden echter, kunnen we de magneet boven de kontakttongen brengen, zonder dat er iets gebeurt. Het kontakt blijft openstaan. De verklaring is dat de beide tongpunten nu dezelfde magnetische pool krijgen en elkaar daardoor afstoten.

De konklusie luidt dat er een zone is waarin het kontakt niet sluit als we de ene pool van een staafmagneet op een afstand van 1-2 cm van het buisje brengen.



2. Proef

We naderen het Reedkontakt nu, zoals in fig. 14.4 is getekend, met beide polen. Wat gebeurt er nu en hoe groot is de afstand tussen magneet en kontakt op het moment dat het kontakt sluit? Vergelijk het resultaat met dat van proef 1.

Resultaat

Het kontakt sluit nu reeds als de magneet nog op een veel grotere afstand is dan in proef 1. Beide polen kunnen nu hun invloed doen gelden op de kontakttongen die met tegengestelde polen worden gemagnetiseerd en elkaar veel sterker aantrekken.

3. Proef

We bewegen de magneet nu op een hoogte van ongeveer 2 cm, evenwijdig langs het kontakt, zoals in fig. 14.5 aangegeven. Is er ook nu een gebied waarin het kontakt niet sluit? U zult constateren dat het kontakt nu heen en weer gaat: open, dicht, open, dicht, enz.

4. Proef

Zoek nu uit hoe de magneet langs het kontakt moet worden bewogen om het kontakt één keer – en niet meer dan één keer – te doen sluiten.

Resultaat

De magneet moet volgens fig. 14.6 dwars over het Reedkontakt bewegen op een afstand van maximaal 25 mm.

5. Proef

Figuur 14.7 laat nog een andere mogelijkheid om het kontakt te sluiten. Als we het langzaam met de magneet naderen, dan zal het kontakt op een bepaalde afstand d dicht gaan, waarna het lampje begint te branden.

We bewegen de magneet langzaam in de richting vanwaar hij gekomen is. Hoe groot is nu de afstand d waarbij het lampje uitgaat? Zijn beide afstanden even groot? Herhaal de proeven drie- of viermaal.

Resultaat

Het blijkt dat de afstand d tussen contact en magneet waarbij het contact sluit (lampje brandt) aanzienlijk kleiner is dan de afstand d waarbij het contact zich opent (het lampje gaat uit). Het Reedkontakt sluit en opent zich onder invloed van een magnetisch veld, in plaats van de afstand d mogen we dus ook spreken van de magnetische kracht die het open- en dichtgaan van het contact bewerkstelligt.

We kunnen een en ander als volgt formuleren: de magnetische kracht voor het sluiten van het contact is groter dan die waarbij het contact opengaat. Anders gezegd: de kracht nodig om het contact te sluiten is groter dan de kracht die nodig is om het contact gesloten te houden.

Slotkonklusie

Dat de kracht om het contact te sluiten groter moet zijn, is te verklaren met wat in hoofdstuk 13.4.5 is besproken. De luchtspleet tussen de beide kontaktpunten heeft een magnetische weerstand die moet worden overwonnen. Wanneer de beide tongen eenmaal kontakt hebben, is de magnetische weerstand kleiner; er is dan minder kracht nodig oftewel een minder sterk magnetisch veld. Hetgeen betekent dat de afstand d (fig. 14.7) groter mag worden. Zodra de afstand te groot wordt, is het veld niet sterk genoeg meer om de tongpunten op elkaar te houden met als gevolg dat het contact opengaat.

In het volgende hoofdstuk komen we hier nog op terug.

Proeven met fischertechnik

Het Reedkontakt is zo gekonstrueerd dat het precies in de groef van de ft-bouwsteen past, zoals fig. 14.8 laat zien.

Om te voorkomen dat het kontakt uit de groef glijdt, wikkelen we er van tevoren een dun stukje papier om heen, of we plakken het met een stukje zelfklevend plakband vast.

14.8



Op deze wijze kunnen we het Reedkontakt in alle ft-modellen toepassen wanneer een signaal moet ontstaan als een magneet (of een magnetisch veld) het kontakt passeert. Er kan dan b.v. een lampje oplichten. Met een dergelijke magnetische schakelaar kunnen we b.v. aangeven of een lift beneden of boven is of net langskomt.

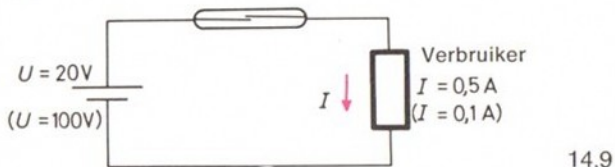
Een andere toepassing kan zijn dat een trein die over het in de rails ingebouwde Reedkontakt rijdt, een signaal geeft.

Doos hobby 3 biedt een scala aan mogelijkheden om het Reedkontakt te gebruiken.

14.1.3 Maximale belasting

Wat we natuurlijk ook moeten weten is hoe zwaar kunnen we het Reedkontakt belasten? Welke stroomsterkte kunnen de kontaktpunten hebben? Het maximale vermogen P_{max} bedraagt 10 watt, de hoogste gelijkspanning 100 V. Dit is de hoogste spanning die op de geopende kontakttongen mag staan. De max. toelaatbare stroomsterkte bij konstant gebruik bedraagt 500 mA (= 0,5 A).

Een en ander houdt in dat bij het openen van een Reedkontakt, waar op dat moment een stroom van $I = 0,5 \text{ A}$ doorheen loopt, een spanning van maximaal $U = 10 \text{ W} : 0,5 \text{ A} = 20 \text{ V}$ mag optreden (fig. 14.9).

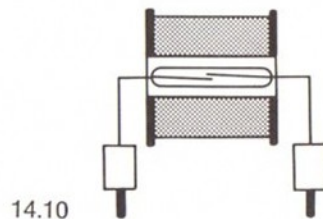


Bedraagt daarentegen de werkspanning $U = 100 \text{ V}$, dan mag er worden geschakeld met een stroomsterkte van hoogstens $10 \text{ W} : 100 \text{ V} = 0,1 \text{ A}$ ($= 100 \text{ mA}$).

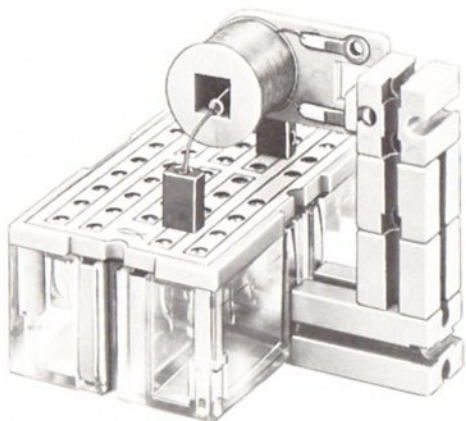
Het Reedkontakt kan dan ook zonder meer worden gebruikt voor het schakelen van de grootste ft-motor, daar deze bij een spanning van 8 V ongeveer 200 mA afneemt.

14.2 Reedkontakt + Spoel = Reedrelais

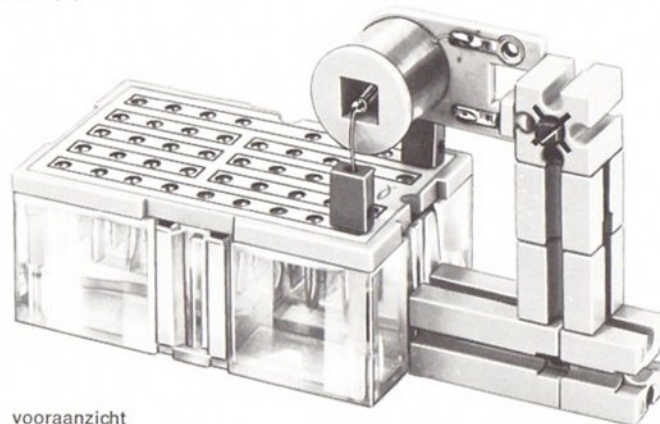
We kunnen een Reedkontakt natuurlijk ook met het magnetisch veld van een spoel bedienen. Het kontakt plaatsen we daartoe heel simpel in het gat van de spoel. Fig. 14.10 en 14.11 laten zien hoe we dat doen met behulp van het MSP.



14.11 (a)
zijaanzicht



14.11 (b)



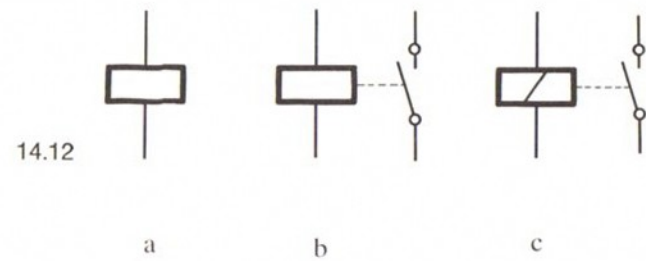
Alvorens met de proeven te beginnen, eerst iets over het symbool voor een relais. Een spoel, gebruikt om een relais te schakelen, wordt in schema's weergegeven met het symbool van fig. 14.12 (a) Het al behandelde symbool voor een maakkontakt (sluiter) wordt met een gestreept lijntje verbonden met het symbool voor een spoel, zie fig. 14.12 (b). Dit geeft aan dat de spoel zorgt voor het openen en sluiten van het kontakt. Bij een Reedrelais gebeurt dat direct door het opgewekte magnetische veld (fig. 14.10).

In de andere relais werkt het magnetische veld indirect, namelijk via een mechanische omweg: het anker dat al of niet wordt aangetrokken.

In fig. 14.12 (c) zien we het symbool voor dergelijke elektromechanische relais.

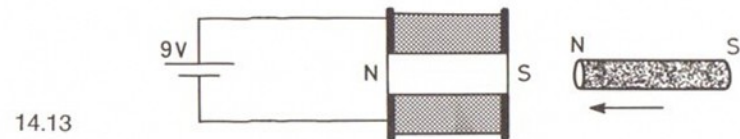
U zult al spoedig merken dat het Reedrelais hogere eisen stelt wat betreft de vaardigheid in het experimenteren – het relais neemt nogal wat plaats in.

Voor de volgende proeven is het noodzakelijk dat we de magnetische polen van de spoel kennen bij de verschillende aansluitingen op de spanningsbron.



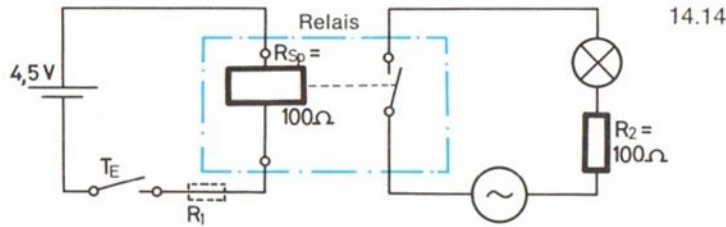
Proef

We sluiten de spoel aan op een spanning van ongeveer 9 V, zoals getekend in fig. 14.13. We naderen de spoel nu met het gemerkte uiteinde (de noordpool) van de staafmagneet. Als de magneet de spoel wordt ingetrokken, dan is het uiteinde van de spoel dat naar de magneet gericht is, een zuidpool. We merken de noordpool en de (+) aansluiting van de spoel met zelfklevende etiketten. Zijn de polen van spoel en magneet gelijk, dan moeten we de magneet met geweld in de spoel drukken. Aan de andere kant vliegt de magneet er weer net zo hard uit, hetgeen een verbluffend effect geeft.



14.2.1 De elektromagnetische schakelaar

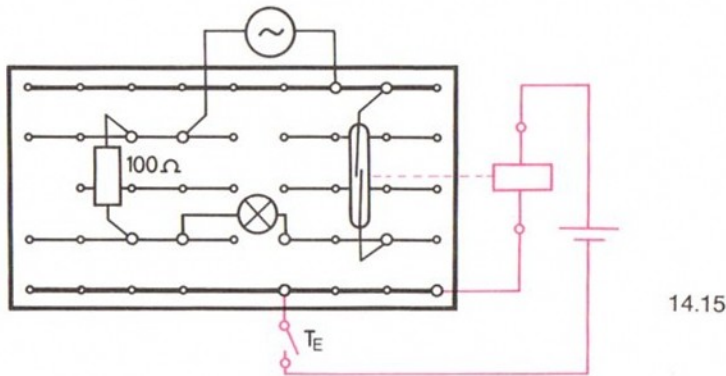
In het vorige hoofdstuk hebben we kennis gemaakt met het magnetisch bediende contact en enkele toepassingen daarvan. We gaan nu het elektromagnetisch bediende Reedkontakt, het eigenlijke Reedrelais, bouwen.



Proef

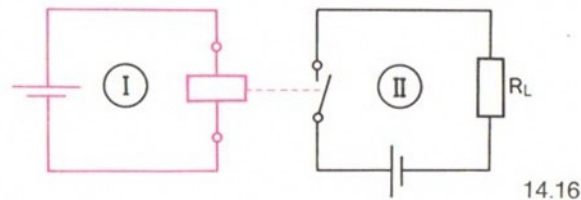
In fig. 14.14 zien we de schakeling, terwijl fig. 14.15 het stekkerschema geeft. Als we de spoel, die bij een relais bekrachtigingsspoel heet, via T_E op de spanningsbron aansluiten, dan zal het Reedkontakt en daarmee de wisselstroomkring waarin het lampje ligt, worden gesloten. Het lampje licht op. De weerstand $R_2 = 100 \Omega$, verhindert dat het lampje overbelast wordt.

Laten we T_E los, dan verdwijnt het magnetisch veld van de spoel, het Reedkontakt valt af en onderbreekt daarmee de wisselstroom, het lampje gaat uit.



Slotconklusie

Het relais is een elektromagnetische schakelcomponent die twee verschillende stroomkringen niet-geleidend met elkaar koppelt.



