

## 1.9 Vermogensverlies

### 1.9.1 Elektriciteitsleiding



Fig. 40 Ondergrondse leidingen waaronder ook elektriciteitsleidingen.



Fig. 41 Luchtlijnen van een lokaal elektriciteitsnet in Oostenrijk.

Een elektriciteitsleiding transporteert elektrische stroom. Deze leidingen (vroeger sprak men van geleidingen) bestaan in ieder geval uit elektrisch geleidend materiaal, al dan niet met daaromheen een elektrisch isolerende mantel. In het laatste geval kan een leiding ook bestaan uit meerdere kernen van elektrisch geleidend materiaal (aders) waarbij iedere ader afzonderlijk elektrisch is geïsoleerd van andere aders en het geheel met een mantel is omgeven.

Er kan onderscheid worden gemaakt tussen geïsoleerd elektriciteitsdraad in buis en kabels (dit laatste bestaat meestal uit een samenstel van meerdere geïsoleerde aders) en luchtlijnen, ongeïsoleerde draden die bovengronds opgehangen zijn aan palen of masten, zoals bijvoorbeeld in gebruik bij hoogspanningsnetten.

De meeste elektriciteitsleidingen bij huisinstallaties zijn voorzien van twee of drie aders. Bij twee aders zijn dit de fase (bruine isolatie) en de nul leider (blauwe isolatie). Leidingen met drie aders zijn daarnaast voorzien van een aardendraad (geel/groene isolatie).

Leidingen voor krachtstroom (driefasenspanning) bevatten doorgaans drie, vier of vijf geleiders, respectievelijk: de drie fasen; de drie fasen en de nul; en de drie fasen, de nul en aarde.

Kabels die geschikt zijn voor aanleg in de grond zijn voorzien van een aardscherm. Deze zogenaamde grondkabels bevatten direct onder de buitenmantel een gegalvaniseerde staaldraadomvlechting of een loodmantel. Behalve voor bescherming dient het aardscherm tevens als aardleiding.



## Eigenschappen

- De doorsnede van de geleider bepaalt de maximaal toelaatbare stroomsterkte.
- De isolatiewaarde van de mantel bepaalt de maximaal toelaatbare elektrische spanning.
- Wanneer een leiding buigzaam moet zijn, bestaat de kern (ader) uit meerdere samengeslagen geleiders (litze).

### Materiaalkeuze geleider

Voor de elektriciteitsleidingen kan in principe elk geleidend materiaal worden gebruikt als zilver, koper, of aluminium. In de praktijk wordt echter voor deze leidingen bijna altijd blank koper toegepast, meestal aangeduid als elektrolytisch koper. Deze kopersoort wordt langs elektrolytische weg verkregen en wordt geraffineerd tot een kopergehalte van 99,95%. Dit hoge kopergehalte is noodzakelijk, aangezien zelfs geringe verontreinigingen het elektrische geleidingsvermogen van dit materiaal sterk verminderen. Doordat namelijk elke geleider een bepaalde elektrische weerstand bezit, wordt bij stroomdoorgang warmte ontwikkeld en ontstaan er spanningsverliezen over de leiding. Deze verliezen moeten natuurlijk zo klein mogelijk blijven.

### Materiaalkeuze isolatie

Aangezien elektriciteitsleidingen voorkomen in huisinstallaties met een betrekkelijk klein elektrisch vermogen maar ook in supermarkten, op schepen, in fabrieken of andere grote installaties, is er een ruime keus in de aderdoorsnede van deze leidingen. Ook kan worden gekozen uit diverse soorten leidingen met soms bijzondere specifieke eigenschappen, afhankelijk van de plekken waar deze worden gemonteerd en welke omstandigheden daar gelden. Zo bestaan leidingen met aderisolatie van vinyl, de zogenaamde VD-draad, die in huisinstallaties worden verwerkt, of VMvK-kabel voor algemene montage in het zicht. In installaties waar hoge eisen worden gesteld aan de brandveiligheid, past men bijvoorbeeld YMvK-kabel toe.

De bijzonderheden van deze en andere leidingsoorten voor toepassing in Nederland zijn te vinden in bijvoorbeeld het normblad NEN 3207:1990: Geïsoleerde leidingen voor sterkstroom — Systemen voor de aanduiding van leidingtypen.

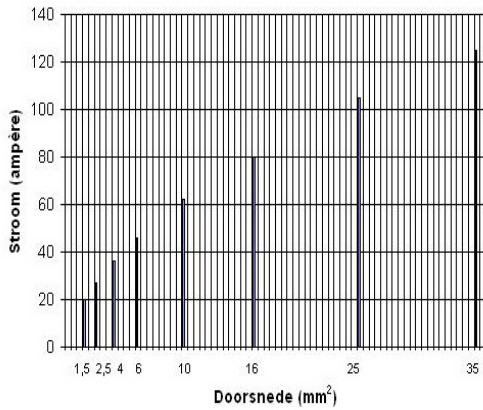
### Stroombelastbaarheid en stroomdichtheid

In bijgaande tabel is een reeks driedraderige kabels met aderisolatie van vinyl weergegeven van 1,5 mm<sup>2</sup> tot 400 mm<sup>2</sup> met de daarbij behorende toelaatbare stromen en stroomdichtheid.

Leidingen worden met kabel aangeduid als er meer dan één ader aanwezig is.



Stroombelastbaarheid van 3-aderige kabels met aderisolatie van vinyl



Stroomdichtheid van 3-aderige kabels met aderisolatie van vinyl

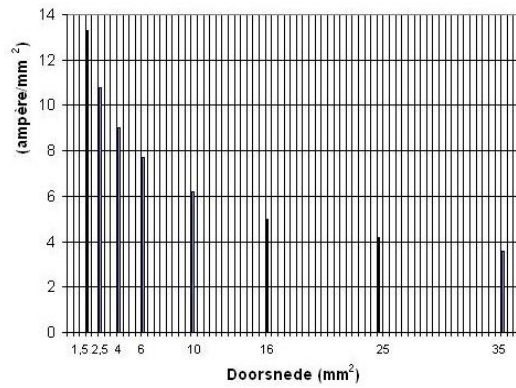


Fig. 42 Stroombelastbaarheid.

