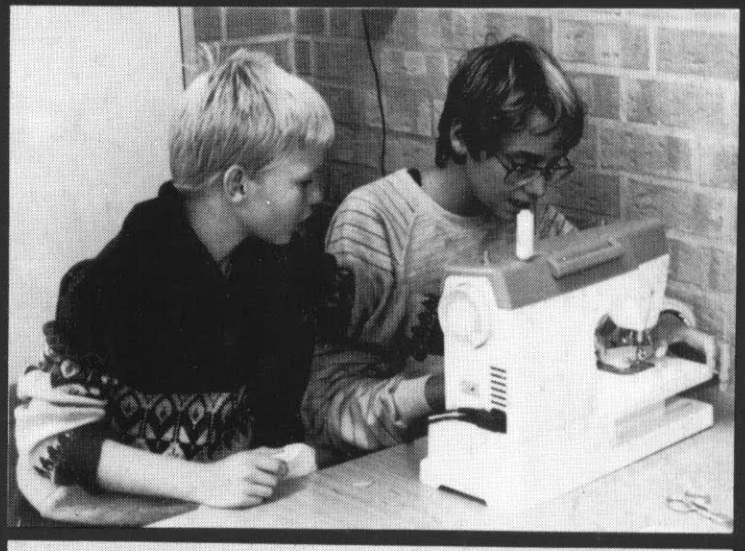
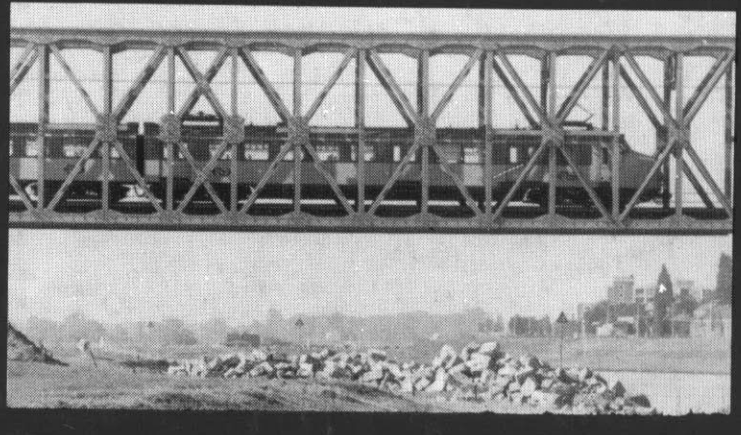
ELEKTRISCHE MACHINES





PLON

Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

bovenbouw
HAVO

elektrische machines

Samengesteld door de projectgroep van het PLON in samenwerking met de Vakgroep Natuurkunde-Didactiek van de Rijksuniversiteit Utrecht

voor de 4e klas HAVO

Experimentele uitgave

Tweede druk, 1985

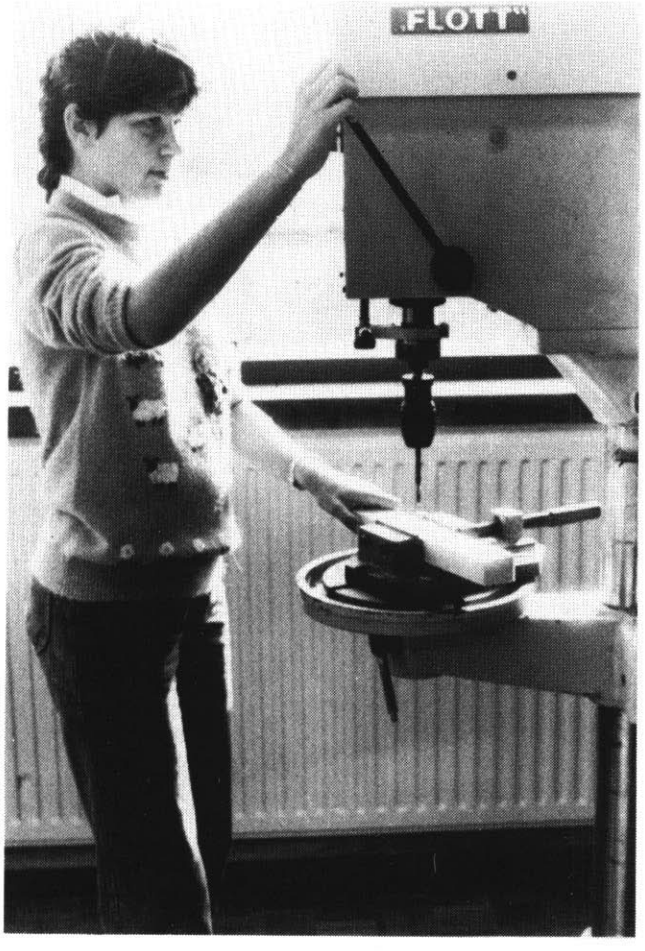
PLON

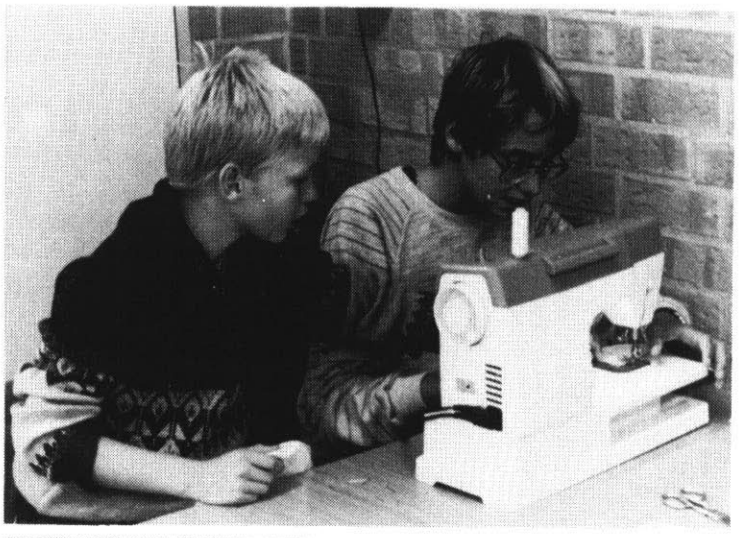
* Het Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde (PLON) is in 1972 begonnen onder auspiciën van de Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde (CMLN). De opdracht was: het ontwikkelen en door middel van onderzoek evalueren van leerpakketten voor natuurkundeonderwijs op mavo, havo en vwo, en het ontwerpen van een plan voor goede begeleide introductie daarvan in de scholen.
* Het PLON werkt onder toezicht van een stuurgroep waarin vertegenwoordigers uit het onderwijs, de vervolgopleiding, didactische instellingen, onderwijsondersteuningsinstituten, lerarenopleidingen en het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen vertegenwoordigd zijn.
* Het PLON is ondergebracht bij de Vakgroep Natuurkunde Didaktiek van de Rijksuniversiteit Utrecht. Deze vakgroep participeert tevens in de activiteiten ten behoeve van havo-bovenbouw. Ten behoeve van vwo-bovenbouw bestaat een samenwerkingsverband met de universiteiten van Amsterdam (GU) en Groningen, en groepen leraren die werken aan de ontwikkeling van lesmateriaal.
* Het adres van het PLON is:
  PLON, lab. Vaste Stof, Postbus 80.008, 3508 TA, de Uithof, Utrecht, Tel. 030-532717

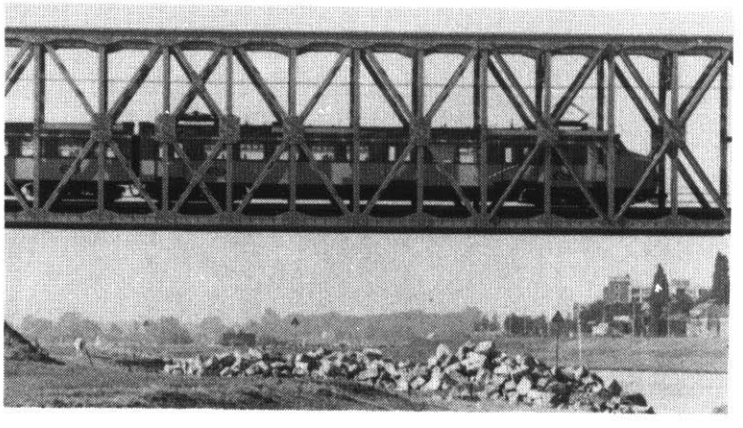
© 1984 Rijksuniversiteit Utrecht Project Leerpakket Ontwikkeling Natuurkunde

Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotocopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.
No part of this book may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm or any other means without the prior permission of the publisher.