Bekrachtigingskring en belastingskring

In figuur 14.16 zien we het verband nog eens duidelijk weergegeven. Stroomkring I noemen we de bekrachtigingskring – de spoel is er in opgenomen. Een andere naam is stuurkring, omdat hij stroomkring II opent en sluit, of bestuurt.

In stroomkring II die in ons geval wordt gevoed door een wisselspanning, ligt de belastingsweerstand. Vandaar dat we deze kring ook wel belastingskring noemen. Beide kringen zijn elektrisch volledig van elkaar gescheiden, I is een gelijkstroom- en II een wisselstroomkring in ons voorbeeld.

Het vermogen dat de bekrachtigingsspoel afneemt om het relais te doen opkomen, is betrekkelijk gering. Door de verbruiker in de te schakelen kring kan een veel grotere stroom lopen. De stroomsterkte hangt alleen af van het max. schakelvermogen van het contact, in ons geval is dat 10 watt.

Met een relais kunnen we met behulp van een betrekkelijk kleine hoeveelheid energie veel grotere vermogens besturen. In alle takken van de elektronika worden dan ook relais toegepast. Van het miniaturrelais in de elektronika tot aan het beveiligingsrelais in de sterkstroomtechniek, waarbij al naar de uitvoering, stromen van honderden ampères moeten worden geschakeld.

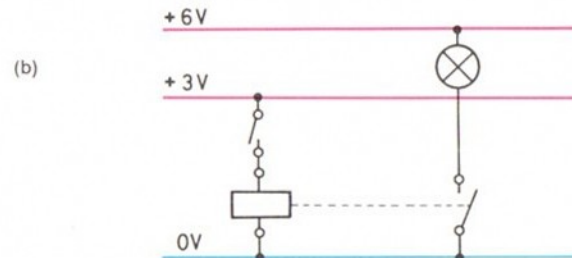
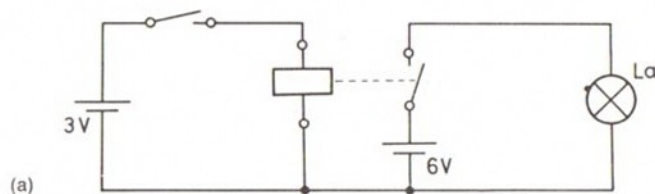
Gemeenschappelijk vergelijkingspunt (potentiaal)

Stel dat er twee gelijkstroomkringen zijn, waarvan de een de ander met een relais bestuurt, in zo'n geval mogen we zonder meer twee polen (b.v. de beide minpolen) van de spanningsbron combineren, hetgeen de opbouw van de schakeling vereenvoudigt. Beide kringen hebben zogezegd een gemeenschappelijk nulpotentiaal.

Proef

In fig. 14.17 is twee keer een schema getekend dat qua schakelingsfunctie dezelfde betekenis heeft. Voor de bron in de bekrachtigingskring gebruiken we twee batterijen van 1,5 V en voor de belastingskring nemen we de gelijkstroom van trafo mot. 4. Voor La gebruiken we een lampje uit hobby 3 of em. Na controle of de

schakeling goed functioneert bouwen we deze zodanig om dat de beide (+)polen van de bronnen het gemeenschappelijk „potentiaal“ vormen. Ontwerp van tevoren het schema zoals in fig. 14.17(b) is gedaan voor het geval dat de (-)pool het gemeenschappelijk potentiaal is.

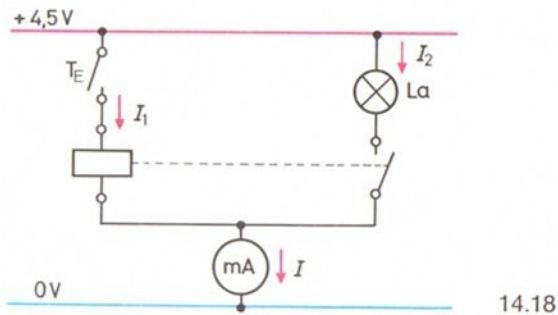


14.17

In vele gevallen kunnen we de schakeling nog verder vereenvoudigen door beide stroomkringen met één bron te voeden.

Proef

Figuur 14.18 toont het schema aan de hand waarvan we de schakeling opbouwen. Controleer daarna of de schakeling goed functioneert. Welk nadeel heeft deze schakeling? Meet de stroom I !



14.18

Resultaat

Voordeel: de schakeling is eenvoudiger en overzichtelijker

Nadeel: het voordeel twee verschillende stroomkringen elektrisch volkomen gescheiden met elkaar te kunnen koppelen is nu verloren gegaan.

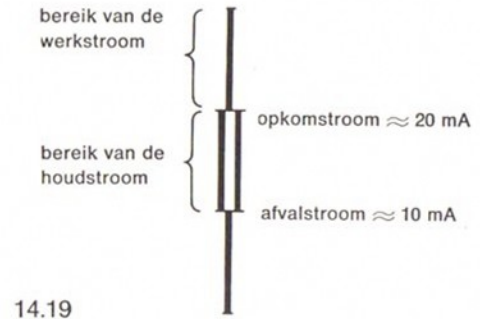
Voor een dergelijke schakeling hebben we geen relais nodig, maar kunnen we net zo goed een maakdrukknop nemen. Bovendien belasten we de spanningsbron veel zwaarder, omdat deze nu twee kringen van stroom moet voorzien.

14.2.2 De belangrijkste gegevens van een relais

Opkomstroom

De opkomstroom is de stroom die op z'n minst nodig is om het relais te doen opkomen, hetgeen betekent dat het relais voldoende kracht heeft om de contacten te sluiten.

Voor ons zelfgebouwde Reedrelais is $I_{op} \approx 20 \text{ mA}$, zie fig. 14.19. De omstroming Θ (of stroomwindingsdichtheid, zie hoofdstuk 13.4.4) die behoort bij de vereiste sterkte van het magnetisch veld is $0,02 \text{ A} \cdot 1500 \text{ W} = 30$ ampèrewindingen.



14.19

Houdstroom

Dit is de minimale stroomsterkte nodig om het relais in opgekomen toestand (kontakt gesloten in ons voorbeeld) te houden.

Afvalstroom

Als de stroom (bekrachtigingsstroom) die door de bekrachtigingsspool loopt, zo klein wordt dat het kontakt terugvalt in zijn rusttoestand, dan is de waarde van de afvalstroom bereikt. Voor ons relais is dat $I_{af} \approx 10 \text{ mA}$.

Werkstroom

Om het relais in de praktijk snel en veilig te laten werken, is de werkstroom altijd hoger dan de opkomstroom.

Schakelcyclus

Een schakelcyclus bestaat uit het één keer sluiten en verbreken van het kontakt. Reedrelais hebben in het algemeen een levensduur van verscheidene miljoenen schakelcyclussen.

Schakelsnelheid

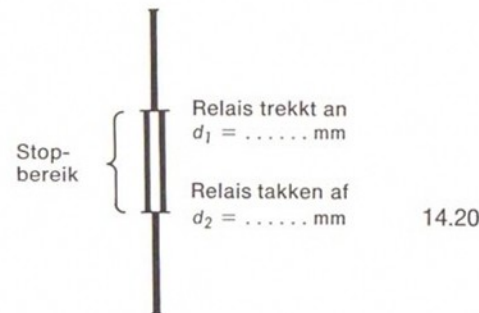
Een Reedrelais heeft geen zware mechanische onderdelen zoals andere typen relais, de schakelsnelheid is dan ook bijzonder groot. Per seconde kan het contact zo'n honderd schakelcyclussen uitvoeren. Er valt natuurlijk nog veel meer over te vertellen, maar in onze proeven is die hoge snelheid niet belangrijk en dat is de reden waarom we er hier niet verder op zullen ingaan. In de communicatietechniek speelt de schakelsnelheid echter wel een belangrijke rol.

Proef

Probeer aan de hand van fig. 14.14 te bepalen of de opgaven $I_{op} \approx 20$ mA en $I_{af} \approx 10$ mA juist zijn. We moeten daartoe voor de met streepjes aangegeven weerstand R_1 verschillende geëigende waarden kiezen.

14.2.3 Reedrelais als verbreekkontakt

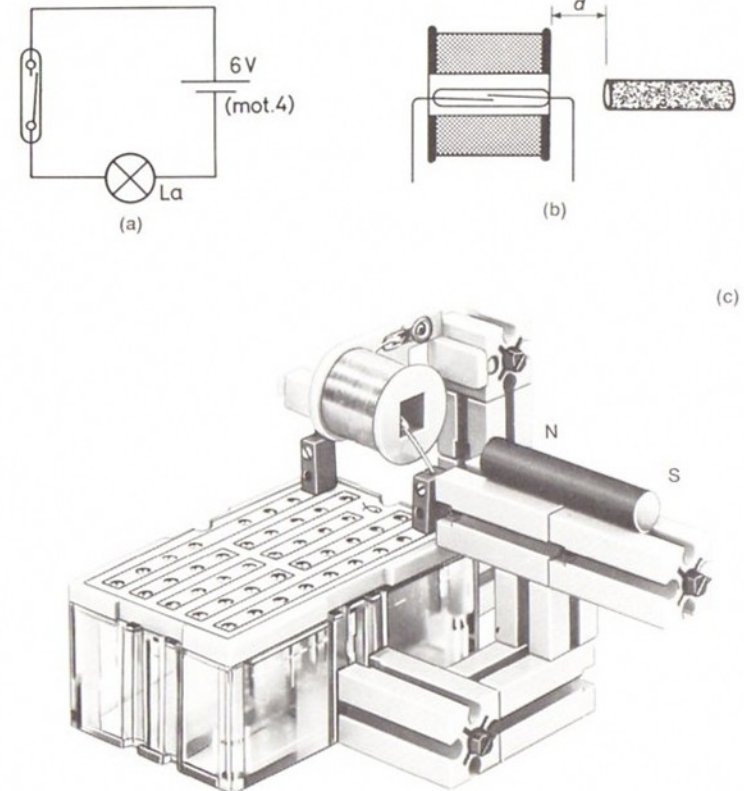
U hoeft daarvoor in hobbylabor niet naar een tweede Reedkontakt te zoeken. We kunnen het maakkontakt ook als verbreekkontakt gebruiken. Dat doen we met behulp van de staafmagneet. Ter verduidelijking is in fig. 14.20 (als in fig. 14.19) met een grafiekje weergegeven welke magnetische werking de staafmagneet uitoefent op het Reedkontakt. Overeenkomstige proeven hebben we al in hoofdstuk 14.1.2 gedaan.



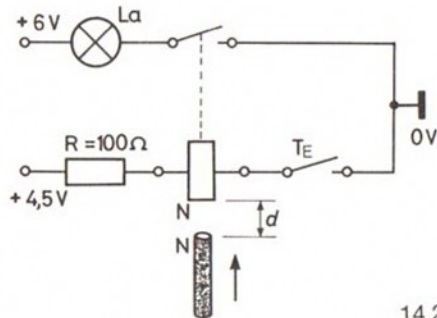
1. Proef

Figuur 14.21 geeft de proefopstelling. Afbeelding (a) toont het schema; (b) verduidelijkt wat onder de afstand d (volgens fig. 14.20) wordt verstaan en (c) laat zien hoe we een standaard voor de staafmagneet kunnen maken met enige ft-bouwstenen. Bepaal eerst de opkom- en afvalafstand d_1 , d_2 als in fig. 14.20 genoemd en noteer de gevonden waarden in die figuur.

14.21



Bouw nu de schakeling van fig. 14.22 en sluit de relaispoel zo op de batterij aan dat bij het indrukken van T_E de kant van de spoel tegenover de staafmagneet, een noordpool wordt. Schuif na het loslaten van T_E de staafmagneet zover naar de spoel toe dat het Reedkontakt sluit en het lampje gaat branden. Druk nu T_E in, wat gebeurt er?



14.22

Resultaat

Als we T_E indrukken, zal het lampje uitgaan. Laten we T_E los, dan brandt het lampje weer. In de ruststand van het relais is het Reedkontakt nu gesloten en als het relais is opgekomen, open. Met andere woorden: het Reedrelais is een verbreekkontakt geworden.

Slotkonklusie

Het resultaat wordt verkregen doordat het magnetisch veld van de staafmagneet het Reedkontakt gesloten houdt zolang de drukknop T_E niet wordt bediend.

Zetten we op de spoel via R en T_E een spanning, dan ontstaat in de spoel een magnetisch veld dat tegengesteld gericht is aan dat van de staafmagneet; wellicht ook sterker is. Het resultaat is in elk geval dat het kontakt afvalt.

2. Proef

Schuif de magneet nu tegen de spoel aan en druk T_E in.

Resultaat

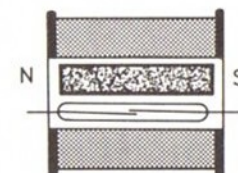
Het magnetisch veld van de spoel blijkt nu te zwak om het veld van de staafmagneet op te heffen. Het lampje blijft branden.

3. Proef

Maak het magnetisch veld sterker door de 100Ω -weerstand uit de schakeling te halen. Wat doet het lampje nu als we de knop indrukken?

Resultaat

Na het verwijderen van R uit de schakeling wordt de stroomsterkte en daarmee het magnetisch veld van de spoel, zoveel groter dat het relais weer als een verbreekkontakt funktioneert. Ook in de praktijk konstrueert men het verbreek-Reedrelais op een dergelijke wijze: de staafmagneet is dan in de spoel opgenomen zoals in fig. 14.23 getekend.