Stroombelastbaarheid en stroomdichtheid van 3-aderige kabels met aderisolatie van vinyl		
Doorsnede (mm <sup>2</sup> )	Toegelaten stroom (ampère)	Stroomdichtheid (ampère/mm <sup>2</sup> )
1,5	19,5	13,3
2,5	27	10,8
4	36	9
6	46	7,7
10	62	6,2
16	80	5
25	105	4,2
35	125	3,6
50	155	3,1
70	195	2,8
95	235	2,5
120	270	2,3
150	310	2,1



185	345	1,9
240	385	1,6
300	425	1,4
400	490	1,2

Tabel 2

Voor een goed inzicht in de stroombelastbaarheid, is in de bijbehorende grafiek alleen het gebied van 1,5 mm<sup>2</sup> tot 35 mm<sup>2</sup> weergegeven. Opvallend is, dat naarmate de doorsnede van de geleidingen groter wordt, de toegestane stroom niet in gelijke mate stijgt. Dit is nog beter te zien in de derde kolom van de tabel die de stroomdichtheid van deze geleiders weergeeft. In de grafiek hierbij komt dat duidelijk tot uitdrukking.

Men zou verwachten dat als bij een geleider van 2,5 mm<sup>2</sup> een stroom van 27 ampère is toegestaan, bij 25 mm<sup>2</sup> een stroom van 270 ampère zou mogen worden toegelaten. Dit is duidelijk niet het geval, zoals de tabel laat zien.

De in de geleiders ontwikkelde warmte moet aan de buitenzijde van de geleider — dus aan de omtrek hiervan — aan de omgeving worden afgegeven. Bij stijging van de doorsnede, houdt de omtrek van de geleider echter geen gelijke tred met de doorsnede ervan.

Als bijvoorbeeld de doorsneden 4 mm<sup>2</sup> en 16 mm<sup>2</sup> worden genomen, dus met een oppervlakteverhouding van 1:4, dan geldt, teruggerekend naar de omtrek, dat de verhouding hier ligt op  $\frac{1}{\sqrt{4}} = \frac{1}{2}$ . Bij 10 mm<sup>2</sup> en bijvoorbeeld 400 mm<sup>2</sup> gelden de verhoudingen 1:40 voor de doorsneden en  $\frac{1}{\sqrt{40}} = \frac{1}{2\sqrt{10}}$  voor de omtrekken. Het komt erop neer dat, gerekend vanuit de diameter van de leiding, de stijging van de doorsneden kwadratisch verloopt en de stijging van de omtrekken lineair. Naarmate de doorsnede groter wordt, gaat warmteoverdracht door conductie iets omhoog en wordt ook het aandeel van de convectie wat groter, zodat het geheel niet al te dramatische vormen aanneemt.

### Stroomverdringing

Er is nog een belangrijk fenomeen aanwezig bij het stijgen van de doorsneden. Het blijkt dat bij transport van wisselstroom de geleiders een zekere stroomverdringing ondervinden. Men noemt dit ook wel het skineffect. Stroomverdringing wil zeggen, dat niet de gehele geleiderdoorsnede benut wordt voor het transport van elektriciteit, maar dat de kernen van de geleiders in mindere mate meedoen. De indringdiepte van de stroom is bij de normaal geldende netfrequentie van 50 Hz ongeveer 10 mm. Bij kleine doorsneden is dit effect dus nauwelijks van belang, maar naarmate de geleiderdoorsnede stijgt, wordt de invloed van dit effect groter.

Bij 400 mm<sup>2</sup> doet een kern van circa 2,5 mm doormeter niet mee aan de stroomgeleiding, wat omgerekend naar de diameter neerkomt op ruim 1,2%. Bij een doorsnede van 1000 mm<sup>2</sup> is dit al een kern van circa 15 mm  $\varnothing$  geworden, en is dus ongeveer 19% van de doorsnede inactief. Dit is één van de redenen waarom dan ook veelal holle geleiders voor de hoofdverdeel-inrichtingen worden gekozen bij grote in- en uitgaande transporten van elektriciteit, zoals dat in de onderstations in het hoogspanningsnet het geval is.



### Leidingverliezen

Door de stroom  $I$  die een belasting  $P$  van een installatie opneemt treden in de leidingen van en naar de installatie verliezen op, die in twee categorieën kunnen worden onderscheiden, namelijk spanningsverliezen en vermogensverliezen.

### Verliesgevende elementen

Een leiding die op een wisselstroom is aangesloten, heeft naast een bedrijfswaerstand  $R$  ook een bedrijfsinductie  $L$ , meestal leidingreactantie genoemd. Beide elementen zijn gelijkmatig over de leiding verdeeld, en bepalen samen het leidingverlies. De bedrijfswaerstand  $R$  van een leiding levert spanningsverliezen en vermogensverliezen op. De leidingreactantie  $L$  — algemeen aangeduid met  $X$  ( $= \omega L = 2\pi fL$ ) — levert alleen spanningsverliezen op.

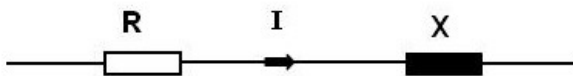


Fig. 43 Leidingelementen

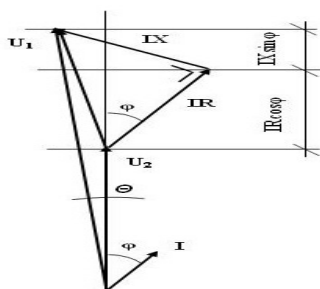
### Spanningsverliezen

Als de stroom  $I$  van een belasting door een leiding vloeit, dan blijkt de spanning  $U_2$  aan het eind van de leiding lager te zijn dan de voedende spanning  $U_1$ . Om dit verschil — het spanningsverlies  $U_v$  — vast te stellen, moeten de spanningsverliezen over de elementen  $R$  en  $X$  worden bepaald.

Als de belasting voornamelijk is opgebouwd uit motoren, gasontladingslampen of andere inductieve toestellen, dan is er een faseverschuiving  $\phi$  in de installatie aanwezig, waarbij de stroom  $I$  ten opzichte van de spanning is verschoven. Hierbij is het spanningsverlies  $U_{vR}$  over de bedrijfswaerstand  $R$  gelijk aan  $I \cdot R$ , en het spanningsverlies  $U_{vX}$  over de bedrijfsinductiviteit  $X$  gelijk aan  $I \cdot X$ . Vectorieel gezien (zie diagram) loopt  $I \cdot R$  evenwijdig met  $I$ , en staat  $I \cdot X$  daar loodrecht op. Tussen de spanningen  $U_1$  en  $U_2$  is de hoek  $\Theta$  aanwezig, die meestal kleiner dan  $6^\circ$  is en daardoor verwaarloosd mag worden aangezien  $\cos \Theta = 0,9945 \approx 1$ .