ELEKTRISCHE MACHINES







PLON
Vakgroep Natuurkunde-Didactiek
Rijksuniversiteit Utrecht

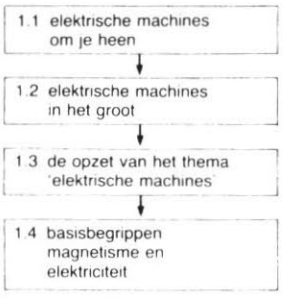
bovenbouw
HAVO

inhoud

		blz
1.	oriëntatie	5
2.	motor en generator	15
3.	praktische variaties	31
4.	van meten tot begrijpen	46
5.	machine-heel-kunde	60
6.	optimaliseren naar keuze	68
	index	78

hoofdstuk 1

ORIENTATIE



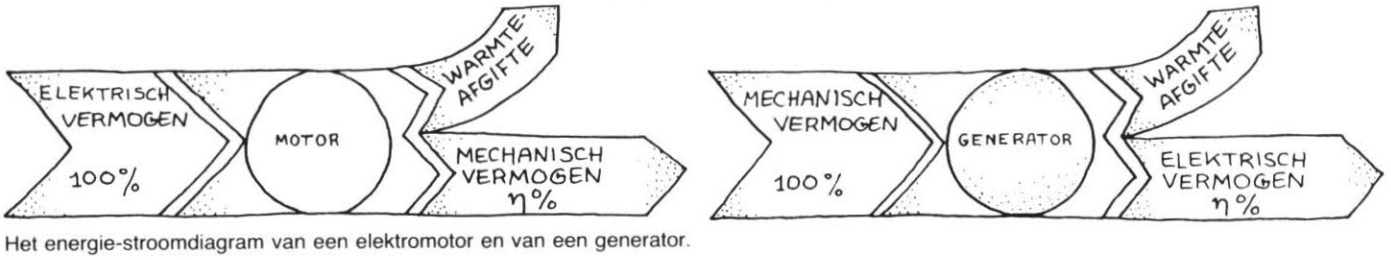
inhoud blz

1.1	elektrische machines om je heen	5
1.2	elektrische machines in het groot	7
1.3	de opzet van het thema 'Elektrische Machines'	8
1.4	basisbegrippen magnetisme en elektriciteit	8

1.1 ELEKTRISCHE MACHINES OM JE HEEN

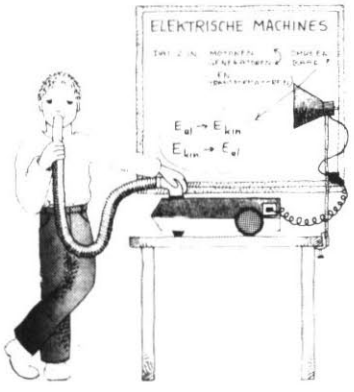
In dit thema gaat het voornamelijk om twee soorten machines: elektromotoren en generatoren.
Elektromotoren komen veel voor in huishoudelijke apparaten. Zij zetten elektrische ener-

gie om in beweging, en worden tegelijkertijd een beetje warm. *Generatoren*, of dynamo's, komen minder vaak voor. Zij doen precies het omgekeerde. In generatoren wordt elektrische energie opgewekt uit beweging; ook daarbij komt warmte vrij.



Het energie-stroomdiagram van een elektromotor en van een generator.

Een belangrijk hulpmiddel bij het opwekken, het transporteren en het gebruiksklaar maken van elektrische energie is de *transformator*. Met behulp van een transformator kan hoogspanning in laagspanning worden omgezet, of omgekeerd.
Voor veel proeven maak je gebruik van een voedingskast. Daarin zit een transformator die de 220 volt netspanning uit de wandcontactdoos omzet in een veilige lage spanning.



'Motoren kunnen ook als dynamo werken'.

De werking van elektromotoren, generatoren en transformatoren berust (natuurkundig gezien) op dezelfde twee principes:
- een elektrische stroom door een spoel veroorzaakt magnetisme;
- een spoel kan, onder invloed van magnetisme, een elektrische stroom leveren.

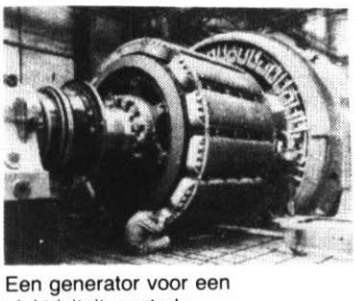
Een gevolg hiervan is, dat diverse motoren ook als generator kunnen werken en omgekeerd.

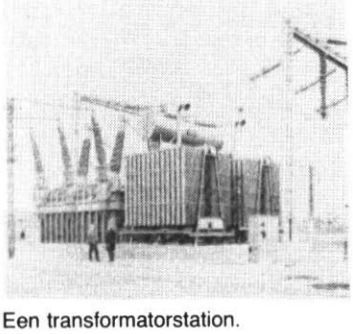
Dit thema kan van praktische betekenis zijn voor gebruikers van elektrische apparaten. Je kunt daarbij denken aan:
– de eigenschappen van verschillende soorten motoren en generatoren op grond waarvan je ze kunt vergelijken en beoordelen;
– de zwakke punten van elektrische machines waarmee je, als je ze kent, rekening kunt houden opdat ze langer meegaan;
– het uitvoeren van eenvoudige reparaties op een veilige manier.

1.
Ga eens na welke apparaten in en om je huis elektromotoren bevatten. Vijftig jaar geleden deed men het zonder. De halve mensheid heeft ook nu geen elektriciteit ter beschikking. Probeer je eens voor te stellen hoe je dan het huishouden moet doen.

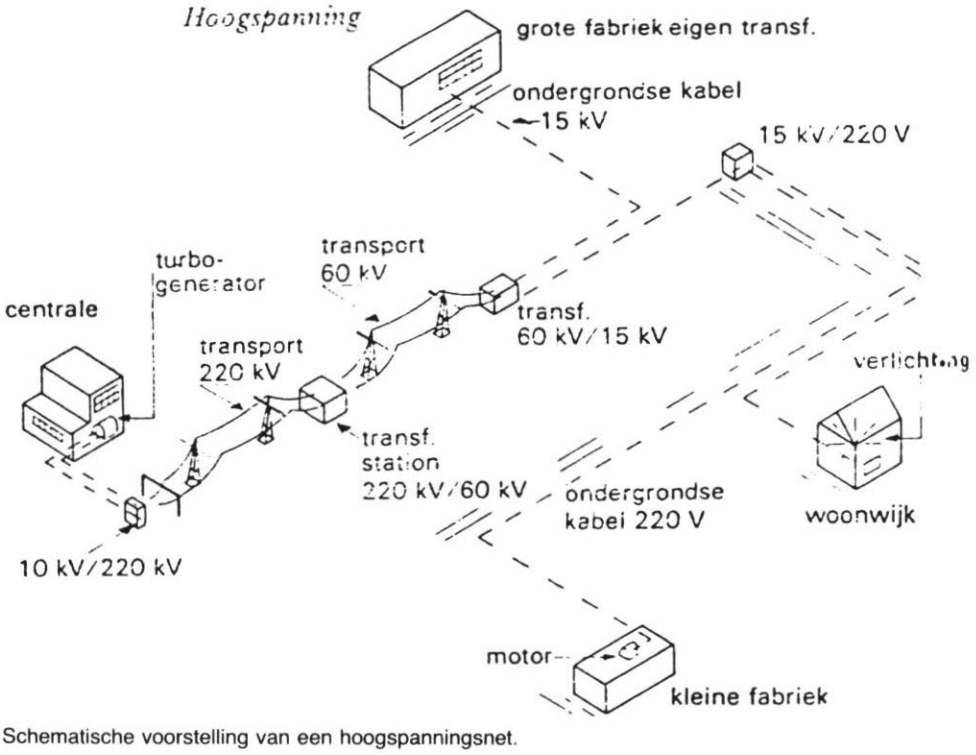
2.
Generatoren en transformatoren zijn in en om het huis wat moeilijker te vinden. Ken je voorbeelden? Waar dienen ze voor?

1.2 ELEKTRISCHE MACHINES IN HET GROOT


Een generator voor een elektriciteitscentrale.


Een transformatorstation.

Elektriciteit is vrijwel niet meer weg te denken uit onze samenleving. Het overgrote deel van onze elektrische energie wordt opgewekt in een dertigtal centrales. In al die centrales draaien generatoren.
Transformatoren zetten de geleverde spanning om in hoogspanning. Een net van hoogspanningsleidingen verbindt de centrales met elkaar en met de gebruikers.



Schematische voorstelling van een hoogspanningsnet.

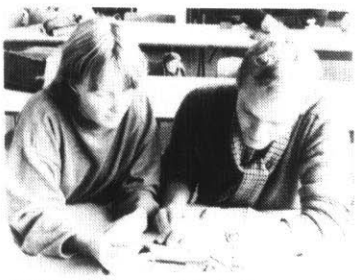
Over de produktie van elektriciteit bestaat veel verschil van mening. Aktiegroepen demonstreren. Sommige politieke partijen spreken zich in hun partijprogramma uit over hun voorkeur wat betreft de soort centrales. Niemand bestrijdt het gebruik van generatoren. Wél kun je twisten over de manier waarop een generator wordt aangedreven. Kolen, olie of gas? Windmolens? Liever kerncentrales? Stromend water?
We hebben allemaal belang bij blijvend beschikbaar zijn van elektrische energie voor een redelijke prijs.