14.23

14.2.4 Relais dat zichzelf kan houden

We zetten de $100\ \Omega$ -weerstand weer in de schakeling 14.22 en draaien de staafmagneet om. Beide magnetische velden hebben nu dezelfde richting. Schuif nu de magneet zover naar de spoel toe dat de afstand kleiner is dan de afvalafstand d_2 (fig. 14.20). Druk T_E in en het lampje gaat branden, als we nu T_E loslaten, zal het lampje niet uitgaan. Dat doet het pas wanneer we de staafmagneet terugtrekken of wanneer we tussen spoel en magneet iets van ijzer brengen. Bij voorbeeld een mes of een schroevendraaier. Deze buigen het magnetisch veld af.

Slotkonklusie

Ook nu berust het resultaat op de wisselwerking tussen de magnetische velden. In het houd-bereik is het magnetische veld van de staafmagneet te zwak om het Reedkontakt te sluiten, maar sterk genoeg om een gesloten kontakt ook gesloten te houden als het veld van de spoel wegvalt. Het sluiten van het kontakt gebeurt door de knop T_E drukken, waardoor de spoel een magnetisch veld opwekt in dezelfde richting als dat van de staafmagneet. Laten we T_E los, dan zal het Reedkontakt gesloten blijven.

14.2.5 Polair relais

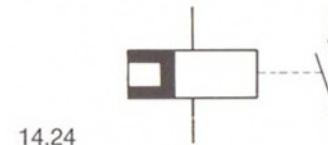
Een polair relais werkt alleen als de stroom een bepaalde richting heeft. Als de stroom in de andere richting door de bekrachtigingsspoel gaat, dan komt het relais niet op. Een dergelijk relais gaan we nu bouwen.

Proef

We draaien de staafmagneet om zodat de velden in tegengestelde richting lopen. We maken de afstand tot de spoel iets groter dan de afvalafstand d_2 (fig. 14.20). Op de knop T_E drukken heeft nu geen enkel resultaat. Het relais komt niet op en het lampje blijft uit. Pool nu de aansluitingen van de spoel om en met T_E is het relais op de normale wijze te bedienen.

Slotkonklusie

Hoewel de staafmagneet buiten het houd-bereik ligt is zijn tegengesteld gericht veld net sterk genoeg om dat van de spoel zo te verzwakken dat het niet meer in staat is om het kontakt te sluiten. Als we de aansluitingen verwisselen, wekt de spoel een magnetisch veld op dat door de staafmagneet wordt versterkt; het Reedkontakt sluit. Het veld van de magneet is nu echter niet zo sterk dat het na het uitschakelen van de bekrachtigingsspoel het kontakt kan „houden“.



14.24

Dat schakelteken voor een relais wijzen beeld 14.24.

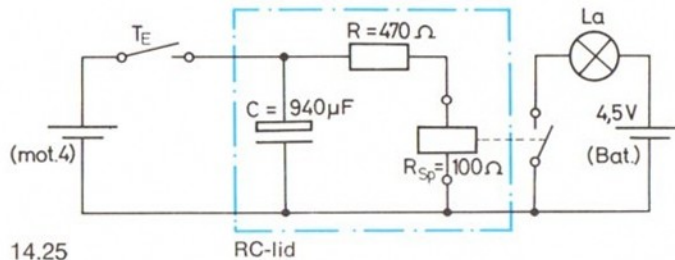
14.2.6 Relais met vertraagd afvallen

De zgn. vertragingsschakelingen spelen in de moderne besturings-techniek een belangrijke rol. In hobbylabor 3 zullen we deze schakelingen uitgebreid behandelen en er een aantal bouwen. In dit hoofdstuk geven we alleen het principe dat aan alle tijdschakelingen ten grondslag ligt.

We doen dat met het Reedrelais. Wie zich de stof van hoofdstuk 12 nog herinnert zal al wel begrepen hebben dat in elke tijdschakeling een condensator de belangrijkste rol speelt. De volgende proef is dan ook gebaseerd op de inzichten die we dank zij hoofdstuk 12.6.3 hebben verkregen.

1. Proef

In fig. 14.25 zien we de reeds bekende relaisschakeling maar met één nieuwe komponent: de condensator $C = 940 \mu\text{F}$ ($470 \mu\text{F} \parallel 470 \mu\text{F}$). Deze staat parallel met de serieschakeling van de bekrachtigingsspoel ($\approx 100 \Omega$) en de weerstand $R (= 470 \Omega)$.



14.25

RC-lid

Bouw de schakeling; voor de voeding van de bekrachtigingsspoel nemen we de gelijkstroom van de trafo. Voor de belastingskring nemen we een spanningsbron die 4,5 V levert. Wat zal het lampje doen als we T_E indrukken?

Resultaat

Bij het indrukken van T_E komt het relais op en zal het lampje onmiddellijk branden. Laten we T_E los, dan blijft het lampje nog even branden voordat het uitdooft. De condensator, weerstand R en die van de spoel vormen tezamen een RC -schakeling. Als we T_E indrukken, laadt de condensator zich op tot de spanning U . Na

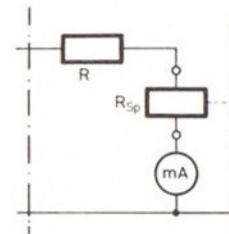
het loslaten van T_E onlaadt de condensator zich via $R + R_{sp} \approx 570 \Omega$. En dat geeft een vertraging in het afvallen van het relais.

Slotconclusie

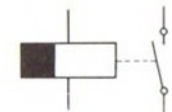
De vertragingstijd is afhankelijk van de tijdconstante τ van de RC -schakeling. In ons geval geldt $\tau = 0,00057 \text{ M}\Omega \cdot 940 \mu\text{F} = 0,54 \text{ s}$. Na ongeveer $2 \tau = 1$ seconde, is de ontladstroom beneden de waarde van de afvalstroom ($\approx 10 \text{ mA}$) gekomen; het relais valt af en het lampje gaat uit.

Moet de vertragingstijd verlengd worden, dan dienen C of R of beide groter te worden. Nu kunnen we R niet groter maken, want dan komt de stroomsterkte beneden de opkomwaarde van het relais. Dus moet C worden verhoogd. Wie een ft-gelijkrichter bouwsteen heeft kan de ingebouwde $2200 \mu\text{F}$ -condensator nemen in plaats van de beide $470 \mu\text{F}$ -condensatoren. De vertragingstijd wordt dan naar verhouding langer.

Overigens: als u de stroomsterktemeter volgens fig. 14.26 in de schakeling 14.25 opneemt, dan kunt u duidelijk zien dat het relais bij een ontladstroom van ongeveer 10 mA afvalt.



14.26



14.27

Tenslotte: de condensator in schakeling 14.25 heeft nog een andere functie: hij zal bij het indrukken van T_E tevens als afvlakcondensator werken (zie hoofdstuk 12.8). De ingangsspanning U zal derhalve ongeveer 12 V zijn. De opkomstroom is $I_{op} = 12 \text{ V} : 570 \Omega = 21 \text{ mA}$. In fig. 14.27 is het symbool getekend voor een relais met afvalvertraging.

14.3 Het Reedrelais in een wisselstroomkring

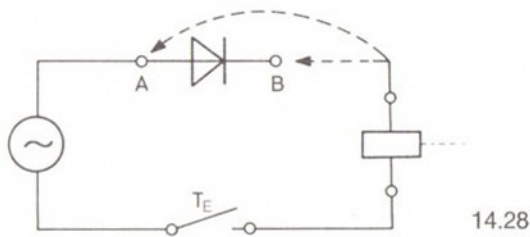
Met hobbylabor kunnen we ook enkele schakelingen opzetten die normaliter in de techniek niet worden toegepast. Een wisselstroomrelais is in de praktijk zo gekonstrueerd dat het regelmatig wisselen van richting en stroomsterkte geen invloed heeft. Een dergelijk relais zal met een wisselstroom even rustig en betrouwbaar opkomen als wanneer er een gelijkstroom wordt aangelegd. Wij willen echter het Reedkontakt rustig laten „stuiteren“ en eens kijken wat we daarmee kunnen doen.

14.3.1 Het relais als zoemer

Wat gebeurt er als we op het Reedrelais een wisselspanning zetten?

Proef

We bouwen de schakeling van fig. 14.28 en sluiten deze aan op de wisselspanning van de ft-trafo mot 4.



14.28

Eerst verbinden we de spoel met het punt A, daarna met punt B. Wat gebeurt er in beide gevallen als we T_E indrukken?

Resultaat

Als we het relais met A verbinden, direkt op de wisselspanning, zal het relais met een hogere toon zoemen dan wanneer het met punt B wordt verbonden.

Slotkonklusie

In hoofdstuk 11 (diode) en in hoofdstuk 12.8 (afvlakkondensator) is al uitgebreid behandeld wat we van de wisselstroom moeten weten om dit muzikale verschijnsel te kunnen verklaren. In een wisselstroomkring verandert het magnetisch veld van de bekrachtigingsspoel konstant in sterkte en tevens 100 keer per seconde ook van richting.

Het Reedkontakt gaat dan eveneens honderd keer per seconde open en dicht. Daar de kontakttongen niet van watten zijn gemaakt, zullen zij bij elke schakeling een geluid produceren. Door de snelheid waarmee die „geluidjes“ elkaar opvolgen, de frekwentie, ontstaat het zoemen. En wat we horen is de beroemde en beruchte netbrom. In hobbylabor 3 zullen we een methode bespreken die met behulp van een elektronische schakeling en een luidspreker de brom hoorbaar maakt.

Verbinden we het relais met punt B, achter de diode, dan horen we het brommen van 50 trillingen per seconde. De diode onderdrukt namelijk de helft van de golf, zoals we uit hoofdstuk 11 weten. Met een tweefasen gelijkrichter komen we weer op een frekwentie van 100. Hetgeen gemakkelijk is na te gaan door het relais op de gelijkspanning van mot 4 aan te sluiten.

De restgolf doet het relais weer zoemen, iets dat bij relais-schakelingen hoogst ongewenst is. Met een afvlakkondensator kunnen we de brom wegwerken. In de praktijk zal natuurlijk geen mens op het idee komen een relais als zoemer te gebruiken, hoewel andere relais zoals dat van doos hobby 3 een behoorlijk lawaai maken als we er een wisselspanning op aansluiten.

Hoe een echte mechanische zoemer werkt, is besproken in „Experimenten en Modellen“ 3-1 aan de hand van een model dat echt werkt.

14.3.2 Eenfasige gelijkrichting met een relais

Ook het gelijkrichten van een wisselstroom met behulp van een relais is technisch natuurlijk een hersenkronkel. In hoofdstuk 11 zagen we hoe dat probleem eenvoudig en goed met een diode wordt opgelost. Maar zuiver en alleen om het idee, gaan we een gelijkrichter met een relais bouwen.

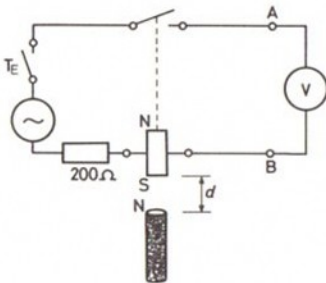
Bespreking

Een eenfasige gelijkrichter moet met het Reedrelais te bouwen zijn als het relais alleen opkomt wanneer een positieve (of een negatieve) stroomstoot door de bekrachtigingsspoel loopt. Nu dat hebben we al een keer meegemaakt in hoofdstuk 14.2.5, zie de figuren 14.21 en 14.22. De oplossing is het polair relais.

Proef

Bouw de schakeling van fig. 14.29. De afstand d tussen magneet en spoel moet eerst zo groot zijn, dat de staafmagneet het Reedkontakt niet beïnvloedt.

Als we nu T_E indrukken, dan geeft de voltmeter 0 V aan, het kontakt (zoals we aan de zoemtoon herkennen) volgt de wisselspanning en geeft deze door op de uitgangsklemmen A-B. En de voltmeter is niet geschikt voor wisselspanning. Wat gebeurt er nu als we de staafmagneet langzaam naar de spoel toeschuiven tot hij bij het Reedkontakt is?



14.29

ning en geeft deze door op de uitgangsklemmen A-B. En de voltmeter is niet geschikt voor wisselspanning. Wat gebeurt er nu als we de staafmagneet langzaam naar de spoel toeschuiven tot hij bij het Reedkontakt is?

(Mocht de wijzer van de spanningsmeter naar links uitslaan, dan draaien we de staafmagneet om.)

Resultaat

Bij de nadering van de magneet zal de voltmeter op een bepaalde afstand uitslaan. Voor een tamelijk nauwkeurig te bepalen afstand d bereikt de uitgangsspanning U_{AB} zijn hoogste waarde van net 3 V. De zoemtoon is dan evenals bij de vorige proef in een brommen overgegaan. Brengen we de magneet nog dichterbij, dan daalt de spanning zeer snel en komt plotseling de zoemtoon op. De meter wijst dan weer 0 V.

Slokonklusie

Naarmate d kleiner wordt, zal het magnetisch veld van de staafmagneet meer invloed op het Reedkontakt krijgen. De hoogste spanning wordt bereikt als de magneetvelden zo tegengesteld op elkaar inwerken, dat de fase die tegengestelde velden opwekt het kontakt niet kan sluiten, terwijl de fase met „gelijkgerichte“ velden het kontakt wel sluit. Op de uitgangsklemmen staat dan – precies als bij de gelijkrichting met behulp van een diode – een pulserende gelijkspanning.

Als we nu de magneet nog dichterbij brengen, dan zal zijn magnetisch veld zo sterk op het Reedkontakt inwerken, dat dit gesloten blijft, ook als de spoel van veldrichting verandert. Op de uitgang krijgen we dan de zuivere, niet-onderbroken, wisselspanning van de trafo.

De „gelijkrichting“ met het relais is al met al een hobbelige gelegenheid. Het mechanisch open en dicht gaan van het kontakt veroorzaakt ettelijke storingen; nog afgezien van het feit dat ook het beste kontakt door een dergelijke opeenvolging van cyclussen relatief snel versleten zal zijn.