Uit het diagram valt verder af te leiden dat het spanningsverlies  $U_{vR}$  over de weerstand  $R = I \cdot R \cos \phi$  en het spanningsverlies  $U_{vX}$  over de reactantie  $X = I \cdot X \sin \phi$ . Het spanningsverlies over de leiding bij een inductieve belasting wordt hierdoor:  $U_v = I (R \cos \phi + X \sin \phi)$  volt. Als de belasting capacitief is, wordt het spanningsverlies  $U_v = I (R \cos \phi - X \sin \phi)$  volt, zodat in het algemeen de formule voor het spanningsverlies kan worden geschreven als:

$$U_v = I (R \cos \phi \pm X \sin \phi) \text{ volt.}$$



Vervangingschema



Specifieke waarden van YMvK mb-kabel			
Doorsnede (mm <sup>2</sup> )	(maximale) geleiderweerstand R (Ω/km)	leidingreactantie L (mH/km)	omgerekende leidingreactantie X (Ω/km)
1,5	12,1	0,33	0,10
2,5	7,4	0,31	0,11
4	4,6	0,3	0,094
6	3,1	0,28	0,088
10	1,8	0,26	0,082
16	1,15	0,25	0,079
25	0,73	0,24	0,075
35	0,52	0,23	0,072
50	0,38	0,20	0,063
70	0,27	0,19	0,060
95	0,19	0,18	0,057
120	0,15	0,17	0,053
150	0,12	0,17	0,053
185	0,10	0,17	0,053
240	0,075	0,16	0,050

Tabel 3

### Getallenvoorbeelden

Via een YMvK-kabel, met een lengte van 300 meter, wordt een driefasen installatie van 400 V gevoed met een stroom van 150 A. Als de arbeidsfactor ( $\cos \phi$ ) van deze installatie bijvoorbeeld 0,85 is en de kabeldoorsnede 70mm<sup>2</sup> dan is het spanningsverlies over de leiding te berekenen met  $U_v = I \times R \cos \phi \sqrt{3}$  en de gegevens uit de tabel voor de YMvK mb kabel.

Het spanningsverlies blijkt te zijn:

$U_v = 150 \times 0,3 \text{ km} \times 0,27 \text{ } \Omega/\text{km} \times 0,85 \sqrt{3} = 17,9 \text{ V}$ , wat overeenkomt met  $17,9/4 \approx 4,5\%$ , wat nog net een



toegestane waarde is, aangezien de maximale grenswaarde 5% is.

Als  $I = 300$  A wordt gekozen bij een doorsnede  $> 120\text{mm}^2$ , namelijk  $185\text{mm}^2$ , dan vormt nu de leiding reactantie X een deel van het spanningsverlies.

Als uit  $\cos \phi = 0,85$  wordt afgeleid, dat  $\sin \phi = 0,53$ , dan wordt het spanningsverlies:

$U_v = 300 \times (0,03 \times 0,85 + 0,0159 \times 0,53)\sqrt{3} = 17,7$  V (= 4,4%). Zou X worden genegeerd, dan zou

$U_v = 13,2$  V, wat dus maar 3,3% van de netspanning is.

Het vermogensverlies  $P_v$  in de kabel van  $185\text{mm}^2$  is volgens  $3 \times I^2 \times R = 3 \times 300^2 \times 0,03 = 8100$  watt oftewel 8,1 kW. Het opgenomen vermogen van de installatie bedraagt volgens  $P_w = U \times I \times \sqrt{3} \times \cos \phi = 400 \times 300 \times \sqrt{3} \times 0,85 = 176.669$  watt = 176,7 kW. Het vermogensverlies in de leiding is  $8,1/1,77 \approx 4,6\%$ . Gerekend over een jaar bij een belastingsgraad van 75% en een belastingstijd van 8 uur, is de opgenomen energie in de kabel =  $0,75 \times 8 \times 365 \times 8,1 =$

17.740 kWh.

In de laagspanningsnetten 230/400 V hoeft met het reactieve gedeelte van het spanningsverlies geen of nauwelijks rekening te worden gehouden, aangezien dit pas bij een doorsnede van  $120\text{mm}^2$  en hoger een rol gaat spelen. Dit houdt in dat men voor het spanningsverlies in laagspanningsnetten voor 230V meestal schrijft:  $U_v = I \times R \cos \phi$ , en voor de driefasenspanning 400 V:  $U_v = I \times R \cos \phi \sqrt{3}$ . Dit houdt ook in dat het spanningsverlies voor leidingen tot  $120\text{mm}^2$  niet verandert als een installatie is uitgerust met  $\cos \phi$ -compensatie.

Bij kabels voor 10 kV en hoger mag tot  $95\text{mm}^2$  het aandeel van X worden verwaarloosd, maar bij bovengrondse hoogspanningslijnen moet door de opbouw en de doorsnede hiervan het reactieve gedeelte altijd in de berekeningen worden betrokken, en geldt gewoon:  $U_v = I (R \cos \phi \pm X \sin \phi) \sqrt{3}$  volt.

### 1.10.2 Vermogensverliezen

De stroom I zorgt ervoor dat in leidingen vermogensverlies door warmteontwikkeling ontstaat. Het vermogen P dat in de bedrijfsweerstand R wordt ontwikkeld wordt omschreven als:  $P_v = I^2 \cdot R$  (watt). Bij een driefasen-spanning zijn drie geleiders aanwezig die alle drie de bedrijfsweerstand R bezitten, zodat het vermogensverlies hierbij moet worden geformuleerd als:  $P_v = 3 \cdot I^2 \cdot R$  (watt). Bij kabels voor 10 kV en bij hoogspanningslijnen is er ook een element waar rekening mee moet worden gehouden, namelijk de capaciteit. Het blijkt dat tussen de geleiders onderling en tussen de geleiders en aarde een bepaalde capaciteit C aanwezig is die voor een zogenaamde laadstroom zorgt. Deze laadstroom maakt dat de bedrijfsstroom toeneemt, waardoor de vermogensverliezen en de spanningsverliezen groter worden. De grootte van de capaciteit en de laadstroom hangt samen met de lengte van de leiding, de onderlinge afstand van de geleiders en de afstand naar aarde. De formules voor het berekenen zijn vrij ingewikkeld.