Ook is het wel fijn als de lucht geschikt blijft om in te ademen. Het is een goede zaak dat we er allemaal over mee kunnen beslissen. In de thema's 'Energie en Kwaliteit' en 'Ioniserende Straling' komen de manieren waarop generatoren worden aangedreven aan de orde, met hun voor- en nadelen.

1.
Onderzoek hoe de elektriciteitsvoorziening naar je eigen huis (of school) geregeld is. Welke centrale levert de elektriciteit? Hoe en waar liggen de leidingen en staan de transformatorstations? Wat zijn de gebruikte spanningen?

1.3 DE OPZET VAN HET THEMA 'ELEKTRISCHE MACHINES'

De opzet van het thema 'Elektrische Machines'.


'Wat heb ik aan elektrische machines?'

Je kunt op verschillende manieren kijken naar motoren en generatoren.
Je kunt je afvragen *hoe ze precies werken*. Dan moet je ín de machines kijken. Dan zul je je ook moeten verdiepen in natuurkundige principes, wetten of verschijnselen die de werking verklaren. Deze vraag vind je vooral terug in de hoofdstukken 2 en 4.
Je kunt je afvragen *wat er in de machine zit* en waarom. Welke technische oplossingen zijn bedacht om de machines zo gunstig mogelijk te construeren. Het gaat daarbij vaak om tegenstrijdige eisen:
- de machine moet betrouwbaar zijn;
- de machine moet zuinig zijn met energie;
- de machine mag niet te duur zijn.

In de hoofdstukken 2 en 3 kun je elektrische machines van binnen bekijken.
Je kunt je afvragen *wat de eigenschappen van de machine als geheel zijn*, zonder op de inwendige details te letten. Je zult dan zien dat een verschil in eigenschappen toch vaak samenhangt met een verschil in constructie. Elke machine heeft zijn eigen voor- en nadelen en zijn eigen toepassingsmogelijkheden.
Deze eigenschappen worden in de groepswerkperiode in hoofdstuk 3 onderzocht.
Je kunt je ook afvragen '*wat heb ik eraan* buiten de natuurkundeles'. Na het onderzoek rond de vorige vragen komen we in hoofdstuk 5 tot een herrangschikking van kennis en inzicht. Daarmee kun je:
- beter beoordelen welke machine voor jouw toepassing het meest geschikt is;
- verstandiger met elektrische apparaten omgaan teneinde schade te voorkomen;
- nagaan wat je zélf kunt doen als een apparaat niet meer werkt, en hoe je dat veilig doet.

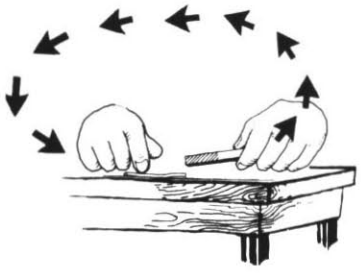
Tenslotte geeft de keuzeperiode aan het eind je de gelegenheid je eigen accent te leggen in technische, natuurkundige of maatschappelijke richting.

1.4 BASISBEGRIPPEN MAGNETISME EN ELEKTRICITEIT

Elektriciteit en magnetisme zijn waarschijnlijk geen nieuwe onderwerpen voor je. Toch zal niet iedereen hetzelfde weten of zich herinneren. Daarom hier een samenvatting, afgesloten met een aantal opgaven.
Kies naar behoefte wat je nog wilt bestuderen of doen, en hoeveel opgaven je wilt maken.

magnetisme
Reeds in de oudheid kende men een bepaald gesteente, dat een kracht uitoefende op andere stukjes van dit materiaal en op ijzeren voorwerpen. Deze eigenschap noemen we *magnetisme*. Een bijzonderheid van de magnetische krachtwerking is, dat magneten geen kontakt met het andere voorwerp hoeven te hebben. Er is sprake van *krachtwerking op afstand*. Deze krachtwerking is geconcentreerd in bepaalde centra, die we *polen* noemen. Er blijken twee soorten polen te bestaan: noordpolen en zuidpolen.
Een magneet die je draaibaar ophangt, gaat bewegen tot hij met één van zijn uiteinden naar het noorden wijst. Dit uiteinde noem je de *noordpool* van de magneet. Het andere uiteinde is dus de *zuidpool* van de magneet.

Voor de krachtwerking tussen magneetpolen geldt:
- ongelijknamige polen trekken elkaar aan, terwijl gelijknamige polen elkaar afstoten;
- de krachtwerking tussen magneetpolen neemt af met toenemende onderlinge afstand tussen de polen.



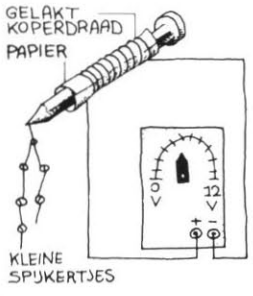
Magnetiseren met de strijkmethode.

magnetiseren

Er zijn twee manieren om een ijzeren voorwerp, een breinaald bijvoorbeeld, magnetisch te maken: met de strijkmethode en met een spoel.

De strijkmethode

Strijk met een uiteinde van een magneet een paar keer langs het voorwerp, telkens dezelfde kant op. Beweeg in een grote boog terug zoals in de figuur hiernaast is aangegeven.



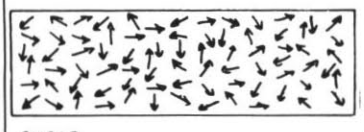
Magnetiseren met een spoel.

Magnetiseren met een spoel

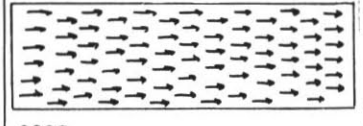
Een spijker steekt door een spoel (zie de tekening hiernaast).
Zo lang er stroom door de draad gaat, heeft de spijker een noord- en een zuidpool. Als je de stroom uitschakelt, verdwijnt het magnetisme grotendeels. De combinatie van spoel met ijzeren kern noem je een *elektromagneet*.

MAGNEETGEBIEDJES

Om magnetiseren begrijpelijk te maken, is het volgende *model* bedacht.
Een magneet is opgebouwd uit een zeer groot aantal kleine magneetjes, elk met een noordpooltje en een zuidpooltje. Deze kleine magneetjes staan in het gelid. De noord-zuid richting is voor (bijna) alle magneetjes dezelfde. Door goede samenwerking ontstaat een krachtige magneet.
In gewoon ijzer heerst chaos. De kleine magneetjes zijn ongeordend. Zij heffen elkaars werking op, zodat je aan de buitenkant niets van magnetisme merkt.
Magnetiseren is niets anders dan het ordenen van de kleine magneetjes.



CHAOS

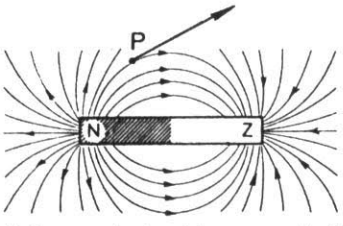


ORDE

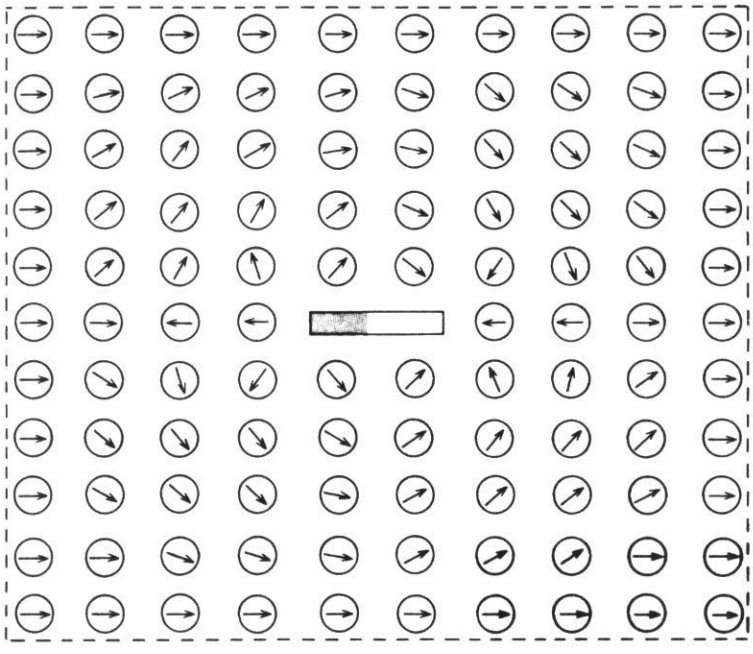
Magneetgebiedjes in gewoon ijzer en in een magneet.