Ook de brom is op den duur geen pretje. Kortom, praktisch is een dergelijke schakeling niet, maar als proefopstelling om aan te tonen dat onze theoretische beschouwing over het polair relais juist was, toch wel interessant.

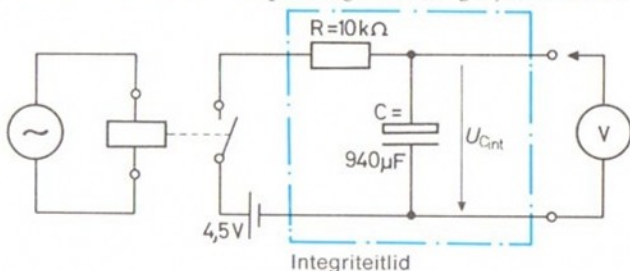
14.3.3 Integratie van snelle impulsen

Met deze laatste proef sluiten we aan op hoofdstuk 12.11.1, waarin we met schakeling 12.69 (pag. 211) relatief lange pulsen hebben geïntegreerd. In plaats van de drukknop gaan we nu het Reedkontakt toepassen dat in een wisselstroomkring met tweefasengelijkrichting 100 impulsen per seconde levert. Zo snel kan niemand een drukknop bedienen. Op de praktische waarde van deze proef zullen we niet letten. Het experiment is bedoeld om het volgende duidelijk te maken.

De spanningscurve op de uitgang van een niet-belaste integrator zal steeds meer overeenkomen met de spanningscurve die het normale opladingsproces weergeeft van een condensator in serie geschakeld met een weerstand. Beide curven benaderen elkaar meer, naarmate de schakelintervallen korter worden in vergelijking met de duur van de ingangspulsen.

Proef

Fig. 14.30 toont de proefopstelling. Het Reedrelais kunnen we bedienen met de bromspanning van de gelijkstroom die ft-rafo



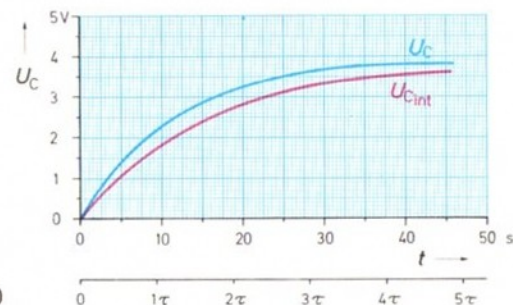
14.31

mot 4 levert. We draaien de trafo open tot het relais begint te zoe-men. Let op de spanningsmeter.

Resultaat

De wijzer van de meter loopt steeds verder naar rechts, eerst be-trekkelijk snel en dan steeds langzamer. Het spanningsverloop op de uitgang van de integrator lijkt op het spanningsverloop van een condensator die via een weerstand wordt opgeladen.

Nu is „lijken op“ een wat vage uitdrukking. In figuur 14.31 kun-nen we zien hoe het verloop van de spanning/tijdcurve U_{Cint} (op de condensator aansluitingen) overeenkomt met de curve U_C die het opladingsproces weergeeft van $C = 940 \mu\text{F}$, via $R = 10 \text{ k}\Omega$. Beide curven in diagram 14.31 zijn gemeten met een hoogohmige spanningsmeter.







14.30

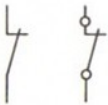


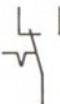
Wie daar zin in heeft, kan de waarden voor de curven ook met de ft-spanningsmeter verkrijgen. Daarvoor moet u de schakeling van hoofdstuk 12.4.2 (pag. 188) aanhouden om meetfouten te ver-mijden die anders ontstaan door de inwendige weerstand van de meter.

We kunnen ons voorstellen dat U_{Cint} steeds meer zal overeenkomen met U_C , naarmate de pulsen op de ingang van de integrator korter worden. Als ze zeer kort worden, dan zal de laadstroom praktisch niet meer worden onderbroken en zal U_{Cint} gelijk aan U_C worden.

Aanhangsel

A 1 Genormaliseerde* symbolen

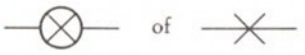











Symbol	Verklaring
	bewegingsrichting
of 	mechanische verbinding
	niet-geleidende kruising geleidend verbonden (soldeerverbinding)
	maakkontakt (drukknop) zonder en met aansluitingspunt

	rust- of verbreekkontakt (drukknop) (zonder en met aansluitingspunten)
	wisselkontakt (drukknop)
	aan/uit-schakelaar
	wisselschakelaar








* Bij het N.N.I., Nederlands Normalisatie Instituut, Polakweg 5 te Rijswijk, zijn zgn DINbladen verkrijgbaar, die uitvoeriger op de normen ingaan. Vraag naar NEN 5152.

	cel, batterij
	weerstand
	regelbare weerstand
	potentiometer
	instelbare weerstand
	trapsgewijs instelbare weerstand
of	inductie (spoel); wikkeling
of	wikkeling (spoel) met kern
	kondensator
	polaire kondensator
	elektrolytische kondensator
	elektrolytische kondensator zonder polariteit
	instelbare kondensator (trimmer)
	variabele kondensator

	massa (nulpotentialiaal)
	omraming
of	permanente magneet
	hefmagneet
	aandrijfmechanisme (algemeen, b.v. voor relais)
	elektromechanische aan- drijfmechanismen (b.v. met actieve wikkeling)
	relais met 2 wisselkontakten
	elektromechanisch aandrijf- mechanisme met vertraagde afval
	polaire relais met permanente magneet
	stekker stekkerbus
	zekering
	halfgeleider, diode (pijl wijst in de doorlaatrichting)

	lamp
	lenslamp
	gelijkstroommotor
	gelijkstroom
	wisselstroom
	gelijk- of wisselstroom
	meetinstrument (algemeen)
	spanningsmeter
	stroomsterktemeter
	transformator zonder kern
	transformator met kern
	transformator met twee sekundaire wikkelingen

A 2 Symbolen voor meetinstrumenten

Symbool	Verklaring
	meter, loodrechte gebruiksstand
	meter, horizontale gebruiksstand
	meter, schuine gebrui- ksstand, b.v. 60°
	draaispoelmeter (links) zachtijzer meetinstrument of draaikernmeter (rechts)
	draaispoelmeter met ingebouwde gelijkrichter (voor meting van wissel- spanning)
	testspanning = 2 kV
	geen getal in ster = testspanning = 500 V

A 3 Algemene natuurkundige grootheden

grootheid	in formules	eenheid	verkorte schrijfwijze	opmerkingen en samenhangen
lengte	l	meter	m	afgeleide eenheden: mm, cm, km
oppervlakte	A	vierkante meter	m ²	afgeleide eenheden: mm ² , cm ² , km ²
straal van cirkel	r	meter	m	omtrek $O = 2 \pi r = 2 \cdot 3,14 \cdot r$ oppervlak $A = \pi r^2 = 3,14 \cdot r^2$
diameter van cirkel	d	meter	m	$d = 2 r$
afstand of weg	s	meter	m	$s = \frac{V_1 + V_0}{2} t$
snelheid	v	meter per sek	m/s	$v = s : t$
versnelling	a	meter per seconde kwadraat	m/s ²	$a = \frac{V_1 - V_0}{t}$
tijd	t	seconde	s	afgeleide eenheden: 1 min = 60 sek; 1 h = 3600 s.
massa	m	kilogram	kg	afgeleide eenheden: 1 g = 0,001 kg; 1 t = 1000 kg
kracht	F	newton	N	$F = m \cdot a$ 1 N = 1 : 9,81 kgf (kilogramkracht)
arbeid (energie)	W	newtonmeter	N · m	$W = P \cdot t$ 1 Nm = 1 : 9,81 kgf · m = 1 J (Joule)
vermogen	P	newtonmeter per seconde	Nm/s	$P = W : t$ (1 W = 1 J/s; 1 kW = 1,36 pk)
temperatuur	ϑ	graad	°C; °K	temperatuur in C = °C (0 °C = + 273,15° Kelvin) temperatuur in Kelvin = °K; 0° K = - 273,15° C (absolute nulpunt)
hoeveelheid warmte	Q	joule	J	1 J (spreek uit: dzjoel) = 1 N · m = 1 Ws

A 4 Elektrische grootheden

Als symbolen in formules zouden natuurlijk ook de Griekse letters (b. v. θ , Φ , q enz) kursief moeten worden gedrukt. In de praktijk gebeurt dat meestal niet om druktechnische redenen. De Griekse letters kunnen niet met de overeenkomstige

tekens voor de eenheden worden verwisseld, wat wel het geval is b. v. bij W (arbeid) en W (watt), of m (massa) en m (meter), of A (oppervlak) en A (ampère).

grootheid	symbool	eenheid	verkorte schrijfwijze	opmerkingen en samenhangen	zie pag
lading	Q	coulomb	C	$Q = I \cdot t$; $Q = C \cdot U$ $1 \text{ C} = 1 \text{ As}$ (ampèreseconde)	177
stroomsterkte	I	ampère	A	$I = U : R$ $A = V : \Omega$	19, 20
spanning	U	volt	V	$U = I \cdot R$ $V = A \cdot \Omega$	24
stroombichtheid	S	ampère per vierkante mm	$\frac{A}{\text{mm}^2}$	$S = I : A$	
vermogen	P	watt	W	$P = U \cdot I$ $P = U^2 : R = I^2 \cdot R$ $P = W : t$ $W = V \cdot A$	41, 44
arbeid/energie	W	wattseconde	W · s	$W = P \cdot t$	43
weerstand	R	ohm	Ω	$R = U : I$ $\Omega = V : A$	27
geleiding	G	siemens	S	$G = 1 : R$ $S = 1 : \Omega$ $G = I : U$ $S = A : V$	32
soortelijke weerstand	ϱ	ohm x vierkante mm per meter	$\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	$R = \frac{\varrho \cdot l}{A}$ $\frac{\Omega \cdot (\text{mm}^2 : \text{m}) \cdot \text{m}}{\text{mm}^2}$ (draadweerstand)	32
soortelijke geleiding	\varkappa	siemens x meter per vierkante millimeter	$S \cdot \frac{\text{m}}{\text{mm}^2}$	$\varkappa = 1 : \varrho$	32
elektrische veldsterkte	E	volt per meter	V/m	$E = U : l$	213
capaciteit	C	Farad	F	$C = Q : U = \frac{I \cdot t}{U}$ $F = \frac{A \cdot s}{V} = s : \Omega$	177, 178
diëlektrische konstante	ε			materiaalkonstante	213, 214

grootheid	symbool	eenheid	verkorte schrijfwijze	opmerkingen en samenhangen	zie pag
laadtijd/ ontlaadtijd	t	sekonde	s	$t \approx 3 \dots 5 \tau$	192
tijdconstante (kondensator)	τ	sekonde	s	$\tau = R \cdot C$ $\Omega \cdot \frac{s}{\Omega} = s$	191
Energie in kondensator	W	wattsekonde	Ws	$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2$	178
capacitieve reactantie	X_c	ohm	Ω	$X_c = \frac{1}{2 \pi f \cdot C}$	206
windingen	N	getal	-		235
omstroming (stroomwindings- dichtheid)	Θ	ampèrewinding	$A \cdot N$	$\Theta = I \cdot N$	235
magnetische flux	Φ	weber	Wb	$\Phi = B \cdot A$ $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} (= 10^8 \text{ maxwell})$	226, 235
magnetische veldsterkte	H	ampèrewindingen per meter	$A \cdot N / m$	$H = \frac{I \cdot N}{l} = \frac{\Theta}{l}$ (vroeger als eenheid oersted)	231, 235
magnetische flux- dichtheid (induktie)	B	tesla	T	$B = \Phi : A = \mu \cdot H$ $1 \text{ T} = \text{Vs} / \text{m}^2 = \text{Wb}/\text{m}^2$ (vroegere eenheid: gauss)	236
magnetische gelei- ding = permeabiliteit	μ			materiaalkonstante	236
elektromotorische kracht (EMK)	E	volt	V	$E = B \cdot l \cdot N$	236
zelfinductie van een spoel	L	henry	H	$L = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$ $1 \text{ H} = \text{Vs} / \text{A} = \Omega \cdot \text{s}$	246
inductieve reac- tantie van een spoel	X_L	ohm	Ω	$X_L = 2 \pi f \cdot L$ (wisselstroomweerstand)	247

grootheid	symbool	eenheid	verkorte schrijfwijze	opmerkingen en samenhangen	zie pag
duur van een periode	T	sekonde	s	$T = \frac{1}{f}$	201
frekwentie	f	hertz	Hz	$f = \frac{1}{T}$ $\text{Hz} = \frac{1}{\text{s}}$	201

A 5 Voorvoegsels voor de machten van tien

Voorvoegsel	macht	getal	aanduiding	voorbeeld
Tera (T)	$= 10^{12}$	$= 1\ 000\ 000\ 000\ 000$	(biljoen)	
Giga (G)	$= 10^9$	$= 1\ 000\ 000\ 000$	(miljard)	$10^9 \text{ Hz} = 1 \text{ GHz}$
Mega (M)	$= 10^6$	$= 1\ 000\ 000$	(miljoen)	$10^6 \Omega = 1 \text{ M}\Omega$
kilo (k)	$= 10^3$	$= 1\ 000$	(duizend)	$10^3 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$
hecto (h)	$= 10^2$	$= 100$	(honderd)	$10^2 \text{ l} = 1 \text{ hl}$
deca (D)	$= 10^1$	$= 10$	(tien)	$10 \text{ g} = 1 \text{ dag}$
		$10^0 = 1$	(één)	
deci (d)	$= 10^{-1}$	$= 0,1$	(1 : tien)	$10^{-1} \text{ m} = 1 \text{ dm}$
centi (c)	$= 10^{-2}$	$= 0,01$	(1 : honderd)	$10^{-2} \text{ m} = 1 \text{ cm}$
milli (m)	$= 10^{-3}$	$= 0,001$	(1 : duizend)	$10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$
micro (μ)	$= 10^{-6}$	$= 0,000\ 001$	(1 : miljoen)	$10^{-6} \text{ A} = 1 \mu\text{A}$
nano (n)	$= 10^{-9}$	$= 0,000\ 000\ 001$	(1 : miljard)	$10^{-9} \text{ F} = 1 \text{ nF}$
pico (p)	$= 10^{-12}$	$= 0,000\ 000\ 000\ 001$	(1 : biljoen)	$10^{-12} \text{ F} = 1 \text{ pF}$
femto (f)	$= 10^{-15}$		(1 : biljard)	
atto (a)	$= 10^{-18}$		(1 : triljoen)	