Bij de hoogspanningslijnen is nog een extra element werkzaam, dat verliezen oplevert, namelijk de isolatieweerstand. De isolatieweerstand  $R_A$  (A als afkorting voor "aarde") geeft aan dat er tussen de geleider en de aarde geen oneindig hoge weerstand aanwezig is, maar dat via de isolatoren, afhankelijk van uitwendige omstandigheden als vocht en vuil, een zekere geleiding ontstaat en kleine lekstromen worden gevormd, waardoor er vermogensverlies optreedt.



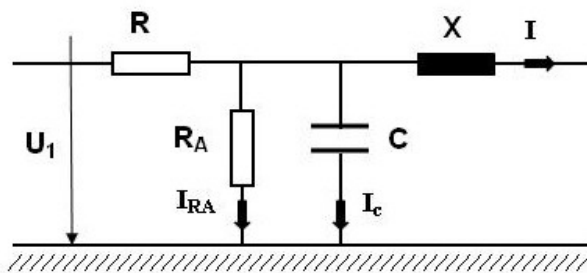


Fig. 44 Vervangingsschema hoogspanning

Verder treedt er bij spanningen  $> 100$  kV een verschijnsel op, dat wordt aangeduid met 'corona'. Corona ontstaat doordat de lucht om een geleider doorslaat (ioniseert), zodra de veldsterkte om die geleider de doorslaggrens van lucht overschrijdt, waardoor er ook verlies ontstaat. Het totale vermogensverlies  $P_A$ , dat door de aanwezigheid van  $R_A$  ontstaat, wordt uitgedrukt als  $P_A = U^2/R_A$  (watt). Voor dit verlies wordt meestal gemiddeld 1 kW/km aangehouden.

### 1.9.3 Producenten

Een aantal grote producenten van elektriciteitsleidingen:

- Draka (in 2011 overgenomen door Prysmian)
- General Cable
- NKF (in 1999 opgenomen in het Draka concern en in 2000 overgenomen door Pirelli Cavi)
- Nexans
- NKT Cables Group
- Pirelli Cavi (in 2005 verkocht door Pirelli aan Goldman Sachs, nieuwe naam: Prysmian)
- Prysmian (vanaf 2011 het grootse kabelbedrijf ter wereld)
- Tele-Fonika Kable Sp. z o.o.
- Twentsche Kabelfabriek (TKF)

### Energie verliezen in transformatoren, gelijkrichters en netadapters

In dit artikel beschrijf ik metingen aan transformatoren, gelijkrichters en netadapters. Het doel is, om te zien of er energie te besparen is door de toepassing van de juiste componenten.

### E-I transformator versus ringkern transformator

Om te beginnen heb ik de energieverliezen gemeten in twee transformatoren, beide met een vermogen van 50 VA. Één transformator is een conventionele transformator met een E-I kern. De andere transformator is een ringkern transformator.







Fig. 45 E-I kern transformator 2x 24 V 50 VA



Fig. 46 Ringkern transformator 2x 9V 50 VA

Van de transformators heb ik de uitgangsspanning gemeten, bij diverse belasting weerstanden. Het ingangsvermogen van de transformator is gemeten met mijn energiemeter. Uit deze gegevens heb ik het uitgangsvermogen, het vermogensverlies, en het rendement van de transformator berekend.

Het rendement is het uitgangsvermogen gedeeld door het ingangsvermogen. Het vermogensverlies is het verschil tussen uitgangsvermogen en ingangsvermogen, het vermogensverlies wordt omgezet in warmte in de transformator.

De twee transformators hebben verschillende uitgangsspanningen, daarom gebruik ik voor de twee transformators verschillende waarden belasting weerstanden. Van de transformators had ik de uitgangswindingen in serie geschakeld

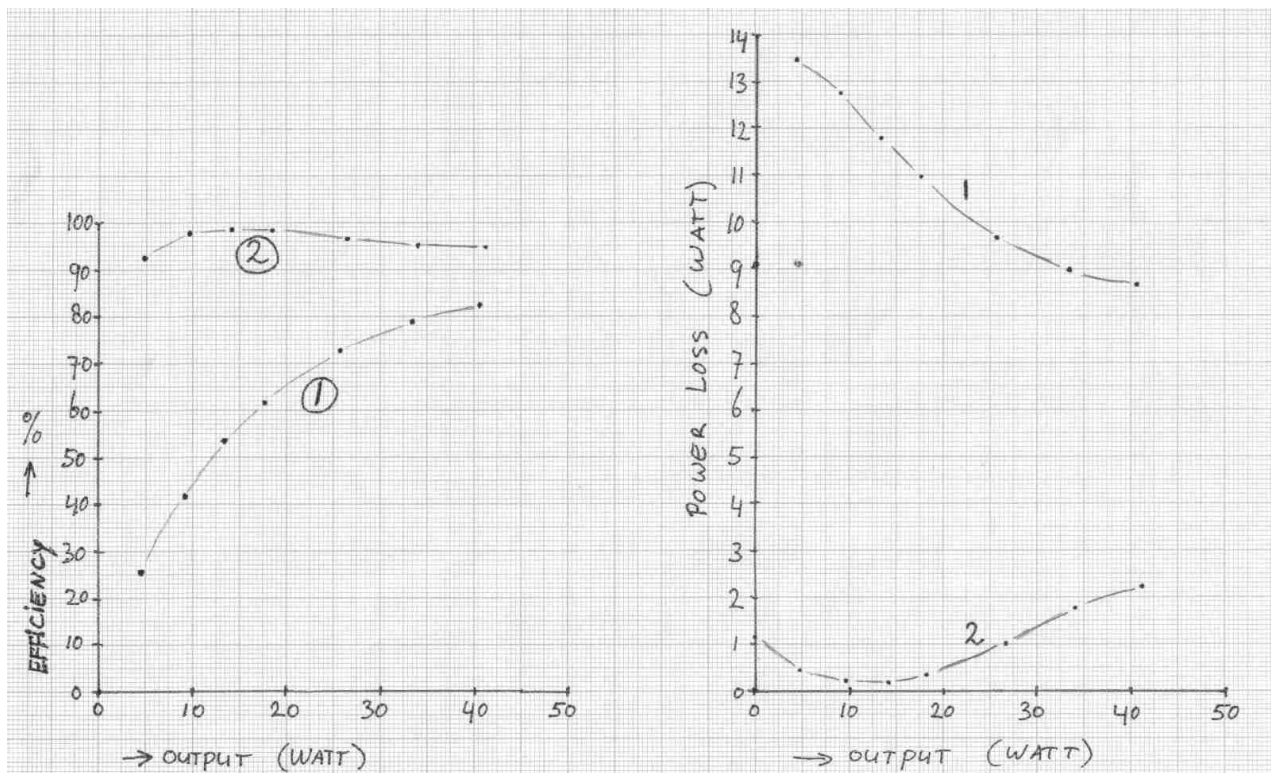
Belasting weerstanden parallel	Uitgang spanning (Volt AC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-		9,1	0,000	0,000	9,100
1x 560 $\Omega$	51,0	18,1	4,645	0,257	13,455
2x 560 $\Omega$	50,6	21,9	9,144	0,418	12,756
3x 560 $\Omega$	50,2	25,3	13,500	0,534	11,800
4x 560 $\Omega$	49,8	28,7	17,715	0,617	10,985
6x 560 $\Omega$	49,1	35,5	25,830	0,728	9,670
8x 560 $\Omega$	48,5	42,6	33,604	0,789	8,996
10x 560 $\Omega$	47,7	49,3	40,630	0,824	8,670