Een spijker is 'magnetisch week'. Hierin kunnen de kleine magneetjes gemakkelijk ten opzichte van elkaar draaien. Onder dwang zijn ze gemakkelijk in het gelid te krijgen. Als je een noordpool dicht bij de spijker houdt, worden de zuidpolen van alle kleine magneetjes aangetrokken. Ze draaien met hun zuidpolen naar die noordpool toe. Daardoor krijgt de spijker zelf een noordpool en een zuidpool. Men noemt dit verschijnsel *magnetische influentie*.
Als je de noordpool weghaalt wordt het weer een chaos.
Goede magneten zijn 'magnetisch hard'. De kleine magneetjes draaien moeilijker. Magnetiseren met een spoel is alleen mogelijk met sterke stroomstoten. Eenmaal gelijk gericht, blijven de kleine magneetjes netjes staan. Men noemt zo'n magneet een *permanente magneet*.

magnetisch veld

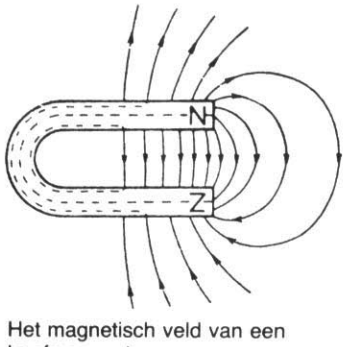


Het magnetisch veld van een staafmagneet; de veldlijnen lopen van noord naar zuid.



Een cirkel met pijl erin stelt in deze tekening een kompas voor; de pijlpunt stelt de noordpool van de kompasnaald voor.

In de figuur hierboven is aangegeven welke stand een kompasnaald inneemt als je deze op een aantal plaatsen rond een staafmagneet neerzet. De kompasnaald geeft aan in welke richting de kracht werkt, die de grote staafmagneet op het kleine magneetje (de kompasnaald) uitoefent. De invloed van de staafmagneet op andere magneten in de ruimte er omheen kun je zo zichtbaar maken. Deze invloedssfeer noemt men het *magnetisch veld* van die magneet.



Het magnetisch veld van een hoefmagneet.

Het magnetisch veld kan worden getekend met behulp van magnetische *veldlijnen*, zoals in de figuren hiernaast. Hieronder volgen afspraken over de manier waarop een magnetisch veld wordt getekend.

- De richting van een magnetisch veld in punt P is de richting waarin de noordpool van een kompasnaaldje in P wijst.
- Een magnetische veldlijn is zodanig gericht, dat de raaklijn in elk punt de richting van de magnetische kracht in dat punt aangeeft.

Uit experimenten blijkt:

- magnetische veldlijnen ontspringen bij een noordpool en monden uit op een zuidpool;
- veldlijnen verzamelen zich sterk bij weekijzer;
- waar de veldlijnen het dichtst opeen liggen, is de magnetische kracht het grootst.

Op aarde wijzen alle kompasnaalden naar het noorden. Blijkbaar lopen er magnetische veldlijnen van zuid naar noord op en boven het aardoppervlak. Deze veldlijnen vormen samen het aardmagnetische *veld.*

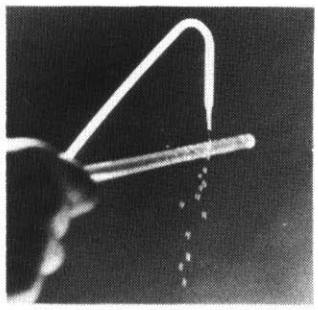
Uit de elektriciteitsleer ken je de volgende grootheden en eenheden:

grootheid	*eenheid*
lading (+ of −)	*coulomb (C)*
spanning (symbool: V)	*volt (V)*
stroomsterkte (symbool: I)	*ampère (A) 1 A = 1 C/s*

spanningsbron en stroomkring

Elk materiaal bevat positieve en negatieve elektrische *lading*. Bij een spanningsbron, zoals de batterij of voedingskast, bevindt zich aan de + kant in verhouding meer positieve lading; de situatie aan + en − kant is verschillend. Door een geleidende verbinding te maken van + naar − zal lading gaan bewegen in een poging het verschil te vereffenen. De spanningsbron ziet kans het verschil in stand te houden, en veroorzaakt zo een konstante *spanning* op de stroomkring. En zorgt daarmee voor een konstante stroomsterkte in de stroomkring.

De *stroomsterkte* in een geleider is de hoeveelheid lading die per seconde passeert. Overal in een ongesplitste stroomkring is de stroomsterkte gelijk, waardoor er geen opeenhoping van lading plaats kan vinden. Men is er in de vorige eeuw van uit gegaan dat de positieve lading van + naar − stroomt.



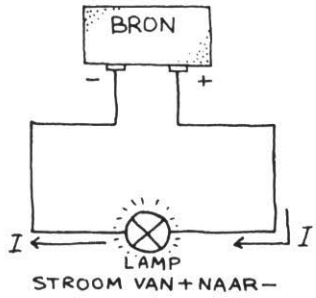
Afbuiging van een waterstraaltje met een geladen staaf.

STROOMRICHTING

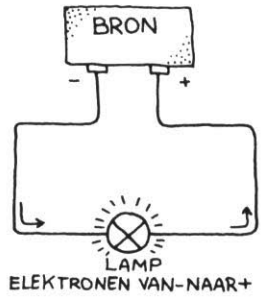
Sommige stoffen, zoals glas en plastic, worden elektrisch geladen door wrijven met een doek. Na het wrijven trekken ze lichte voorwerpen aan. De oudst bekende stof met deze eigenschap is barnsteen (in het Grieks: elektrika).

Er is een verdeling in twee groepen te maken. Geladen stoffen uit dezelfde groep stoten elkaar af. Die uit verschillende groepen trekken elkaar aan. Als men glaslading en ebonietlading bij elkaar brengt, verdwijnt de lading. Vandaar dat Benjamin Franklin glaslading positief en ebonietlading negatief noemde.

Sinds ongeveer 1900 is bekend dat atomen zijn opgebouwd uit een positieve kern waar negatieve elektronen omheen draaien. In vaste stoffen kunnen de kernen slechts trillen op hun vaste plaats. Een elektrische stroom in een geleider is dus in werkelijkheid een beweging van negatief geladen elektronen van de − naar de + kant van de spanningsbron. *In* de spanningsbron worden de elektronen dan verder gepompt van de + naar de − kant.

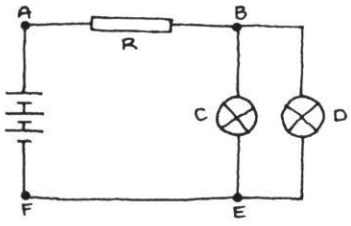


De stroomrichting volgens de oude voorstelling.



De werkelijke elektronenstroom.

Toch zullen we voor het aangeven van de stroomrichting in elektrische machines uit blijven gaan van de oude voorstelling: elektrische stroom doorloopt de stroomkring van de + naar de − kant van de spanningsbron.



spanning en stroomsterkte meten

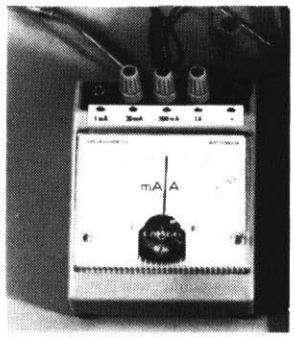
Met een *voltmeter* meet je de spanning tussen twee punten in een stroomkring. De voltmeter moet dus met beide punten verbonden worden. Om V_{AB} te meten zoals in de hiernaast getekende schakeling, moet de voltmeter parallel aan weerstand R worden geschakeld.

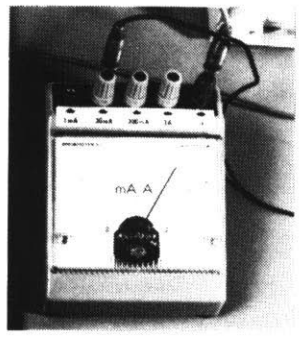
Met een *ampèremeter* meet je de stroomsterkte; dat wil zeggen: de hoeveelheid lading die per sekonde passeert. De ampèremeter moet dus deel uitmaken van de stroomkring zelf. Om I_{AB} te meten, moet de ampèremeter in serie met weerstand R worden geplaatst tussen A en B of tussen E en F.