A 6 Soortelijke weerstand en geleiding van enige stoffen

materiaal	$\rho \left(\Omega \cdot \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right)$	$\kappa \left(\frac{1}{\Omega} \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} \right)$
zilver	0,016	62,5
koper	0,0175	56... 58
aluminium	0,0286	35
wolfram	0,055	18,2
zink	0,063	15,9
ijzer	0,10	10
nikkel	0,10	10
platina	0,11	9,09
manganien (legering)	0,42	2,38
constantaan (legering)	0,49	2,04
koolstof	600	$1,67 \cdot 10^{-3}$

A 7 Eenheden in vergelijkingen

Wet van Ohm	$V : A = \Omega$	$V : \Omega = A$	$A \cdot \Omega = V$
	$V : mA = k\Omega$	$V : k\Omega = mA$	$mA \cdot k\Omega = V$
	$V : \mu A = M\Omega$	$V : M\Omega = \mu A$	$\mu A \cdot M\Omega = V$
Vermogensvergelijking	$V \cdot A = W$	$W : A = V$	$W : V = A$
	$V \cdot mA = mW$	$mW : mA = V$	$mW : V = mA$
	$V \cdot \mu A = \mu W$	$\mu W : \mu A = V$	$\mu W : V = \mu A$
Weerstand en geleiding	$1 \Omega = 1 S$		
	$10 \Omega = 0,1 S$		
	$100 \Omega = 0,01 S$		
	$1000 \Omega = 0,001 S$		
Tijdkonstante (Kondensator)	$F \cdot \Omega = s$		
	$\mu F \cdot M\Omega = s$		
	$\mu F \cdot k\Omega = ms$		

A 8 Internationaal genormaliseerde weerstandswaarden voor filmweerstand

Ω ; $k\Omega$; $M\Omega$

E6	1,5	2,2	3,3	4,7	6,8	1,0																		
E12	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2	1,0												
E24	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1	1,0

A 9 Kleurcode voor filmweerstand

Kleur	1e ring: cijfer	2e ring: cijfer	3e ring: vermenigvuldiger (cijfers van 1e en 2e ring met macht van 10)	4e ring: tolerantie
zwart	-	0	$10^0 \Omega = 1 \Omega$	
bruin	1	1	$10^1 \Omega = 10 \Omega$	$\pm 1\%$
rood	2	2	$10^2 \Omega = 100 \Omega$	$\pm 2\%$
oranje	3	3	$10^3 \Omega = 1 k\Omega$	
geel	4	4	$10^4 \Omega = 10 k\Omega$	
groen	5	5	$10^5 \Omega = 100 k\Omega$	zonder kenmerk: $\pm 20\%$
blauw	6	6	$10^6 \Omega = 1 M\Omega$	
violet	7	7		
grijs	8	8		
wit	9	9		
zilver	-	-	$10^{-1} \Omega = 0,1 \Omega$	$\pm 10\%$
goud	-	-	$10^{-2} \Omega = 0,01 \Omega$	$\pm 5\%$

	1.	2.	3.	4. Ring	
rood	violet	bruin	zilver	$= 27 \cdot 10 \Omega = 270 \Omega \pm 10\%$	
wit	bruin	oranje	goud	$= 91 \cdot 1 k\Omega = 91 k\Omega \pm 5\%$	
blauw	grijs	zilver	rood	$= 68 \cdot 0,1 \Omega = 6,8 \Omega \pm 2\%$	
geel	violet	rood	bruin	$= 47 \cdot 100 \Omega = 4,7 k\Omega \pm 1\%$	
zwart	bruin	bruin	-	$= 01 \cdot 10 \Omega = 10 \Omega \pm 20\%$	

A 10 Antwoorden op vragen in de tekst gesteld

pag. 32

$$\rho_{\text{ijzer}} = 0,1 \text{ mm}^2/\text{m} \cdot \Omega \quad d = 0,15 \text{ mm} \quad A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

$$l = 90 \text{ m} \quad A = 3,14 \cdot (0,075 \text{ mm})^2 = 0,018 \text{ mm}^2$$

$$R_{\text{ijzer}} = \frac{0,1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m} \cdot 90 \text{ m}}{0,018 \text{ mm}^2} = 500 \Omega$$

pag. 42

1. Het afgenomen vermogen is even groot, $100 \text{ W} = 0,1 \text{ kW}$.
2. Allereerst moet de weerstand van de lamp onder de nominale voorwaarden $100 \text{ W} / 220 \text{ V}$ worden bepaald:

$$P = I \cdot U; \quad I = P : U = 100 \text{ W} : 220 \text{ V} = 0,45 \text{ A}$$

$$R = U : I = 220 \text{ V} : 0,45 \text{ A} = 489 \Omega$$

Bij een spanning van 110 V is de stroomsterkte dan:

$$I = U : R = 110 \text{ V} : 489 \Omega = 0,225 \text{ A}$$

3. Het vermogen bij 110 V afgenomen bedraagt dan slechts:

$$P = 0,225 \text{ A} \cdot 110 \text{ V} = 24,75 \text{ W} = \pm 25 \text{ W}$$

Zoals we in hoofdstuk 4.9.3 hebben vermeld, is de weerstand van de lamp niet konstant maar hangt deze af van de temperatuur. De berekening van het vermogen is dan ook niet geheel korrekt.

pag. 44

Antwoord (b) is juist: $100 \text{ W} \cdot 10 \text{ uur} = 1000 \text{ Wh} = 1 \text{ kWh}$

Voor deze elektrische energie die in licht (en helaas voor een deel ook in warmte) is omgezet, betaalt men in Duitsland ongeveer 10 pfennig en in Nederland f. 0,11.

pag. 47

$$P = U^2 : R$$

$$U^2 = P \cdot R \quad U = \sqrt{P \cdot R} = \sqrt{P} \cdot \sqrt{R}$$

$$1. P = 250 \text{ mW} = 0,25 \text{ W}; \quad R = 100 \Omega$$

$$U = \sqrt{0,25} \cdot \sqrt{100} = 0,5 \text{ W} \cdot 10 \Omega = 5 \text{ V}$$

$$2. U = \sqrt{0,25} \cdot \sqrt{33} = 0,5 \text{ W} \cdot 5,7 \Omega = 2,87 \text{ V}$$

$$3. U = \sqrt{0,25} \cdot \sqrt{470} = 0,5 \text{ W} \cdot 21,7 \Omega = 10,85 \text{ V}$$

pag. 50

Linkerkolom

$$1. I = U : R = 5 \text{ V} : 50 \Omega = 0,1 \text{ A}$$

$$P = I \cdot U = 0,1 \text{ A} \cdot 5 \text{ V} = 0,5 \text{ W}$$

er moet dus een $0,5 \text{ W}$ -weerstand worden genomen.

$$2. I = 6 \text{ V} : 2 \text{ k}\Omega = 3 \text{ mA}; \quad P = 6 \text{ V} \cdot 3 \text{ mA} = 18 \text{ mW}$$

Een $1/4 \text{ W}$ -type is meer dan voldoende.

Rechterkolom

Uit diagram 3.14 blijkt dat we op de 1 W -weerstand van 33Ω maximaal een spanning van ongeveer $5,8 \text{ V}$ mogen aansluiten. De spanningen voor de $4,7 \Omega$ - en 10Ω -weerstand kunt u in het diagram slechts globaal aflezen. U_{max} bedraagt voor de $4,7 \Omega$ ongeveer $2,1 \text{ V}$ en voor de 10Ω ongeveer $3,2 \text{ V}$.

pag. 58

1. $R_{tot} = 147,7 \Omega$

2. voor $U = 6 \text{ V}$ is

$$I = 6 \text{ V} : 147,7 \Omega = 0,041 \text{ A}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I = 10 \Omega \cdot 0,041 \text{ A} = \mathbf{0,41 \text{ V}}$$

3. De stroom is in alle weerstanden even groot:

$$\mathbf{I = 0,041 \text{ A}}$$

4. De meetkabels moeten op de punten C en D worden aangesloten.

5. Daar de weerstanden niet veranderen moet ook de verhouding van U_1 tot U steeds hetzelfde blijven – ook als U hoger of lager wordt:

$$U_1 : U = R_1 : R_{tot} = 4,7 \Omega : 147,7 \Omega \approx 1 : 30$$

pag. 61

$$R_{tot} = 100 \Omega + 470 \Omega + 100 \Omega = 670 \Omega$$

$$R_1 + R_2 + R_3$$

$$I = 6 \text{ V} : 670 \Omega = 0,009 \text{ A}$$

Van C uit gezien (= nulpotentiaal) is D positiever;

U_1 krijgt dus een positief (+)teken en bedraagt:

$$U_1 = 100 \Omega \cdot 0,009 \text{ A} = \mathbf{+ 0,9 \text{ V}}$$

B en A zijn gezien vanuit C negatiever; U_2 en U_3 krijgen daarom een negatief (-)teken:

$$U_2 = 470 \Omega \cdot (-0,009 \text{ A}) = \mathbf{- 4,23 \text{ V}}$$

$$U_3 = 100 \Omega \cdot (0,009 \text{ A}) = \mathbf{- 0,9 \text{ V}}$$

Het potentiaalverschil tussen C en A is nu:

$$U_{AC} = -0,9 \text{ V} + (-4,23 \text{ V}) = \mathbf{- 5,13 \text{ V}}$$

Het potentiaalverschil tussen D en A bedraagt:

$$U_{DA} = +0,9 \text{ V} - (-5,13 \text{ V}) = +0,9 \text{ V} + 5,13 \text{ V} = \mathbf{+ 6,03 \text{ V}}$$

$$U_{DA} \approx \mathbf{+ 6 \text{ V}}$$

pag. 62

$$R_{tot} = 100 \Omega + 10 \Omega + 33 \Omega = 143 \Omega$$

$$R_1 + R_2 + R_3$$

1. $I = U : R_{tot} = 7 \text{ V} : 143 \Omega = 0,049 \text{ A}$

$$U_1 = 100 \Omega \cdot 0,049 \text{ A} = \mathbf{4,9 \text{ V}}$$

$$U_2 = 10 \Omega \cdot 0,049 \text{ A} = \mathbf{0,49 \text{ V}}$$

$$U_3 = 33 \Omega \cdot 0,049 \text{ A} = \mathbf{1,62 \text{ V}}$$

Voor $P = U \cdot I$ krijgen we dan

$$P_1 = \mathbf{0,24 \text{ W}} \quad P_2 = \mathbf{0,024 \text{ W}} \quad P_3 = \mathbf{0,079 \text{ W}}$$

De serieschakeling mag dus met 0,25 W-weerstanden op een spanning van 7 V worden aangesloten.

2. Als U wordt verhoogd tot 9 V, dan moet voor R_1 een 0,5 W type worden gekozen, daar R_1 reeds bij 7 V bijna maximaal was belast.

$$I = 9 \text{ V} : 143 \Omega = 0,063 \text{ A}$$

$$U_1 = 6,3 \text{ V}$$

$$P_1 = 6,3 \text{ V} \cdot 0,063 \text{ A} = \mathbf{0,397 \text{ W}}$$

pag. 67

Wanneer de waarde van de voorschakelweerstand $30 \text{ k}\Omega$ bedroeg voor een volledige wijzeruitslag bij 10 V, dan moet de waarde voor de volledige uitslag bij 20 V ook twee keer zo groot zijn: $60 \text{ k}\Omega$. Daar $30 \text{ k}\Omega$ als R_i in de meter al aanwezig is, moet de uitwendige voorschakelweerstand $R_{V\alpha} 60 \text{ k}\Omega - 30 \text{ k}\Omega = 30 \text{ k}\Omega$ bedragen.

pag. 68

$$R_2 = R_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 33 \Omega \cdot \frac{4 \text{ V}}{1 \text{ V}} = 132 \Omega$$

pag. 76

De potentiometer-weerstand R_{A-E} is steeds gelijk aan de som van R_{S-A} en R_{E-S} . R_{E-S} is daaruit gemakkelijk te berekenen:

$$R_{E-S} = R_{A-E} - R_{A-S}$$

pag. 79

In stand 1 is het sleepkontakt van fig. 5.21 rechtstreeks met A en daarmee met de $-$ pool verbonden. De beveiligingsweerstand R_S is dan kortgesloten, en U_{S-A} gelijk aan nul.

pag. 82

1. Op R_{S-A} (fig. 5.28) mag hoogstens 3 V komen, wanneer namelijk bij de stand 10 van het sleepkontakt $R_{S-A} = R_p = 10 \text{ k}\Omega$ is, dan moet bij $U = 6 \text{ V}$ over R_V een spanningsval van 3 V plaatsvinden. Hetgeen betekent dat R_V gelijk moet zijn aan $R_p = 10 \text{ k}\Omega$.
2. Als daarentegen alleen een spanning tussen 3 en 6 V ter beschikking moet staan, dan moet de weerstand R_V tussen A en de $(-)$ pool worden geschakeld. De spanning wordt tussen S en $(-)$ afgetakt. Ga een en ander zelf na.
3. Schakel R_1 en R_2 allereerst als in fig. 5.29 aangegeven. Bij een totaalspanning $U = 7,5 \text{ V}$ moet een instelbare spanning tussen 1 en 6,5 V ter beschikking staan. Hetgeen overeenkomt met een potentiaalverschil van $6,5 \text{ V} - 1 \text{ V} = 5,5 \text{ V}$. Resteert 2 V, zodat over de weerstanden R_1 en R_2 elk 1 V moet afvallen, daar het potentiaalverschil tussen 0 en 1 V, resp. tussen 6,5 en 7,5 V steeds 1 V bedraagt. $R_1 = R_2$ en $U_1 = U_2$.