Tabel 4. Verliezen in E-I kern transformator 2x 24 V en 50 VA.



Belasting weerstanden parallel	Uitgang spanning (Volt AC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-		1,16	0,000	0,000	1,160
1x 82 $\Omega$	20,1	5,33	4,927	0,924	0,403
2x 82 $\Omega$	20,0	9,97	9,756	0,979	0,214
3x 82 $\Omega$	19,7	14,38	14,198	0,987	0,182
4x 82 $\Omega$	19,4	18,70	18,359	0,982	0,341
6x 82 $\Omega$	19,1	27,70	26,693	0,964	1,007
8x 82 $\Omega$	18,7	35,90	34,116	0,950	1,784
10x 82 $\Omega$	18,4	43,50	41,288	0,949	2,212

Tabel 5. Verliezen in ringkern transformator 2x 9 V 50 VA.



Grafiek 1:

Rendement (efficiency) versus uitgangsvermogen en vermogensverlies (power loss) versus uitgangsvermogen.



- 1 = E-I kern transformator (zie tabel 1)
- 2 = Ringkern transformator (zie tabel 2)

**Verliezen in gelijkrichters.**

De volgende metingen laten het effect zien van diverse soorten gelijkrichters op het vermogensverlies.

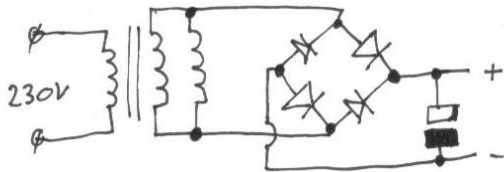


Fig. 47

De ringkern transformator 2x 9V 50 VA is op deze wijze aangesloten op een gelijkrichter circuit. De twee 9 V windingen staan parallel, de gelijkrichter bestaat uit 4 silicium diodes (3,7 A brugcel). De waarde van de elco is 4700  $\mu$ F.

Belasting weerstand parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	13,46	1,17	0,000	0,000	1,170
1x 47 $\Omega$	12,26	3,98	3,198	0,804	0,782
2x 47 $\Omega$	11,84	7,22	5,965	0,826	1,255
3x 47 $\Omega$	11,53	10,15	8,486	0,836	1,664
4x 47 $\Omega$	11,28	13,14	10,829	0,824	2,311
6x 47 $\Omega$	10,80	18,67	14,890	0,798	3,780
8x 47 $\Omega$	10,40	23,41	18,410	0,786	5,000
10x 47 $\Omega$	10,03	27,95	21,404	0,766	6,546

Tabel 6. Verliezen in ringkern transformator + 4 silicium diodes, overeenkomstig schema 1.



## Gelijkrichter met 2 silicium diodes

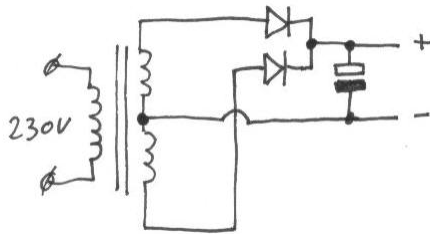


Fig. 48

De gelijkrichter is nu op deze wijze aangesloten, met twee silicium diodes (in plaats van 4).

De twee diodes zijn onderdeel van de 3,7A brugcel uit schema 1, de twee andere diodes blijven ongebruikt.

De twee windingen van de transformator staan nu in serie.

De transformator is dezelfde 2x 9V 50VA ringkern.

De waarde van de elco is 4700  $\mu$ F.

Belasting weerstand parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	13,95	1,17	0,000	0,000	1,170
1x 47 $\Omega$	12,94	4,00	3,563	0,891	0,436
2x 47 $\Omega$	12,47	7,46	6,617	0,887	0,843
3x 47 $\Omega$	12,10	10,60	9,345	0,882	1,255
4x 47 $\Omega$	11,80	13,60	11,850	0,871	1,750
6x 47 $\Omega$	11,23	19,05	16,100	0,845	2,950
8x 47 $\Omega$	10,78	23,86	19,780	0,829	4,080
10x 47 $\Omega$	10,30	28,06	22,572	0,804	5,488

Tabel 7: Verliezen in ringkern transformator + 2 silicium diodes, in overeenstemming met schema 2.