Tussen B en E zie je in de schakeling parallelle takken door C en D. De elektrische stroom splitst zich op, waarbij de som van de stromen door C en D gelijk moet zijn aan de totale stroom I_{AB}. In formulevorm:

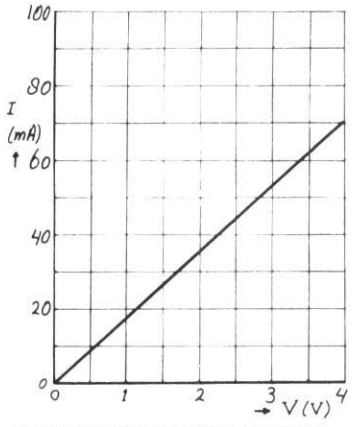
$$I_{AB} = I_C + I_D = I_{EF}$$

Het gebruik van volt- en ampèremeters:
– kies eerst het maximum meetbereik om overbelasting te voorkomen;
– verander daarna, als het kan, naar een meetbereik waarbij de uitslag zo duidelijk en nauwkeurig mogelijk is.





Meten: kies eerst een groot meetbereik.



Spanning-stroomsterkte-diagram voor een gewone weerstand.

Zie voor proeven het thema 'Vergelijken', paragraaf 5.4, aktiviteit 2 en 3.

de wet van Ohm

De weerstand R van een elektriciteitsdraad is gedefinieerd als de spanning V over de draad, gedeeld door de stroomsterkte I in de draad. In formulevorm:

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

Als je twee draden vergelijkt door ze om beurten aan te sluiten op dezelfde spanning, dan betekent een kleinere stroomsterkte in een draad dus een grotere weerstand: die draad laat de stroom minder gemakkelijk door. De eenheid van weerstand is V/A (volt per ampère). Dit wordt 'afgekort' tot *ohm* (symbool: Ω, de Griekse letter omega).

De stroomsterkte in een draad hangt af van de spanning tussen de uiteinden van de draad. Maak je die spanning hoger dan neemt de stroomsterkte toe. In veel gevallen blijkt de stroomsterkte evenredig met de spanning toe te nemen: als je de spanning n-maal zo groot maakt, wordt de stroomsterkte ook n-maal zo groot. Zie ook het diagram hiernaast. Dit verband tussen spanning en stroomsterkte wordt de 'wet van Ohm' genoemd (naar de Duitser Georg Simon Ohm, die zo'n 150 jaar geleden dit verband met veel 'primitievere' instrumenten dan nu ontdekte). Voor geleiders van metaal en koolstof blijkt de wet van Ohm goed op te gaan, tenminste: zolang de temperatuur van de geleider niet of nauwelijks verandert.

vermogen en energie

Een generator levert elektrische energie. Naarmate de geleverde spanning V en de stroomsterkte I toenemen, wordt ook het geleverde *vermogen* P groter. In formulevorm:

$$P = V \cdot I$$

Het vermogen wordt gemeten in watt (afgekort: W).

Hetzelfde geldt voor stroomgebruikers als motoren. Het opgenomen elektrische vermogen volgt ook daar uit de formule $P = V \cdot I$

Vermogen is de energie die per sekonde wordt omgezet. Wil je de hoeveelheid energie E bepalen die gedurende een bepaalde tijd is gebruikt, dan moet je vermogen P en tijd t vermenigvuldigen. In formulevorm:

$$E = P \cdot t$$

De energie wordt dan gevonden in joule (afgekort: J). Je zag deze formule al in het thema 'Verkeer'. Als we over elektrische energie E_{el} praten, zijn de voorgaande twee formules eenvoudig te combineren tot:

$$E_{el} = V \cdot I \cdot t$$

Als de stroom I door een weerstand R loopt, kun je met behulp van de wet van Ohm ook de volgende uitdrukking voor E_{el} opschrijven:

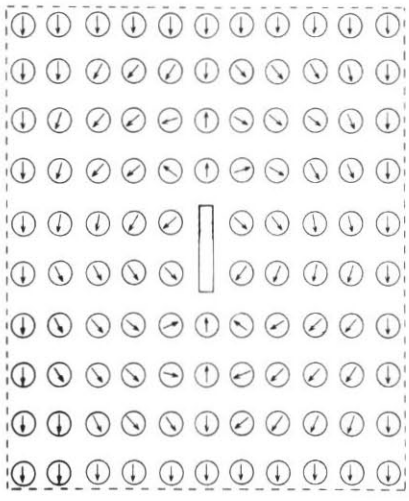
$$E_{el} = V \cdot I \cdot t = I \cdot R \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t$$

Deze elektrische energie wordt in de weerstand omgezet in *warmte*.

oefenaktiviteiten

1.

Een kompasnaald wijst met zijn noordpool naar het noorden van de aarde. Eeuwenlang is deze regel voor de navigatie gebruikt. Natuurkundig is het maar verwarrend. Waar ligt, natuurkundig gezien, de magnetische noordpool van de aarde?



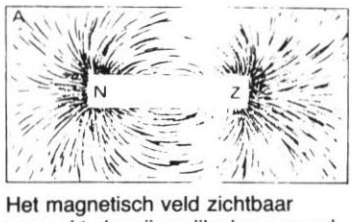
2.

De kompasnaaldjes aan de rand van de figuur hiernaast nemen een merkwaardige stand in. Blijkbaar is het magnetisch veld van de magneet daar afwezig of te zwak. Maar waarom wijzen ze dan allemaal dezelfde kant uit?

3. MAGNETISME VAN EEN SPOEL

Houd een spoel bij een kompas. Sluit de spoel aan op een voedingskast of op een batterij.

Heeft de stroom effekt op het kompas? Wissel de aansluitingen van de spoel om, en herhaal de proef.



Het magnetisch veld zichtbaar gemaakt, door ijzervijlsel op een vel papier boven een magneet te strooien.

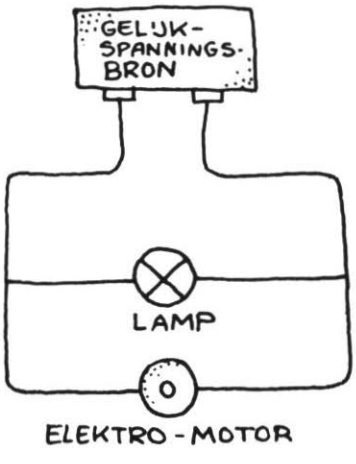
4. MAGNETISCH VELD ZICHTBAAR MAKEN

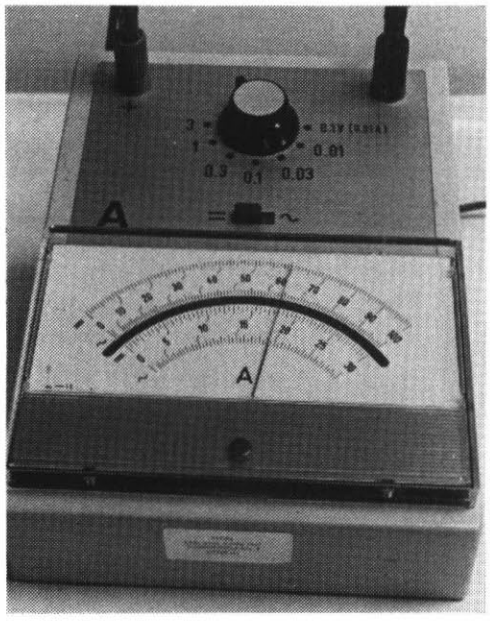
Door op een staafmagneet een vel doorzichtig plastic te leggen en daarop ijzervijlsel te strooien, kun je de hiernaast weergegeven figuur verkrijgen. Oorzaak is het magnetisch veld. Ieder stukje ijzervijlsel gedraagt zich als kompasnaaldje.

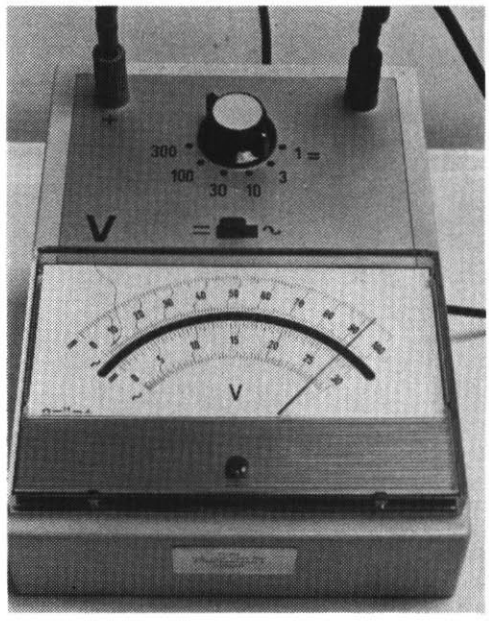
Uit de figuur kun je dus de richting van de krachten aflezen.
Ook van hoefijzermagneten of combinaties van magneten kun je op deze manier het magnetisch veld zichtbaar maken.

5.

Als je de weerstand van het lampje in de getekende schakeling wilt bepalen, moet je in de schakeling een volt- en een ampèremeter opnemen. Neem het schema over en voeg er de meters aan toe.
De meters geven, bij juiste schakeling, de aangegeven uitslag. Hoe groot is de weerstand van het lampje?







6.