Er geldt dan:

$$\frac{R_1}{R_p} = \frac{U_1}{U_p} \quad ; \quad R_1 = R_p \cdot \frac{U_1}{U_p} = 10 \text{ k}\Omega \cdot \frac{1 \text{ V}}{5,5 \text{ V}} = 1,82 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = R_2 = 1,82 \text{ k}\Omega$$

De instelbare spanning moet tussen punt S en de $(-)$ worden afgenomen. In stand 1 (op A) wordt alleen de spanning $U_1 = 1 \text{ V}$ afgetakt. In stand 10 (op E) is $U_1 + U_p = 1 \text{ V} + 5,5 \text{ V} = 6,5 \text{ V}$. En deze ruimte tussen 1 V en 6,5 V was nu juist de eis.

Als de spanning niet tussen S en (1) wordt afgenomen, maar tussen de punten A en S, dan is U_{S-A} in stand 1 gelijk aan nul (zie het antwoord op de vraag van pag. 79) en in stand 10 bedraagt U_{S-A} dan 5,5 V. Dit bereik was echter niet de eis.

pag. 89

$$R_1 = 100 \Omega; R_2 = 33 \Omega$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{100}{33} \quad \mathbf{P_2 \approx 3 \cdot P_1}$$

R_2 neemt ongeveer drie keer zoveel vermogen af als R_1 .

pag. 91

$$1. R_1 = 1 \text{ k}\Omega; R = 0,25 \text{ k}\Omega$$

$$R = 25\% \text{ van } R_1 = \frac{1}{4} R_1$$

Volgens tabel 6.15 (regel 1) moet er een weerstand $R_2 = \frac{1}{3} R_1 = 333 \Omega$ parallel worden geschakeld.

$$2. R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega; R = 3,5 \text{ k}\Omega$$

$$R \approx 75\% = \frac{3}{4} R_1 \approx 0,75 R_1$$

Volgens tabel 6.15 moet de parallel te schakelen weerstand een grootte hebben van $3 \cdot R_1 = 14,1 \text{ k}\Omega$

pag. 93

Shunt voor volledige uitslag bij 2 A:

$$R_{Sh\ tot} = 1,5\ \text{k}\Omega \cdot \frac{0,333\ \text{mA}}{1999,667\ \text{mA}} = 0,0003\ \text{k}\Omega = 0,3\ \Omega$$

$$R_{Sh\ uit} = \frac{R_{Sh\ in} \cdot R_{Sh\ tot}}{R_{Sh\ in} - R_{Sh\ tot}} = \frac{5\ \Omega \cdot 0,3\ \Omega}{4,7\ \Omega}$$

$$R_{Sh\ uit} = \mathbf{0,32\ \Omega}$$

De lengte voor de weerstandsdraad is

$$l = \frac{100\ \text{cm} \cdot 0,32\ \Omega}{2,45\ \Omega} \approx \mathbf{13\ \text{cm}}$$

10 deelstrepen $\hat{=}$ 2 A;

1 deelstreep $\hat{=}$ 0,2 A

We moeten de afgelezen waarde met 0,2 vermenigvuldigen om de overeenkomstige stroomsterkte te verkrijgen.

pag. 110

- | | |
|---------------|---------------|
| 1. positief | 3. - 3,0 volt |
| 2. + 4,5 volt | 4. + 1,5 volt |

pag. 126

1. $R_1 = 100\ \Omega$; $R_2 = 470\ \Omega$; $R_L = 470\ \Omega$

$$R_2 \parallel R_L = 235\ \Omega$$

$$U_a = U_L = U_e \cdot \frac{R_2 \parallel R_L}{R_1 + R_2 \parallel R_L} = U_e \cdot \frac{235\ \Omega}{335\ \Omega} = \mathbf{0,7 \cdot U_e}$$

voor $U_e = 4,5\ \text{volt}$, is $U_a = \mathbf{3,15\ \text{V}}$

2. De langsstroom is dan

$$I_1 = \frac{U_e}{R_1 + R_2 \parallel R_L} = \frac{4,5\ \text{V}}{335\ \Omega} = \mathbf{13\ \text{mA}}$$

De dwarsstroom is

$$I_q = 1/2 I_1 (R_2 = R_L) = \mathbf{6,5\ \text{mA}}$$

pag. 128

Theoretisch moet op $R_1 = 100\ \text{k}\Omega$ de volgende deelspanning komen:

$$U_1 = U \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U \cdot \frac{100\ \text{k}\Omega}{110\ \text{k}\Omega} = \mathbf{0,91 \cdot U}$$

voor $U = 4,5\ \text{V}$ bedraagt U_1 ongeveer **4,1 V**

Maar door parallelschakeling van de spanningsmeter krijgen we:

$$R_1 \parallel R_i = \frac{100\ \text{k}\Omega \cdot 30\ \text{k}\Omega}{130\ \text{k}\Omega} = 23,1\ \text{k}\Omega. \text{ dan wordt}$$

$$U_1 = \frac{23,1\ \text{k}\Omega}{33,1\ \text{k}\Omega} \cdot U = \mathbf{0,7\ U}$$

Voor $U = 4,5\ \text{V}$ is U_1 dan 3,15 V (in plaats van 4,1 V zonder meter)

De meetfout bedraagt dus 0,95 V dat is bijna 1 V, of rond de 23%.

pag. 131

De eerste deler bestaat uit:

$$R_1 = 1\ \text{k}\Omega \parallel 100\ \Omega = 91\ \Omega \text{ en } R_2 = 10\ \Omega$$

De delerverhouding is dan

$$V_{11} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{10\ \Omega}{101\ \Omega} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{10,1}}$$

De tweede deler bestaat uit:

$$R_3 = 940\ \Omega \parallel 10\ \text{k}\Omega + 33\ \Omega = 892\ \Omega \text{ en } R_4 = 10\ \Omega$$

De delerverhouding wordt:

$$V_{12} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{10\ \Omega}{992\ \Omega} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{9,92}}$$

De totale delerverhouding is nu:

$$V_1 = V_{11} \cdot V_{12} = \frac{1}{10,1} \cdot \frac{1}{9,92} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{100,19}} \text{ afgerond } \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{100}}$$

De fout mag zonder meer worden verwaarloosd.

- Volgens de besproken methode kunnen we de waarde van ongeveer 70Ω verkrijgen door $470 \Omega - 470 \Omega - 100 \Omega$ parallel te schakelen.
- De totale stroom bij $U = 9 \text{ V}$ wordt als volgt berekend:

$$R_{tot} = 235 \Omega \parallel 100 \Omega = 70,15 \Omega$$

$$I_{tot} = 9 \text{ V} : 70,15 \Omega = \mathbf{128 \text{ mA}}$$

De deelstromen zijn:

$$I_1 = I_2 = 9 \text{ V} : 470 \Omega = \mathbf{19 \text{ mA}}$$

$$I_3 = 9 \text{ V} : 100 \Omega = \mathbf{90 \text{ mA}}$$

Proef:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 128 \text{ mA} = I_{tot}$$

(Voorbeeld 6)

Als door een weerstand, bij dezelfde spanning, een zes keer zo grote stroom moet lopen, dan moet de waarde van de weerstand zes keer zo klein worden.

In ons voorbeeld brengen we de weerstand van 470Ω terug tot $470 : 6 = 78,33 \Omega$. Een 100Ω -weerstand parallel met de 470Ω geeft een vervangingswaarde van ongeveer 82Ω en dat is voor ons doel genoeg. Bij een spanning van 10 V loopt door de 470Ω een stroom van 21 mA , door 82Ω ongeveer 122 mA , bijna het zesvoudige.

(vraag)

De weerstandswaarde van $100 \Omega \parallel 470 \Omega$ bedraagt precies $82,5 \Omega$. Bij 6 V loopt er een stroom van 73 mA door de parallelschakeling. Uit het diagram blijkt dat 60 mA daarvan door de 100Ω -weerstand gaat, die een vermogen afneemt van $6 \text{ V} \cdot 60 \text{ mA} = 0,36 \text{ W}$. De 100Ω -weerstand moet dus van een $0,5 \text{ W}$ -type zijn.

Wie alleen beschikt over een $0,25 \text{ W}$ - type kan max. een spanning van $0,25 \text{ W} : 0,06 \text{ A} \approx \mathbf{4,2 \text{ V}}$ aansluiten.

pag. 140

Bepaal allereerst op de bekende wijze de karakteristiek van de aangegeven serieschakeling, bijv. voor een stroomsterkte van 30 mA . De bijbehorende spanningscoördinaat ligt rond de $7,3 \text{ V}$. Om nu de stroomsterkte bij een spanning van 6 V te vinden, gaan we van het punt 6 V op de spanningsas, loodrecht naar boven en dan vanuit het snijpunt met de karakteristiek precies horizontaal naar links, waar de bijbehorende stroomsterkte van ongeveer 25 mA kan worden afgelezen.

Omgekeerd vinden we voor een stroom van 40 mA een spanning van krap 10 V .

Voor de verschillende deelspanningen verschaft het diagram de volgende waarden:

op 10Ω : krap $0,5 \text{ V}$

op 33Ω : ongeveer $1,3 \text{ V}$

op 100Ω : steeds ongeveer 4 V

pag. 184

$$W_{tot} = \frac{1}{2} U^2 \cdot C_{tot} \text{ (formule van pag 178)}$$

$$C_{tot} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{470 \mu\text{F} \cdot 47 \mu\text{F}}{517 \mu\text{F}} = 42,7 \mu\text{F}$$

Voor $U = 6 \text{ V}$ krijgen we:

$$W_{tot} = \frac{1}{2} \cdot 36 \text{ V}^2 \cdot 42,7 \mu\text{F} = 768,6 \mu\text{Ws} = \mathbf{0,77 \text{ mWs}}$$

Volgens fig. 12.15 zijn de deelenergieën:

$$W_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{6}{11} \text{ V}\right)^2 \cdot 470 \mu\text{F} = 69,94 \mu\text{Ws} \approx \mathbf{0,07 \text{ mWs}}$$

$$W_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{60}{11} \text{ V}\right)^2 \cdot 47 \mu\text{F} = 699,16 \mu\text{Ws} \approx \mathbf{0,7 \text{ mWs}}$$

A 11 Waar u op moet letten bij het kopen van meetinstrumenten

Tijdens de proeven met hobbylabor 1 is misschien de wens bij u opgekomen om een gevoeliger meetinstrument aan te schaffen dat tevens meer mogelijkheden biedt.

Voor de experimenten en metingen van hobbylabor 2, dat uitgebreid de halfgeleiders zal behandelen, is een universeelmeter trouwens noodzakelijk.

Nu is het aanbod dermate groot, en de kwaliteit zo verschillend dat het bijzonder moeilijk is om een goede keus te maken.

Daarom vindt u hieronder enkele richtlijnen die hopelijk voorkomen dat u een miskoop doet.

- Koop alleen een instrument waar een schakelschema en/of een gebruiksaanwijzing bij wordt geleverd. De waarden van de inwendige weerstanden voor de verschillende meetbereiken moeten daarin zijn vermeld. Deze zijn namelijk nodig voor correcties op gemeten waarden (zie hfdstuk 8.4.2).
- De gevoeligheid in het gelijkspanningsbereik dient tenminste 20 k Ω /V te zijn.
- De inwendige weerstand voor de spanningsmeting kunnen we berekenen met het produkt van de gevoeligheid en het meetbereik. De inwendige weerstand van een 20 k Ω /V-meetinstrument bedraagt in het meetbereik tot 5 V reeds 100 k Ω ; in het meetbereik van 10 V is de inwendige weerstand 200 k Ω enz.
Een gevoeligheid van 20 k Ω /V is dus heel behoorlijk.
- Een hogere gevoeligheid heeft bij de goedkopere apparatuur het nadeel dat de waarden van de inwendige weerstanden weer sterk stijgen hetgeen tot grotere meetfouten leidt.
Dat ligt anders wanneer de ingang van het instrument is voorzien van een elektronische schakeling. Dit wordt altijd door de fabrikant aangegeven. Dergelijke meetinstrumenten hebben een gevoeligheid van vele 100 k Ω /V tot aan enkele M Ω /V, zonder dat de inwendige weerstanden in de verschillende bereiken van de stroomsterkte uitzonderlijk hoge waarden aannemen.
Prachtige apparatuur maar lang niet goedkoop.

- In de verschillende meetbereiken moeten we kunnen meten: een gelijk-en een wisselspanning, alsmede de gelijkstroom en de weerstand. Wisselstroommeting is niet persé noodzakelijk, met een spanningsmeting is deze te vermijden.

Het max. stroomsterktebereik dient minstens 500 mA te zijn zodat we de stroomsterkte in een ft-motor kunnen meten.

Voor de meting van kortsluitstromen in batterijen hebben we een meetbereik van tenminste 5 A nodig.

Alles wat een instrument meer biedt is overbodige ballast en maakt het apparaat duurder zonder dat de kwaliteit er beter van wordt.