### Gelijkrichter met 2 schottky diodes

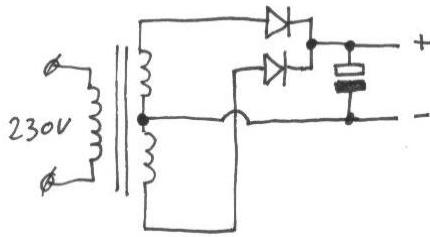


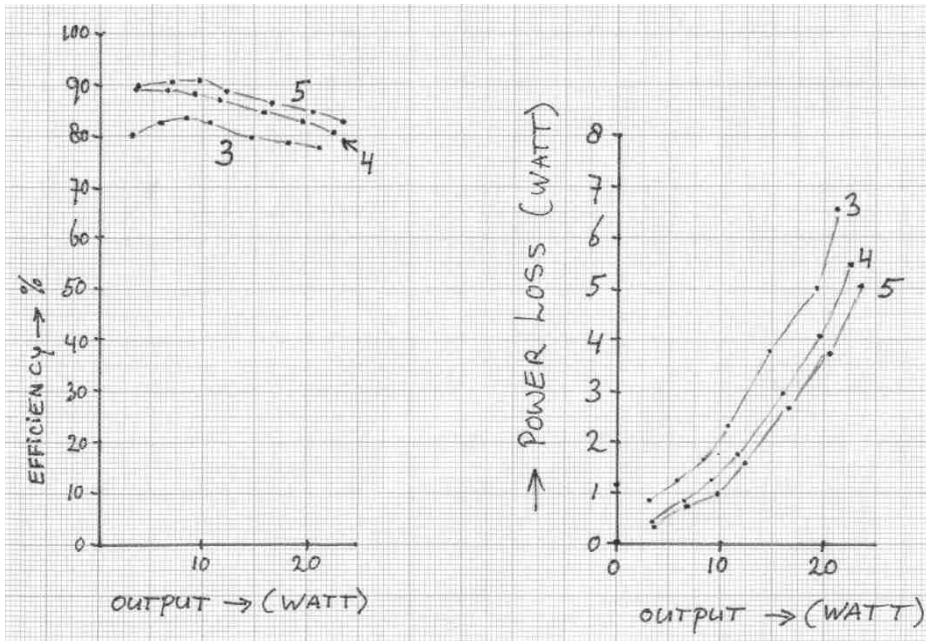
Fig. 49

Nu zijn de 2 silicium diodes vervangen door 2 schottky diodes van het type MBR360 (3A 60V). De transformator is dezelfde 2x 9V 50VA ringkern. De waarde van de elco is 4700  $\mu$ F.

Belasting weerstanden parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	14,22	1,17	0,000	0,000	1,170
1x 47 $\Omega$	13,30	4,20	3,764	0,896	0,436
2x 47 $\Omega$	12,79	7,69	6,961	0,905	0,729
3x 47 $\Omega$	12,43	10,86	9,862	0,908	0,998
4x 47 $\Omega$	12,10	14,06	12,460	0,886	1,600
6x 47 $\Omega$	11,48	19,51	16,824	0,862	2,686
8x 47 $\Omega$	11,00	24,32	20,596	0,847	3,724
10x 47 $\Omega$	10,57	28,80	23,771	0,825	5,029

Tabel 8. Verliezen in ringkern transformator + 2 schottky diodes, overeenkomstig schema 3.





Grafiek 2: De waarden voor rendement en vermogensverlies uit tabel 3, 4 en 5 zijn weergegeven in deze grafieken.

Het gebruik van 2 schotky diodes geeft het beste rendement, en het laagste vermogensverlies.

Verliezen in diverse soorten voedingen en adapters

Ringkern 2x 6V 15 VA

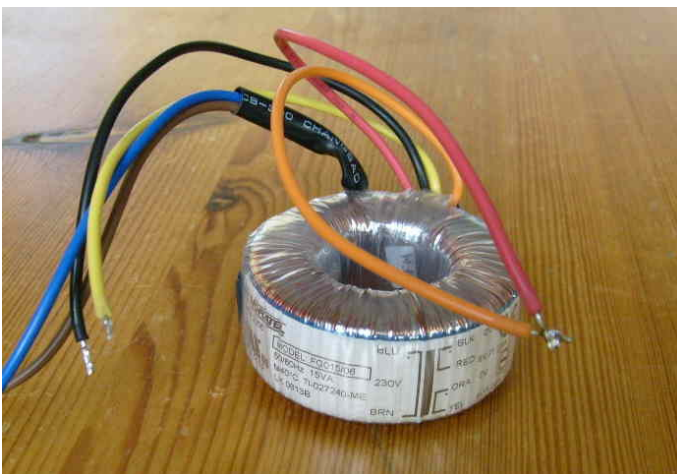
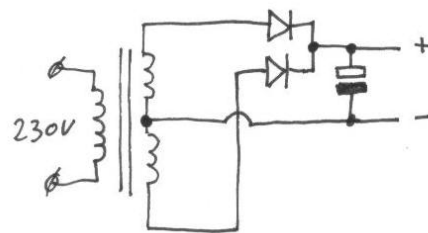


Fig. 50



Deze voeding heb ik gebouwd met de volgende componenten:

1. Ringkern transformator 2x 6V 15 VA
2. Schotky diodes MBR360 en een elco van 4700  $\mu$ F.



De uitgangsspanning is niet gestabiliseerd.

Belasting weerstand parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	9,48	< 0,50*	0,000	0,000	< 0,500
1x 82 Ω	8,95	1,18	0,977	0,828	0,203
2x 82 Ω	8,65	2,11	1,825	0,865	0,285
3x 82 Ω	8,41	3,05	2,588	0,848	0,462
4x 82 Ω	8,20	3,98	3,280	0,824	0,700
5x 82 Ω	8,01	4,63	3,912	0,845	0,718
6x 82 Ω	7,84	5,56	4,497	0,809	1,063
8x 82 Ω	7,50	6,94	5,488	0,791	1,452
10x 82 Ω	7,23	8,07	6,375	0,790	1,695

Tabel 9. Ringkern transformator 2x 6V 15 VA

\* mijn energiemeter kan geen vermogens lager dan 0,5 W meten.

### Schakelende adapter.



Fig. 51 Schakelende adapter. Merk: HQ. Model: P.SUP.SMP1-BL



Deze adapter is instelbaar tussen de 3 en 12 Vdc. De uitgangsspanning is gestabiliseerd en dus constant. Maar ik heb wel gemerkt dat deze adapter storing kan veroorzaken als hij is aangesloten op b.v. radio's of telefoons. Deze adapter is getest bij 9 volt uitgangsspanning.

Belasting weerstanden parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	9,06	< 0,50	0,000	0,000	< 0,500
1x 82 Ω	9,05	1,87	0,999	0,534	0,871
2x 82 Ω	9,04	3,01	1,993	0,662	1,017
3x 82 Ω	9,02	4,40	2,977	0,677	1,423
4x 82 Ω	9,00	5,56	3,951	0,711	1,609
5x 82 Ω	8,98	6,72	4,917	0,732	1,803
6x 82 Ω	8,97	8,14	5,887	0,723	2,253
7x 82 Ω	8,95	9,30	6,838	0,735	2,462

Tabel 10. Schakelende adapter

### Niet gestabiliseerde adapter.



Fig. 52 Niet gestabiliseerde adapter. Merk: MW. Model: MW79GS

De uitgangsspanning is instelbaar tussen 3 en 12 V, en getest bij 9 V. De maximale uitgangsstroom is 800 mA.