Je hebt een 6 V/3 W dynamo, en je wilt voor- en achterlicht van je fiets in serie aansluiten; dan merk je het tenminste direkt als het achterlicht kapot is.
Wat voor lampjes kies je nu, en waarom?
- twee gelijke lampjes van 6 V.
- twee gelijke lampjes van 3 V.
- een 6 V/2 W- en een 6 V/1 W-lampje.
- een 3 V/2 W- en een 3 V/1 W-lampje.

En als je de gebruikelijke parallel-schakeling zou toepassen?

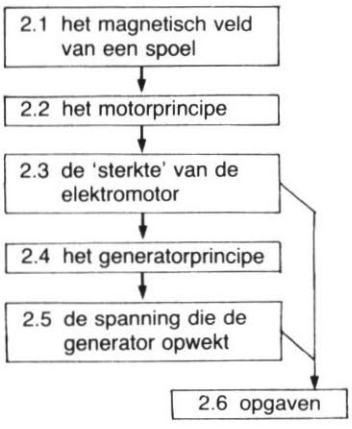
7.

Bij het starten van een auto levert de 12 V accu een vermogen van 1,5 kW (= $1{,}5 \cdot 10^3$ W). De capaciteit van de accu is 50 Ah (ampère-uur: een vreemde eenheid; denk goed na).

Hoe groot is de stroomsterkte tijdens het starten?
Na hoeveel minuten is de accu leeg als je maar steeds doorstart, aangenomen dat de stroomsterkte konstant is?

MOTOR EN GENERATOR

De opzet van hoofdstuk 2: 'motor en generator'.



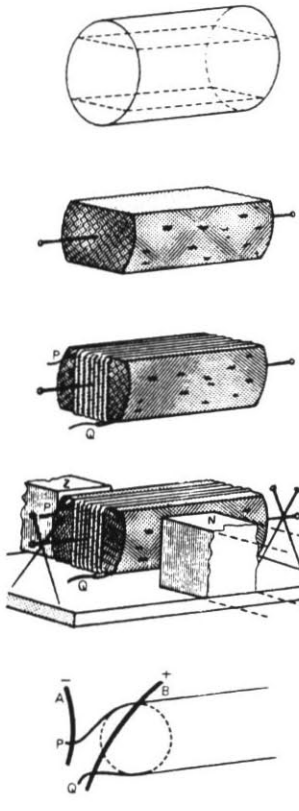
inhoud

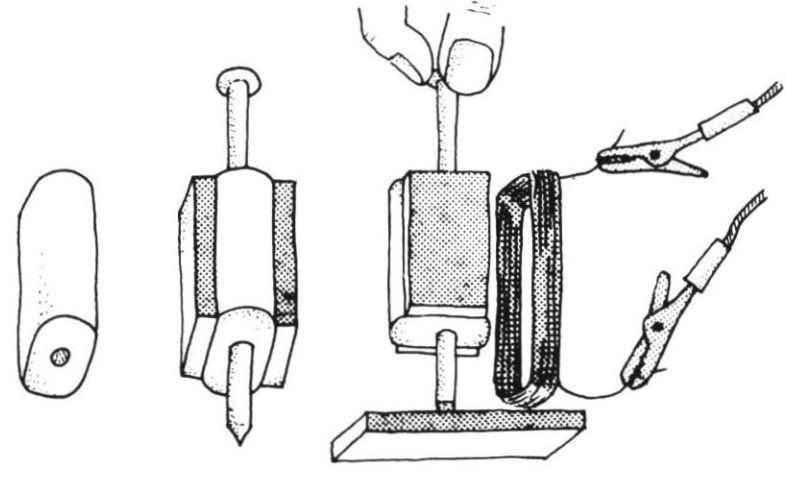
		blz
2.1	het magnetisch veld van een spoel	16
2.2	het motorprincipe	18
2.3	de 'sterkte' van de elektromotor	20
2.4	het generatorprincipe	24
2.5	de spanning die de generator opwekt	26
2.6	opgaven	30

motor en generator

Welke natuurkundige verschijnselen spelen een rol in elektrische machines? De aandacht gaat uit naar drie onderwerpen:
- de magnetische werking van een spoel;
- de kracht op een stroomdraad in een magnetisch veld;
- stroom opwekken in een spoel met behulp van magnetisme.

Hoe zijn deze verschijnselen benut in een elektromotor? Door zelf een elektromotor te bouwen, en eventueel later te verbeteren, kunnen we voor één type motor (de commutator-motor) het antwoord op die vraag vinden. En iets dergelijks geldt ook voor een generator.
Om te weten te komen of je de nieuwe begrippen en regels kunt hanteren, vind je in de laatste paragraaf opgaven over elk van de drie onderwerpen.





2.1 HET MAGNETISCH VELD VAN EEN SPOEL

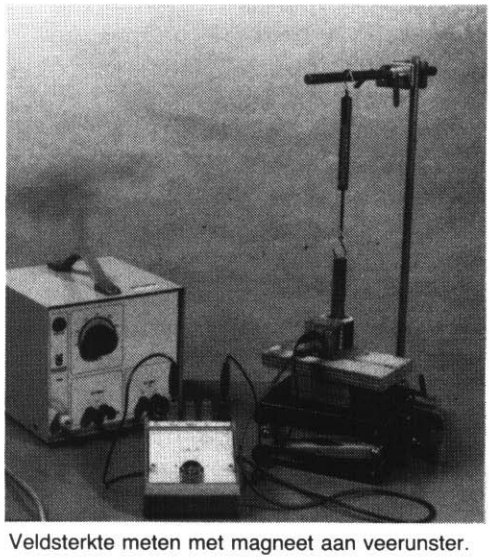
Spoelen komen voor in elke elektromotor, elke transformator en elke generator. We hebben gezien dat een elektrische stroom die door een spoel gaat, een magnetisch veld opwekt. Dit veld gaan we nader onderzoeken aan de hand van de volgende vragen:
– hoe ziet het veldlijnenpatroon in en om de spoel er uit;
– hoe hangt de sterkte van het magnetisme af van de stroomsterkte in de spoel, van het aantal wikkelingen van de spoel, van de plaats in of bij de spoel en van de aanwezigheid van een weekijzeren kern.

1. VELDLIJNENPATROON VAN EEN SPOEL

• Je hebt in het verleden het magnetisch veld van een magneet gezien. Je zou op een soortgelijke manier naar een spoel kunnen kijken. Nu moet je ook het veld *binnen* de spoel zichtbaar maken. Bedenk een geschikte methode.

• Vergelijk de voorstellen die de klas verzint. Voer tenminste één manier uit, en schets het veld. Welk effekt heeft het omkeren van de stroomrichting? Hoe hangt de veldrichting binnen de spoel van de stroomrichting af?

2. VELDSTERKTE METEN MET MAGNEET EN VEERUNSTER



Veldsterkte meten met magneet aan veerunster.

Met een veerunster meet je de kracht die een staafmagneet ondervindt: zwaartekracht plus of min de magnetische kracht van de stroomspoel. De stroomsterkte in de spoel kun je regelen met de voedingskast.
Zet de spoel niet op een ijzeren ondergrond! Hoogteverstelling van de magneet ten opzichte van de spoel is lastig, en moet toch nauwkeurig gebeuren. Waarom? Let steeds op, dat je eerlijk vergelijkt!

• Hoe hangt de magnetische kracht af van de stroomsterkte in de spoel?
Stel steeds weer in op dezelfde hoogte van de magneet ten opzichte van de spoel.
Geef de meetresultaten weer in een diagram en trek een zo duidelijk mogelijke conclusie.

• Hoe hangt de magnetische kracht af van het aantal wikkelingen van de spoel?
Houd hoogte en stroomsterkte konstant.
Werk met spoelen van gelijke afmetingen. Bij spoelen met drie aansluitpunten kan gebruik van een deel van de spoel afwijkingen opleveren. Waarom, denk je?
Teken een diagram en trek een conclusie.

• Hoe hangt de magnetische kracht af van de hoogte van de onderste magneetpool boven de spoel?
Alleen op de 'as' van de spoel werkt de aangegeven opstelling goed. De magneet kan ook in de spoel hangen.
Teken een diagram en trek een conclusie.