- De batterijen of cellen die voor de weerstandsmeting worden gebruikt, mogen niet „doorvreten“ en op die manier het instrument beschadigen. Goede meetapparatuur heeft een afgeschermd magazijn voor de stroombron.
Neem de volgende proef bij de aankoop. Sluit de batterijen of droge cellen aan en schakel naar een ander meetbereik over.
Let op dat de meter niet uitslaat tot het eind van de schaalverdeling.
- De nauwkeurigheid wordt aangegeven in % van de schaalverdeling. Bij 2,5% en een meetbereik van 10 V kan de afgelezen waarde $\pm 2,5\%$ van 10 V = 0,25 V van de werkelijke waarde afwijken. De precisie dient op de schaalverdeling te zijn aangegeven. Een nauwkeurigheid van 2,5% is voor onze doeleinden meer dan genoeg. Een grotere nauwkeurigheid moet duur worden betaald.
- De schaalverdeling moet een spiegelschaal hebben om afleesfouten te vermijden die zouden kunnen ontstaan wanneer u niet precies loodrecht op de wijzerpunt kijkt.
Bij de aflezing moeten wijzer en spiegelbeeld samenvallen. Om afleesfouten te voorkomen moeten de schaalverdelingen ook zo groot mogelijk zijn en overzichtelijk ingedeeld. Hoe minder schalen hoe beter.
De wijzer moet zo dun mogelijk zijn.
- Hoe langer een wijzer is hoe gevoeliger deze ook is voor de wrijving in het lager. Het blijft dan niet meer gelijk of een meetinstrument plat op tafel ligt, schuin of recht staat. De juiste gebruiksstand dient eveneens op de verdeling te zijn aangegeven en moet bij de meting ook worden aangehouden (zie de symbolenlijst op pag. 270).

A 12 Rekenen met machten van het grondtal 10

a^b

We rekenen met het grondtal 10 en zijn machten.

10^2 betekent: $10 \cdot 10$

10^3 betekent $10 \cdot 10 \cdot 10$ enz.

a^b hierin is a het grondtal

b de exponent of de macht

a^b de macht van a (lees a tot de macht b)

- De exponent of macht geeft aan hoe vaak wij een getal (hier 10) met zichzelf moeten vermenigvuldigen.
- Zoals uit tabel A 5 blijkt geeft de positieve exponent (het plusteken laten we weg) het aantal nullen achter de 1 aan, als het grondtal 10 is.
- Met een negatieve exponent geven we het omgekeerde of de reciproke aan:

$$10^{-1} = \frac{1}{10^1} = 0,1$$

$$10^{-2} = \frac{1}{10^2} = \frac{1}{100} = 0,01$$

- De negatieve exponent geeft het aantal cijfers achter de komma aan.
- Vermenigvuldigen van machten van het hetzelfde grondtal wordt gedaan door hun exponenten op te tellen:

$$10 \cdot 100 = 10^1 \cdot 10^2 = 10^{1+2} = 10^3 = 1000$$

$$10^5 \cdot 10^{-2} = 10^{5-2} = 10^3 = 1000$$

$$10^5 \cdot 10^{-2} = 10^5 \cdot \frac{1}{10^2} = \frac{10^5}{10^2} = \frac{100\,000}{100} = 1000$$

- Delen van machten van hetzelfde grondtal geschiedt door de exponenten van elkaar af te trekken:

$$10^3 : 10^1 = 10^{3-1} = 10^2 \qquad \frac{1000}{10} = 100$$

$$10^3 : 10^{-2} = 10^{3 - (-2)} = 10^{3+2} = 10^5 \qquad \frac{1000}{\frac{1}{100}} = \frac{100}{1} \cdot 1000 = 100\,000$$

A 14 Los verkrijgbare onderdelen

	scharniersteen, ronde en vierkante nok		druknop
	hoekas		elektromagneet
	dubbeladerig draad, blauw, 1000 mm, stekkers rood en groen		verdeelplaat, eenpolig
	draad, blauw, 1500 mm		platte stekker, groen
	platte stekker, rood		permanente magneet groen
	lichtkap rood lichtkap geel lichtkap groen lichtkap blauw lichtkap wit		permanente magneet rood
	lichtsteen		as 110 as 60 as 50 as 30
	kogellamp		klemkontakt
	trapsgewijze schakelaar bovenstuk trapsgewijze schakelaar onderstuk		veerkontakt

Trefwoordenregister

A

aantrekkingskracht 255
aantrekkingskracht stroomvoerende geleiders 232
aantrekkingskracht magnetische polen 219
accu, energie van 108
accu, inwendige weerstand 102
afsluitweerstand 126
afstand (aantrekking) 254
afvalstroom 260
afvalvertragingstijd 264
afvlakcondensator 264
aktieve onderdelen 51
aktieve tweepool 98
alarmschakeling 168
anode 21, 33, 158
antiparallelschakeling van dioden 171
arbeid, formules voor 44
arbeid, vergelijkbaar maatstaf 45
aatom, opbouw 18

B

babycellen 22
— levensduurdiagram 107
batterijen, energie van 108
batterijhouder 1, 3
bekrachtigingskring 258
bekrachtigingsspoel 258
belasting van bronnen 98
— van potentiometer 73
belastingskring 259
black box 51, 125
bromspanning 203, 265, 267
bron, zie ook energiebron
— symbool voor 100
— condensator als 177

— voor twee gemeenschappelijke kringen 260
brugschakeling 147
brugtak 147
brugschakeling, gelijkstand 147

C

Cascadeschakeling met RC-schakeling 199
Coulomb 177
CuL draad 222

D

deelspanningen, definitie 53
deelstromen 87
deelweerstand 55
dekaden spanningsdeler 130
demagnetisering door wisselstroom 228
diagonaaltak, brugschakeling 147
diagram 33
diamagnetische stoffen 227
diëlektricum van elco's 215
diode, antiparallelschakeling 171
— drempelspanning 163, 169, 171
— impulsonderdrukking door 210
— sperrichting, doorlaatrichting 159
— beveiliging voor meetinstrumenten 169
— spanningsverlies over 165
— metingen voor karakteristiek 162
dipolen, elektrische 214
— magnetische 227

doorslaan bij condensatoren 214
draadbruggen 14
draaimoment 248
drukknop van ft-meter 12, 39, 92
dynamo, principe van 216, 241

E

eenfasige gelijkrichting 167, 201, 266
eenheden, schrijfwijze 20
e-functie 199
elco's, aluminium-elektrolyt
 condensatoren 215
elco's, ouder worden 215
elektrisch veld 214
elektrische dipolen 214
— grootheden 16
— ladingdragers 18, 176
— aantrekkingskracht 19, 160
— traagheid van een spoel 245
elektrolyse van water 33
elektrolyt 21
elektrolytische condensatoren
— veroudering 215
— opbouw 215
— diëlektricum van 215
— formeren 215
— formeren 215
— juiste polariteit van 174, 215
— zelfontlading 212, 215
— wisselspanning op 205
elektronen, verplaatsing van 172
elektronenstroom, richting van 23
elementaire deeltjes 19
elementaire lading, negatieve 176
energie, van accu's 108

energiebron 20, 22
energietransport 40
energieverbruik 42, 178
— van spanningsmeter 66
energieverdeling, parallelschakeling
— van condensatoren 181
— serieschakeling van
— condensatoren 183
Euler, L. 193

F

flitslicht 184
fluxdichtheid, magnetische (inductie) 236
formules, symbolen en schrijfwijze 20
formeren van elco 215
frekwentie 203
functiebegrip 27
functietekeningen van schakelingen 134

G

Galvanisch element 21
— opbouw 107
— levensduur 22
— levensduur en inwendige weerstand 107
geleiders, stroomvoerend 232
geleiding 25
gelijkspanning, pulserende 202, 206
— met wisselstroomrest 207
gelijkstand 77, 83, 150
gemiddelde, rekenkundig 188
generator 178
geografische noordpool 217
gevoeligheid van spanningsmeter 67
— eisen t.a.v. 129
gloeidraad 65
gloeilamp, weerstand van 64, 65
grootheden, elektrisch 16

H

heavy duty cel 98
hefmagneet 222
hoefijzermagneet 224
houden van Reedrelais 263
houdstroom 260

I

ideale bron 98
— kortsluitstroom 106
impuls 209
impulsonderdrukking met diode 210
impulspauze 211
impuls vasthouden 212
index 26
indices, volgorde 148
indikatie 121
inductie in een geleider 241
inductie, zelf-, van ft-spoel 246
inductieve weerstand, formule 247
ingangsimpuls 209, 211
integrator 267
inwendige shunt
inwendige weerstand, accu's 102
— Galvanische elementen 107
— bron, karakteristiek 113
— spanningsmeter 128
— stroomsterktemeter 129
— karakteristieken 143
isolatiemateriaal 25

K

capaciteit, vervangingscapaciteit
bij condensatoren 181, 182
capacitieve weerstand, formule 206

karakteristiek diode 162
— inwendige weerstanden 143
— condensatorspanning 187
— vermogenshyperbool 48
— netwerken 141
— ohmse weerstanden 35
— parallel geschakelde weerstanden 135
— bronweerstanden 113
— serieweerstanden
kathode 21, 33, 158
keramische condensatoren 215
Kirchhoff, Robert 51, 145
klemspanning 99, 114
knik in karakteristiek van diode 164
knooppunt 146
knooppunten in netwerken 133
knooppuntenregel 145
kondensator, zie elektrolytische
kondensator, afvlak- 264
— als belasting in spanningsdeler 197
— als energiebron 177
— laad-en ontladtid 192
— laden met konstante stroombron 192
— spanningsdeler met 186, 196
— als stroomwissel 207
— verhouding bij laden en ontladen 190
— doorslaan van 214
— vonk 185
— hobbylabor, werkelijke waarde 193
konstante spanningsbronnen 102
konstante stroombron, laden van een
kondensator door 192
kontaktingen 252
konventionele of technische stroom-
richting 23
koördinaten 34
koperatoom, opbouw 18
koppeling van stroomkringen 258
kortsluitbruggen 14
kortsluitbeveiliging ft-trafo 103
kortsluitstekker 15
kortsluitstroom 100
kortsluiten ideale bron 106
krachtlijnen, richting van 221, 223, 226
— aantal, magnetische veldsterkte 225
krokodilleklemmen 2

L

laadrichting 176
 laadstroom 172
 ladingdragers, elementaire 18, 19
 ladingen, zie elektrische
 langskondensator 194
 langweerstand 126
 levensduur, Galvanische elementen 22
 — en inwendige weerstand 107
 logaritmische schaalverdeling 156
 luchtspleet in magnetische kring 226

M

maakkontakt 253
 magnetisch veld 220
 — — ijzer in 224
 magnetisch strooiveld 224, 235
 magnetische dipolen 227
 — flux 226, 235
 — fluxdichtheid (induktie) 236
 — houdkracht 225
 — konstante 236
 — krachtlijnen en aantal 225
 — noordpool 217
 — polen, aantrekking 219
 — schakelaar 255
 — velden, beïnvloeding 248
 — weerstand 226
 — veldsterkte 235
 — verzaaging 227
 — wervelstromen 245
 magnetisering door kontakt 229
 mazenregel 145
 meetfouten, spanning 127
 — stroomsterkte 112, 128
 meetinstrumenten, beveiliging tegen
 overbelasting 169
 — weerstand 66
 meetweerstanden 63
 mignoncel 22
 — testen van 109

monobatterijen 22
 — opbouw 107
 — testen 109
 montage van gloeilampen 15
 — van Reedrelais 256

N

natuurlijk grondtal e 193
 negatieve elementaire lading 176
 netbrom 203, 265, 267
 netfrequentie 203
 netwerken, karakteristiek 141
 nominale waarde 45, 30, 37
 noordpool, geografische en magnetische 217
 normalisatie 79
 nul gelijkstand brugschakeling 152
 nullastspanning 97, 100, 103
 nulpotentiaal 60
 nulpotentiaal, gemeenschappelijk
 voor twee stroomkringen 259

O

oerstedt 231
 ohmse weerstand 205
 — karakteristiek 35
 omgekeerde waarde, reciproke 32
 omstroming 235
 ontladrichting 176
 ordinaat 33

P

parallelschakeling, vervangings-
 capaciteit 181

— van spoelen 246
 — sterk verschillende weerstanden 136
 — spanningsdelers 146
 — weerstanden, karakteristiek 135
 parameter 48
 passieve onderdelen 51
 passieve tweepolen 99
 permeabiliteit 226, 236
 pincet 7
 polair relais 263
 polaire gelijkrichting 266
 polariteit, ft-trafo en batterijhouder 4
 poolafhankelijke weerstanden 160
 poolaansluiting van elco's 174, 215
 potentiaalverschil 60, 150
 potentiometer, belasting van 73
 — belastbaar 73
 — met kortgesloten A-E bussen,
 karakteristiek 81
 — bouwsteen, schema 74
 — karakteristiek 79, 124, 154
 — meetbrug 156
 — precisie 157
 — parallelweerstand voor 94
 — sleepkontakt 122
 — regel 124
 — weerstand 71
 precisie weerstanden 30
 primaire stroomkring 244
 pulserende gelijkspanning 202, 266

R

RC-schakeling 191, 264
 RC-cascadeschakeling 199
 reactantie 246, 247
 recht evenredigheid 27, 80
 reciproke 32
 regelbare weerstanden 70
 rekenkundig gemiddelde 188
 relais met anker 238
 relais, stuiteren van 265

rendement van batterijen 108
restgolf 203
rhodium 253
rustkontakt 262

S

schaalverdeling ft-meter 5
— logaritmische 156
schakelcyclussen 260
schakeling van trafo en batterijen 110
schakelkring 259
schakelsnelheid 261
schakelschema, ft-meter 93
— potentiometer 74
— functies 134
schakelvertraging 199
schrijfwijze van grootheden en eenheden 20
sekundaire stroomkring 244
serieweerstand, karakteristiek 138
shunt, uitwendig 93
— inwendig 93
silicium kristal 160
simulatie 169
sleepkontakt potentiometer 70
soortelijke weerstand 32
spanning, is potentiaalverschil 60
— berekening toelaatbare 48
spanningstrip 10
spanning, vermogen afhankelijk van 46
spanningsbronnen, vervangings-
schema 98
spanningsdeler, dekaden 130
— cascadeschakeling 130
— gemengde schakeling 116
— karakteristiek 138
spanningsdeler, met condensator als
belasting 197
— condensator met weerstand 186, 197
— parallelschakeling van 146