De adapter heeft intern een kleine E-I transformator.

Belasting weerstand parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	12,42	2,22	0,000	0,000	2,220
1x 82 $\Omega$	11,56	6,68	1,630	0,244	5,050
2x 82 $\Omega$	10,99	7,58	2,946	0,389	4,634
3x 82 $\Omega$	10,50	8,25	4,034	0,489	4,216
4x 82 $\Omega$	10,08	8,97	4,956	0,553	4,014
5x 82 $\Omega$	9,74	9,63	5,785	0,601	3,845
6x 82 $\Omega$	9,40	10,21	6,465	0,633	3,745

Tabel 11. Niet gestabiliseerde adapter 800 mA

### Gestabiliseerde adapter



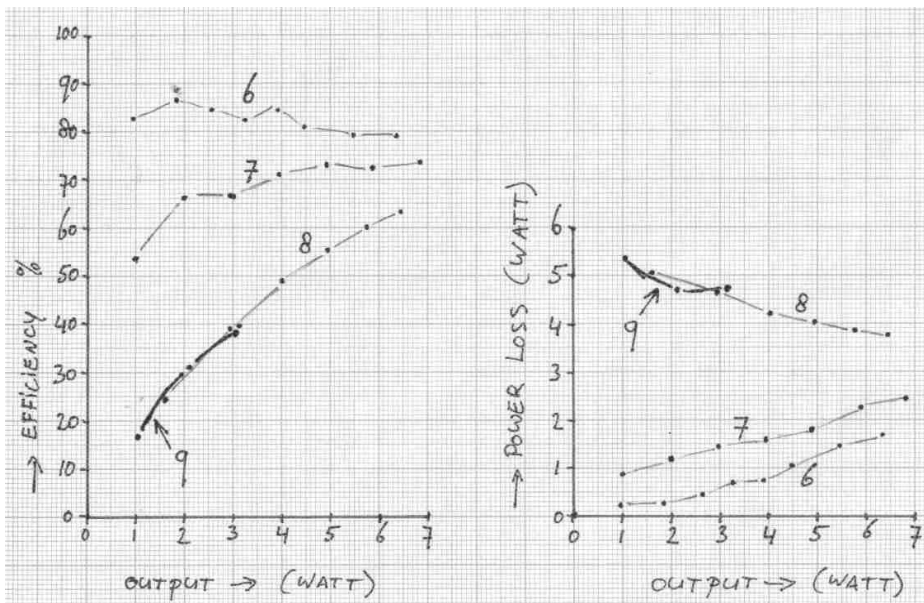
Fig. 53 Gestabiliseerde adapter. Merk: Skytronic. Model: MW300GS

De uitgangsspanning is instelbaar tussen 1,5 en 12 V, en getest bij 9V. De maximum uitgangsstroom is 300 mA.



Belasting weerstand parallel	Uitgang spanning (Volt DC)	Ingang vermogen (Watt)	Uitgang vermogen (Watt)	Rendement	Vermogen verlies (Watt)
-	9,40	1,60	0,000	0,000	1,600
1x 82 $\Omega$	9,35	6,44	1,066	0,166	5,374
2x 82 $\Omega$	9,32	6,82	2,119	0,311	4,701
3x 82 $\Omega$	9,29	7,93	3,157	0,398	4,773

Tabel 12. Gestabiliseerde adapter



Grafiek 3:

Rendement en vermogensverlies voor:

6 = Voeding met ringkern transformator (zie tabel 6)

7 = Schakelende adapter (zie tabel 7)

8 = Niet gestabiliseerde adapter (zie tabel 8)

9 = Gestabiliseerde adapter (zie tabel 9)

#### 1.9.4 Conclusie elektriciteitsverlies

Door het toepassen van ringkern transformators is energie te besparen in voedingsapparaten.

Vooraf bij lage uitgangsstroom is de ringkern transformator veel beter dan de E-I kern transformator.

Ook door het toepassen van schottky diodes, en het gebruik van gelijkrichters met 2 diodes (in plaats van 4) kan energie bespaard worden.

Elke beperking van energieverlies, kan op lange termijn flink wat energie besparen. Elke Watt besparing, geeft per jaar een besparing van 8,76 kWh.



### 1.9.5 Opgave

Examenopgave natuurkunde 2006 tijdvak 2: opgave 2

Tinus probeert op school het transport van elektrische energie na te bootsen. Zij gebruikt daarvoor een wisselspanningbron twee identieke transformatoren, twee weerstanden van  $15\ \Omega$ , een fietslampje en een aantal snoertjes. In figuur 1 is de schakeling die zij maakt schematisch getekend.

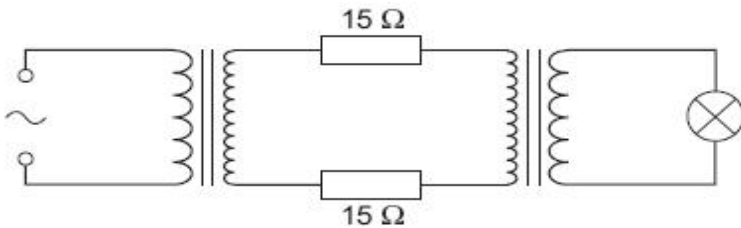


Fig. 54

Figuur 49 is een foto van de onderdelen van haar schakeling. De wisselspanningbron is al op de eerste transformator aangesloten. Neem Figuur 1 over.