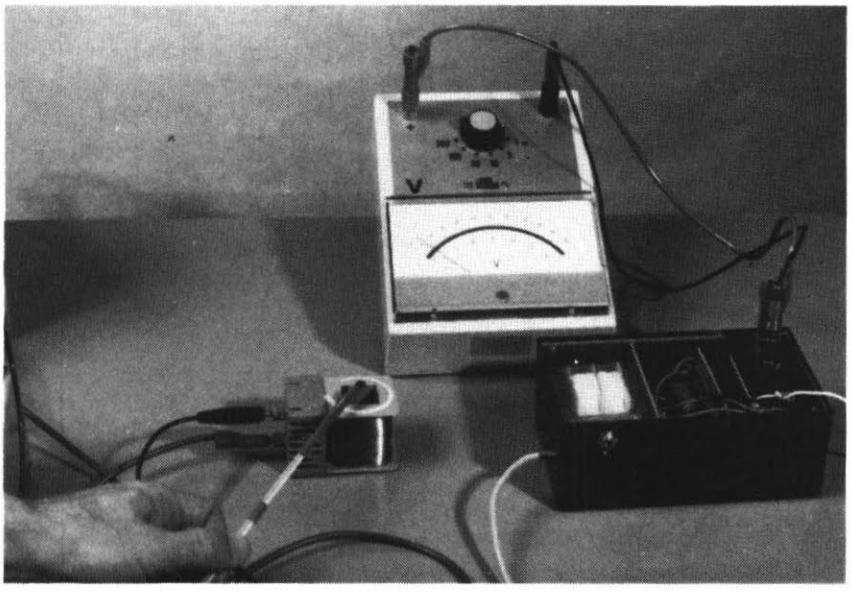
De gevoelige richting van de hallsonde staat loodrecht op het grootste platte vlak van de sonde.

3. VELDSTERKTE METEN MET EEN HALL-SONDE

In dit experiment gebruik je een zogenaamde hall-sonde. Het signaal van de sonde is een maat voor de sterkte van het magnetisch veld. Dit signaal wordt elektronisch verwerkt en vervolgens met een voltmeter gemeten. Let op, dat je eerlijk vergelijkt. Zie ook de opmerkingen bij proef 2.

• Hoe hangt de signaalsterkte af van de stroomsterkte in de spoel?
Geef de resultaten weer in een diagram en trek een zo duidelijk mogelijke conclusie.

• Hoe hangt de signaalsterkte af van



Veldsterkte meten met hall-sonde.

het aantal wikkelingen van de spoel? Teken een diagram en trek een conclusie.

- Hoe hangt de signaalsterkte af van de plaats?

Doe in ieder geval een meetserie op de 'as' van de spoel, ter vergelijking met aktiviteit 2. Verwerk die resultaten in een diagram. Metingen in de verdere omgeving zou je in een tekening weer kunnen geven. Zoek wel steeds de stand van de sonde waarbij het signaal maximaal is.

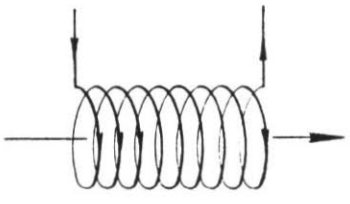
- Voorzie de spoel van een weekijzeren kern. Dit is hier mogelijk omdat er geen direkte wisselwerking is tussen weekijzer en hall-sonde. Meet nogmaals de signaalsterkte bij verschillende stroomsterktes. Houd de overige omstandigheden gelijk aan die bij de meting zonder kern.

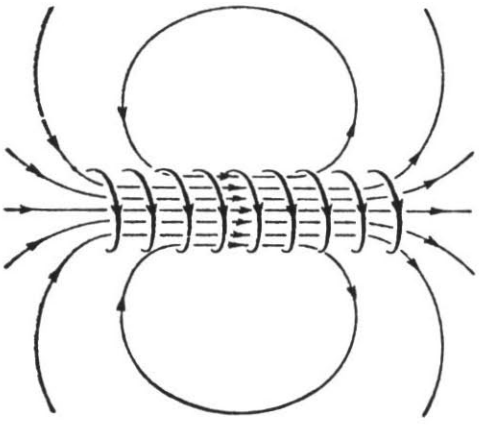
4.

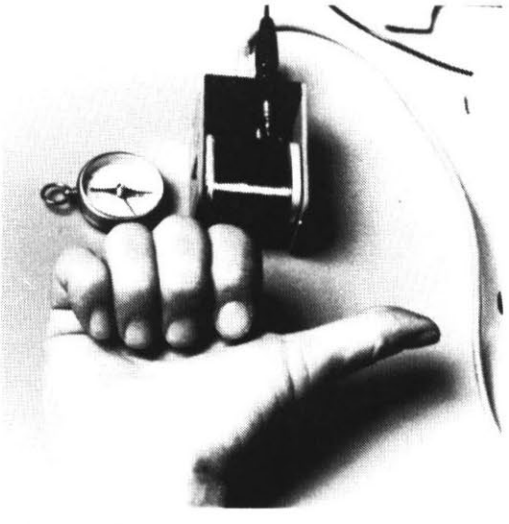
Vergelijk de resultaten van de proeven met de veerunster en met de hall-sonde. Zijn er verschillen?

Kun je regelmaat in die verschillen ontdekken?
Enig idee hoe dat komt?

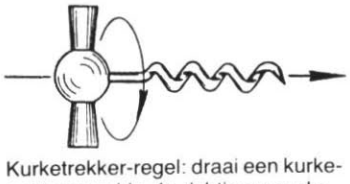
Het veldlijnenpatroon van een rechte stroomspoel heeft de volgende kenmerken:
- buiten de stroomspoel gelijk aan dat van een staafmagneet;
- binnen de stroomspoel, zeker in het midden, evenwijdig aan de as van de spoel;
- de magnetische veldlijnen van een stroomspoel zijn gesloten lijnen;







Rechtervuist-regel: de vingers in de richting van de stroom door de windingen; de uitgestoken duim geeft de richting van het veld binnen de spoel.



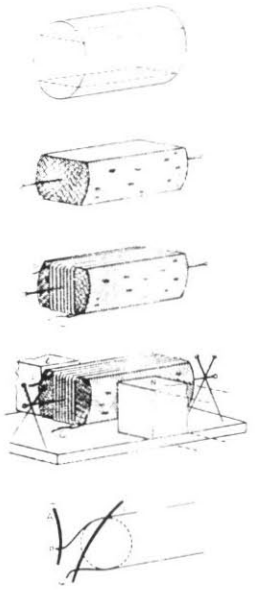
Kurketrekker-regel: draai een kurketrekker rond in de richting van de stroom; dan geeft de voortgaande beweging van de kurketrekker de richting aan van het magnetisch veld binnen de spoel.

- waar de veldlijnen uit de spoel komen, gedraagt de spoel zich als een noordpool, en waar de veldlijnen de spoel ingaan als een zuidpool;
- bij een gegeven stroomrichting is de richting van de veldlijnen *binnen* de spoel te vinden met de rechtervuist-regel (of de kurketrekkerregel).

Opmerkelijk: binnen de spoel vind je een gebied waarbinnen de richting en de sterkte van het magnetisch veld overal gelijk is. Het veld in zo'n gebied wordt *homogeen* genoemd.

Bij de proeven 2 en 3 heb je gezien dat je de sterkte van het magnetisch veld op verschillende manieren kunt onderzoeken. Zolang je verschillende punten binnen één veld wilt vergelijken, kan je meetmethode vrij willekeurig zijn. Magnetische kracht in newton is bruikbaar als je met dezelfde staafmagneet werkt, evenals hall-sonde-uitslag in volt.
Om de *magnetische veldsterkte* (symbool: *B*) in een punt goed vast te leggen, is behalve de richting ook de sterkte nodig in een *vaste eenheid*. We komen daar in paragraaf 2.3 nog op terug.
Uit experimenten blijkt dat de magnetische veldsterkte *B* maximaal is in het middengedeelte van de spoel en aan de uiteinden geleidelijk afneemt. Buiten de spoel is het veld beduidend zwakker. Een indruk van de veldsterkte in verschillende punten kun je krijgen uit een goede schets van het veld. Waar de veldlijnen dichter bij elkaar komen zal het veld sterker zijn.
Overige conclusies:
– de veldsterkte is evenredig met de stroomsterkte *I* in de spoel;
– de veldsterkte is evenredig met het aantal wikkelingen van de spoelen mits de spoelafmetingen gelijk zijn;
– de veldsterkte neemt sterk toe, als men elke spoel van een weekijzeren kern voorziet.

2.2 HET MOTORPRINCIPE

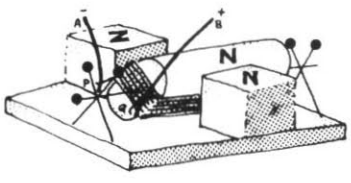


1. MAAK ZELF EEN ELEKTROMOTOR

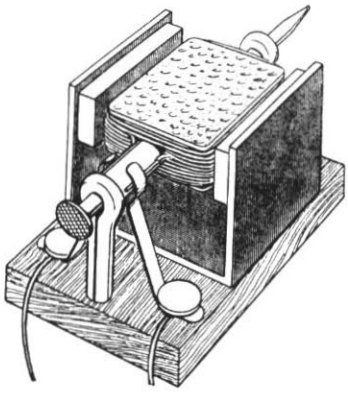
Van een kurk, zes spelden, een meter dun geïsoleerd koperdraad en twee magneetjes, kun je binnen een minuut of tien een elektromotor maken.
In de figuren hiernaast zie je de elektromotor ontstaan.