— inwendige weerstand van bron met
belasting 99
— halvering spanning 72, 76
— regelbare 74
spanningshalvering, methode 72
spanningskonstante 102
spanningsmeting, meetfouten bij 127
spanningsmeter, gevoeligheidseisen 129
— gevoeligheid 67
— energieverbruik 66
spanningsrichting 54
spanningspulsen bij uitschakelen
van een inductie 245
spanningslevering 22
spanningsverandering in de tijd 186
spanningsverlies 97
sperrichting diode 159
spoel, elektrische traagheid 245
— richting elektr. magn. veld 230
— wikkelingen 233
— richting van de wikkeling 242
spoelraampje 250
stekkerhuis 8
stekkerschema 9
steilheid van weerstandsrechten 38
sterkstroom, gevaren van 31
strooiveld 224, 235
stroom, konstante 102
stroomkring 11
stroomkringen, koppeling van
verschillende 258
stroomkring, inwendig en uitwendig 23
stroomkringschema 8
stroomrichting, natuurkundige 23
— technische 23
stroomsterktemeter, inwendige
weerstand van 129
stroomsterktemeting, meetfouten 128
stroomstrips MSP 8
stroom/tijddiagram van wisselstroom 201
stroomvertakking 85
stroomwindingsdichtheid 235
stroomwissel, condensator als 207
stuiteren van relais 265
stuurkring 258

T

Tantalium elektrolytische konden-
satoren 215
technische stroomrichting 23
tegen EMK 245
telschakeling met integrator 213
temperatuurafhankelijke weerstand
gloeilamp 65
theoretische ontladcurve 192
— laadcurve 191
— weerstandsrechte 36
tijdas 108
transformator, principe 245
trapsgewijs instelbare weerstanden 70
trimmer 63
tweefasen gelijkrichting 204
tweepolen 52, 85, 98

U

uitgangsimpuls 209

V

vasthouden van impulsen 212
veldlijnen 235
verliesspanning 98
vermogen, afhankelijk van spanning 46
— definitie 44
— en weerstandswaarde 42
— aanpassing van 106
— afname, max. 47
— van batterijen 108
— vergelijkings versch. vormen 41
— parameter 48
vermogensverlies bij diode 165
verontreiniging van silicium kristallen 160

vertragingsschakelingen 199, 263
vervangingswaarde, capaciteiten in serie 182
verzadiging, magnetische 227
vierpolen 125, 194, 208
voltmeter, inwendige weerstand van 128
voorschakelweerstand voor ft-spanningsmeter 67

W

water, elektrolyse van 33
— geleiding en weerstand 32
weerstand 27
— magnetische 226
— poolafhankelijk 160
— bepaling met behulp van spanningen 64, 72, 76
— bepaling door stroom/spanningsmeting 129

vervangings- 132, 89
weerstand, vervanging parallel 88
— — in serie 55
weerstand, soortelijke 32
weerstandsdraad 93
weerstandsgedrag van diode 162
weerstand meetbrug, meetbereik 152
weerstandrechte 113
weerstandswaarde van gloeilampen 64
— van water 32
— kleurcode 29
werkelijke waarde 30
— van hobbylabor condensatoren 193
werkpunt 38, 137, 144
werkstroom 260
wervelstromen, magnetische 245

wet van ohm 28
Wheatstone 146
wikkeling, richting 242
wisselspanning op een elco 205
— transformator 245
wisselstroom eenfasige gelijkrichting 167, 201, 266

— halve periode 202
— stroom/tijd diagram 201
— demagnetisering 228
— verandering van richting 166
— vermogen 202
— deel van een gelijkstroom 207

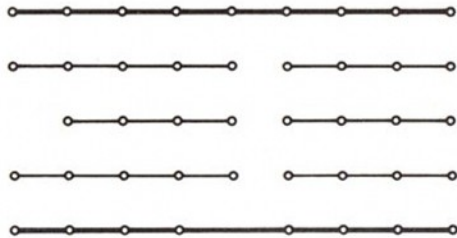
IJ

ijkstandaard 76, 154
ijzer in een magnetisch veld 224
ijzerpoeder, krachtlijnen 221

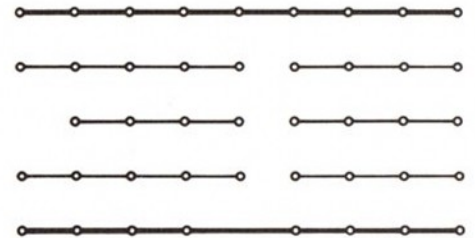
Z

zelfontlading van elco's 212, 215
zout, verhoging geleiding van water 31

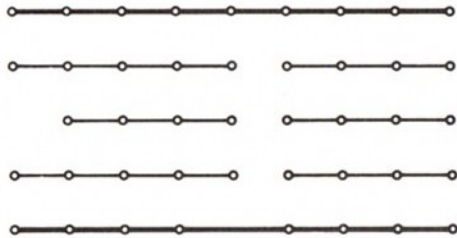
Toe schakeling zijde



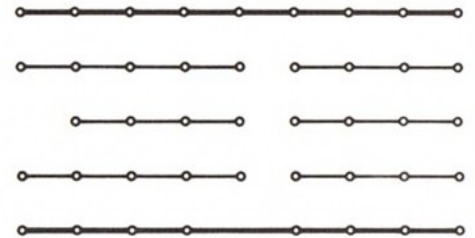
Toe schakeling zijde



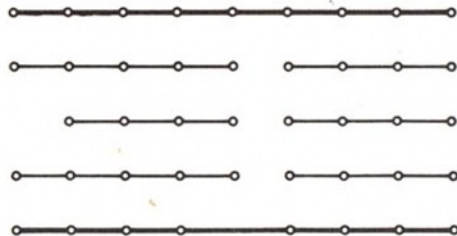
Toe schakeling zijde



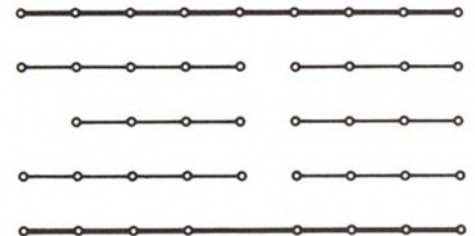
Toe schakeling zijde



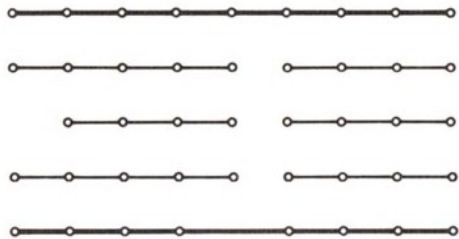
Toe schakeling zijde



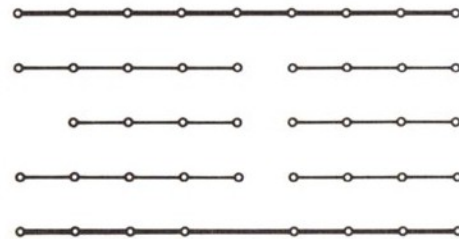
Toe schakeling zijde



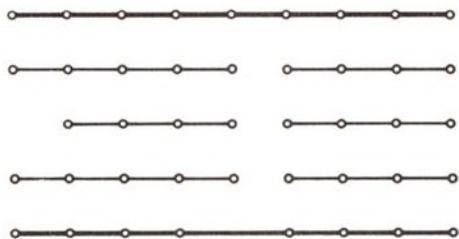
Toe schakeling zijde



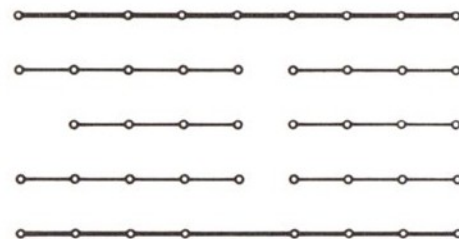
Toe schakeling zijde



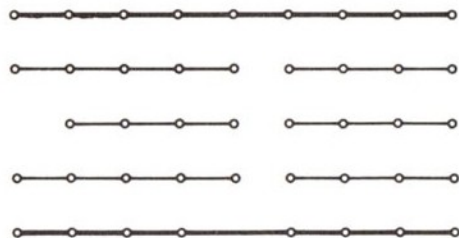
Toe schakeling zijde



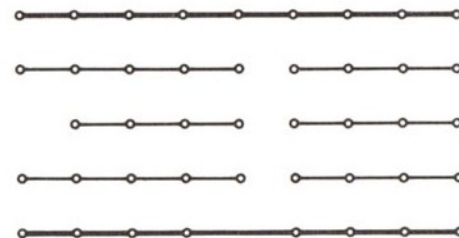
Toe schakeling zijde



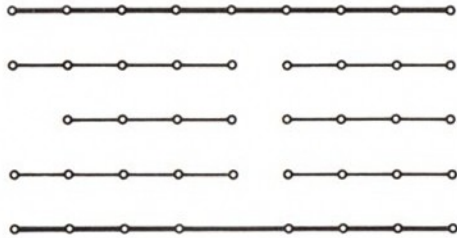
Toe schakeling zijde



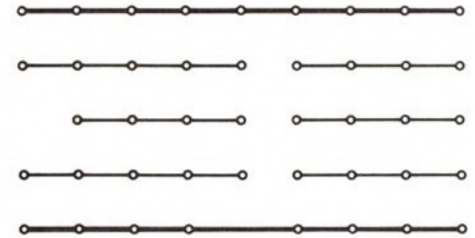
Toe schakeling zijde



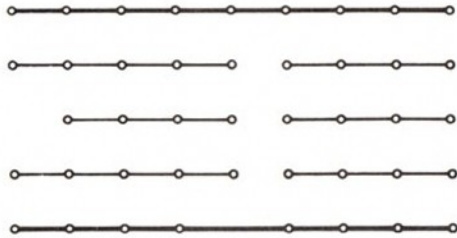
Toe schakeling zijde



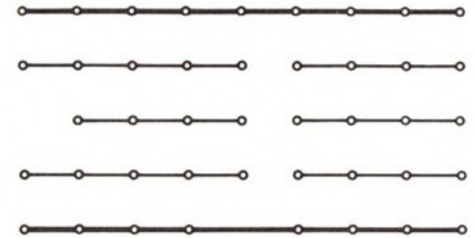
Toe schakeling zijde



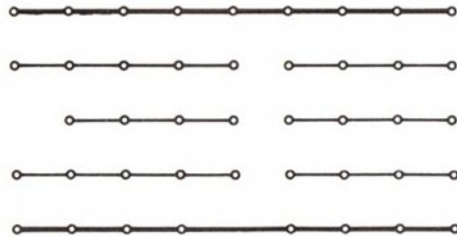
Toe schakeling zijde



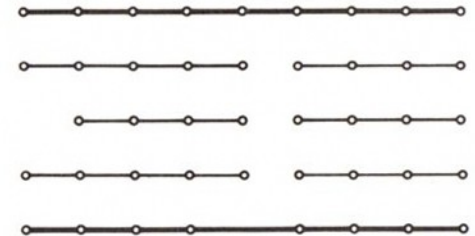
Toe schakeling zijde



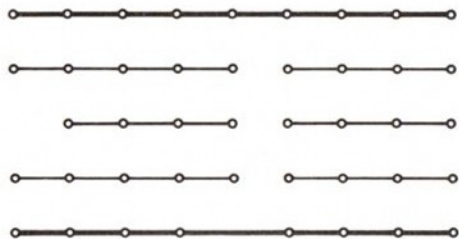
Toe schakeling zijde



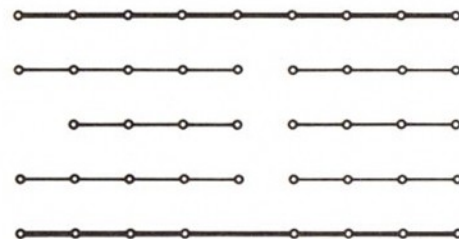
Toe schakeling zijde



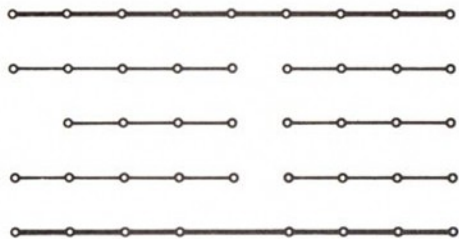
Toe schakeling zijde



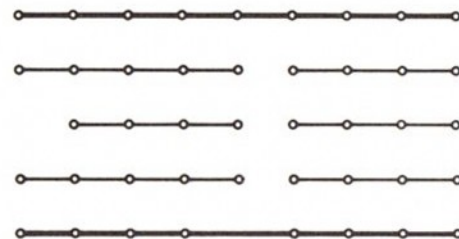
Toe schakeling zijde



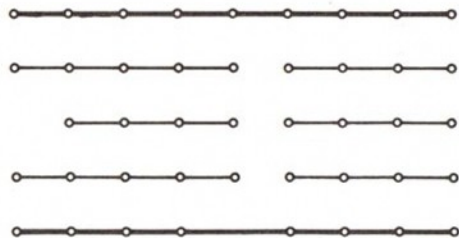
Toe schakeling zijde



Toe schakeling zijde



Toe schakeling zijde



Toe schakeling zijde