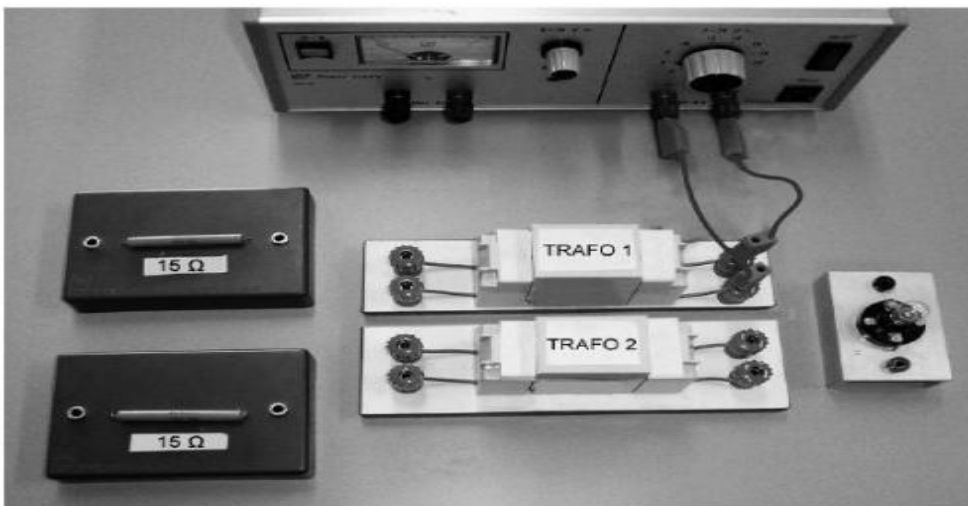


Fig. 55

A. Teken in de foto op de uitwerkbijlage de overige verbindingsdraden zodat de schakeling van figuur 1 ontstaat.

In de schakeling van Tinus stelt een weerstand van  $15\ \Omega$  een hoogspanningskabel voor. Een echt hoogspanningskabel heeft een diameter (dikte) van 2,5 cm en is gemaakt van aluminium.

B. Bereken de lengte, in km, van een dergelijke hoogspanningskabel met een weerstand van  $15\ \Omega$ .

Als materiaal voor hoogspanningskabels heeft men gekozen voor aluminium en niet voor koper. Een reden daarvoor is dat aluminium goedkoper is dan koper. Als de materiaaleigenschappen van aluminium en koper met elkaar worden vergeleken, heeft aluminium zowel voordelen als nadelen.

C. Beantwoord de volgende vragen:

- Noem een materiaaleigenschap op grond waarvan aluminium de voorkeur verdient en geef aan welk voordeel dit oplevert.



- b. Noem ook een materiaaleigenschap op grond waarvan aluminium niet de voorkeur verdient en geef aan welk nadeel dit oplevert.
- c. Het verlies aan vermogen in een hoogspanningskabel is te berekenen met de formule:  $P_{\text{verlies}} = I^2 R$ . Hierin is  $I$  de stroomsterkte in de kabel en  $R$  de weerstand van de kabel.

D. Leg uit wat het voordeel is van hoogspanning bij energietransport.

Bij een zogenoemde ideale transformator gaat geen energie verloren in de transformator zelf. Tinus wil controleren of de transformatoren die ze gebruikt ideaal genoemd kunnen worden. Daarvoor meet ze in haar schakeling:

- De spanning tussen de polen van haar spanningsbron:  $U_{\text{bron}} = 6,7 \text{ V}$ ;
  - De stroomsterkte die de spanningsbron levert:  $I_{\text{bron}} = 0,55 \text{ A}$ ;
  - De stroomsterkte door de weerstanden van  $15 \Omega$ :  $I = 30 \text{ mA}$ ;
  - De spanning over het lampje:  $U_{\text{lamp}} = 3,2 \text{ V}$ ;
  - De stroomsterkte door het lampje:  $I_{\text{lamp}} = 0,33 \text{ A}$ .
- E. Controleer met een berekening of de gebruikte transformatoren ideaal zijn.

### 1.9.6 Antwoorden

A.

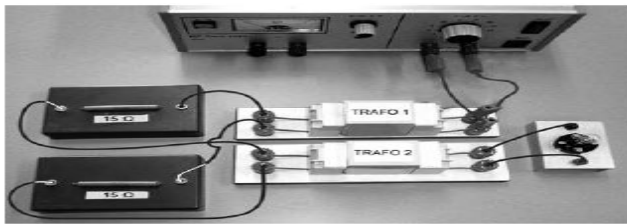


Fig. 56

B. Doorsnede van de draad:  $\pi R^2 = \pi \cdot (1,25 \cdot 10^{-2})^2 = 4,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ .  
Soortelijke weerstand aluminium:  $27 \cdot 10^{-9} \Omega \text{m}$  (BINAS).

$$R = \rho \cdot L / A$$

$$L = A \cdot R / \rho = 4,92 \cdot 10^{-4} \cdot 15 / (27 \cdot 10^{-9}) = 2,7 \cdot 10^5 \text{ m} = 2,7 \cdot 10^2 \text{ km}.$$

C.

Voordeel:

Aluminium heeft een kleinere dichtheid dan koper. Tussen twee hoogspanningsmasten zal het dus minder doorhangen, ofwel er zijn minder masten nodig.

Nadeel:

Aluminium heeft een grotere soortelijke weerstand dan koper. Om niet meer vermogensverlies te hebben dan koper moet de Al-draad dus dikker zijn.

Of:

De elasticiteitsmodulus van Al is kleiner dan die van Cu, koper is dus sterker, Al breekt eerder door.

Of:

De uitzettingscoëfficiënt van Al is groter dan die van Cu: bij zeer hoge temperatuur zal Al meer doorhangen, bij zeer lage temperatuur strakker gespannen zijn.



D. Het getransporteerd vermogen:  $P = i \cdot U$

Bij zeer hoge spanning  $U$  hoeft dus  $i$  niet zo groot te zijn en kun je het vermogensverlies  $i^2 R$  beperken.

E. Het vermogen dat de spanningbron levert moet, bij geen verlies in de trafo's gelijk zijn aan het vermogen dat de weerstanden opnemen + het vermogen dat het lampje opneemt.

$$P_{\text{bron}} = i \cdot U_{\text{bron}} = 0,55 \cdot 6,7 = 3,7 \text{ W}$$

$$P_{\text{weerstand}} = i^2 \cdot R = (30 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 30 = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ W.}$$

$$P_{\text{lampje}} = 3,2 \cdot 0,33 = 1,1 \text{ W.}$$

Lampje en weerstanden samen zijn goed voor:  $1,1 + 0,027 = 1,13 \text{ W}$ , hetgeen veel minder is dan het door de spanningsbron geleverde vermogen. De transformatoren zijn dus verre van ideaal.

## 1.10 Verdeling elektriciteit

### Stroomdiagram energie voor Nederland, 2012

Het grootste deel van de energiedragers ruwe aardolie en aardolieproducten wordt ingevoerd. Het meeste aardgas dat wordt verbruikt komt uit de Nederlandse bodem.