- Snij van de kurk twee plakjes af.
- Steek twee spelden als assen in de kurk; zorg dat ze zo goed mogelijk in elkaars verlengde liggen.
- Wikkel de meter draad netjes om de kurk, zoals aangegeven; schraap de uiteinden P en Q blank en buig ze iets naar binnen.
- Lager de spoel nu op vier spelden die op een plankje zijn gestoken; leg daarna aan beide zijden een magneet.
- Als je nu de niet geïsoleerde uiteinden A en B van twee koperdraden (die met de + en – pool van een batterij verbonden zijn) tegen P en Q houdt, kan de spoel gaan draaien.

Een eenvoudige verklaring is mogelijk met behulp van de krachtwerking tussen magnetische polen.
Als P met – en Q met + is verbonden, loopt de stroom van Q naar P. Volgens de rechtervuist-regel krijgt de spoel aan de voorkant een noordpool en aan de achterkant een zuidpool.
Aan de voorkant wordt de noordpool van de spoel afgestoten door de noordpool van de vaste magneet. Hij kan nog twee kanten op, maar zo lang de stroom van Q naar P gaat zal hij slechts 180° draaien. En wel totdat de ongelijke polen bij elkaar zijn. Na het draaien van de spoel over 180° wisselen de punten P en Q van teken: P wordt met + en Q met – verbonden. Vanaf dat moment loopt de stroom in tegengestelde richting door de spoel (van P naar Q). De noord- en zuidpool van de spoel verwisselen dus van plaats, en ... de spoel gaat weer over een hoek van 180° *verder* draaien, enz.
Het motortje volgens bovenstaand recept kán draaien, maar daarmee is wel alles gezegd. Het is, technisch gezien, erg onvolkomen. Het is lastig om de toevoerdraden van de spanningsbron op de juiste plaats te houden en daarbij niet teveel wrijving te veroorzaken. Als de kurk een beetje uit balans is, blijft hij in één stand hangen.
Om een aantal van deze mankementen te overwinnen, is nogal wat vindingrijkheid nodig en bovendien wat handigheid.



Door de magnetische polen van de spoel te bepalen, is het draaien van de motor te verklaren.



Een andere (betere?) zelfbouw elektromotor.

2. UITDAGING

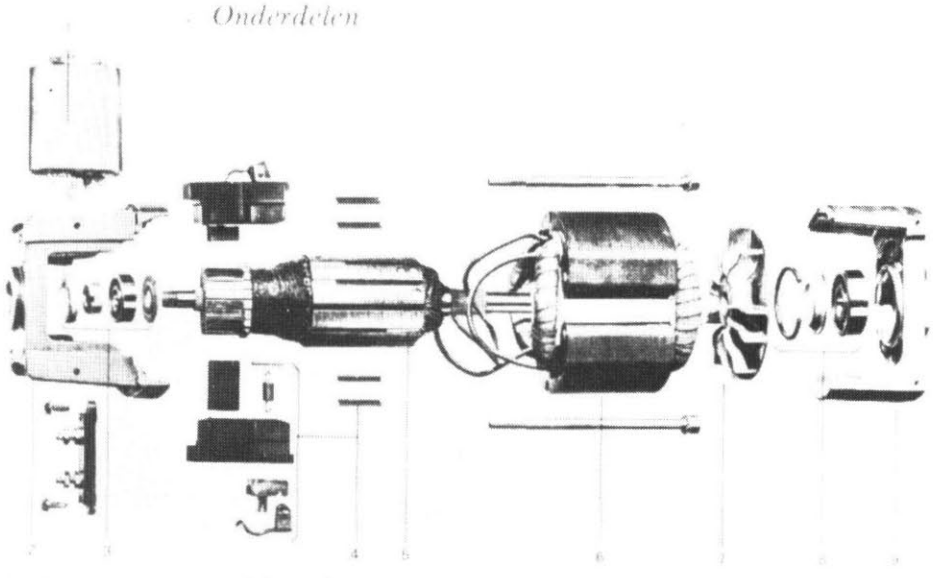
Maak een betere elektromotor volgens eigen inzichten. Ga eerst na in welke opzichten verbetering het meest nodig is. Gebruik zoveel mogelijk kennis uit paragraaf 2.1 bij het ontwerpen van een betere draaispoel en eventueel het zoeken van betere magneten.

Ga in ieder geval door tot je verbeterde motor draait.
Vergelijk je motor met die van je klasgenoten. Welke vind jij goed? Waarom?
Sluit je motor ook eens aan op wisselspanning. Kun je het gedrag verklaren?

de praktijk van elektromotoren

In de laatste honderd jaar hebben technici diverse variaties bedacht op het thema 'motor'. Vele van die variaties lijken helemaal niet meer op het zelfbouwmotortje van de aktiviteiten 1 en 2. We komen daar in de volgende hoofdstukken nog op terug. We zullen ook proberen te achterhalen wat de voor- en nadelen van een aantal van die variaties zijn.
Een elektromotor zoals jij gebouwd hebt, met sleepkontakten (of 'borstels') waardoor de stroom naar de draaiende spoel (rotorspoel) gaat, wordt nog steeds veel gebruikt. Dit type heet: *commutator-motor*.

3. WAT IS WAT IN DE COMMUTATOR-MOTOR



Onderdelen van een commutator-motor.

Hierboven zie je een gedemonteerde motor. Een echte commutator-motor is in de klas te bekijken. Probeer in de foto én in de echte motor de onderdelen van je eigen motor terug te vinden. Zoek op:
- de *rotor*: het draaiende deel met de spoel (ook wel het *anker* genoemd);
- de *stator*: de stilstaande permanente of elektromagneet;
- de *commutator*: de sleepkontakten waarlangs de stroomtoevoer naar de rotor plaatsvindt;
- *lagers* en *frame*.

In echte motoren vind je vaak nog een *ventilator* voor koeling van de spoelen en de *ontstoringscondensator*.

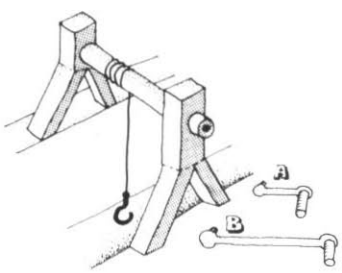
4.

Waarom zou men vaak spoelen gebruiken als stator in plaats van permanente magneten?

FUNCTIE VAN DE CONDENSATOR
Bij het uitschakelen van de stroom door een spoel ontstaan vonkjes in de schakelaar. Deze vonkjes hebben nare gevolgen. Kontaktpunten in de schakelaar worden beschadigd (inbranden). Elk vonkje beïnvloedt de ontvangst van radio (gekraak) en tv (lijnen door het beeld).
Het ontstaan van vonkjes is voor een groot deel te voorkomen door een condensator parallel aan de schakelaar aan te brengen. In een elektromotor met rotorspoelen treden vonken vooral op bij de commutator. De ontstoringscondensator is dan ook parallel aan de commutator geschakeld.

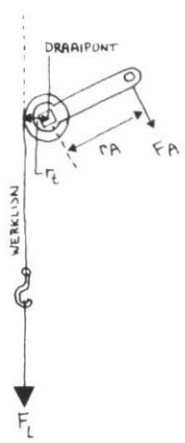
2.3 DE 'STERKTE' VAN DE ELEKTROMOTOR

Om te kunnen berekenen hoe sterk een elektromotor kan zijn, moeten we wat verder in de theorie duiken. Om te beginnen leggen we vast wat hier wordt bedoeld met de 'sterkte' van de motor.



maximum koppel
Voor de 'sterkte' is de kracht alleen niet voldoende. Aan de hand van enkele voorbeelden is dat eenvoudig in te zien.

1.
Met de lier in de afbeelding hiernaast moet een zware last opgehesen worden. Je kunt kiezen uit twee slingers, A en B, die je er bij ziet liggen. Welke slinger kies je? Waarom?



Doorsnede van een lier.
r_t = straal van de trommel.
r_A en r_B = lengte van slingers A en B.

Bij een draaiende beweging is niet alleen de kracht belangrijk, maar ook de afstand van de kracht tot het draaipunt. Deze afstand noemen we de *arm* van de kracht. Voor de arm r van een kracht neem je de *kortste* afstand tussen draaipunt en de *werklijn* van de kracht; de arm staat dus loodrecht op de werklijn van de kracht (zie de tekening hiernaast). Als de arm ongelijk is aan nul, wordt er een *draaimoment* geleverd. Het draaimoment M is gelijk aan het product van kracht F (in N) en arm r (in m):

moment = kracht · arm.
$M = F \cdot r$

Op de lier werkt een moment linksom, groot $F_L \cdot r_t$, waarin r_t de straal van de trommel is. Om de lier stil te houden moet je een moment rechtsom leveren dat precies even groot is:

$$F_L \cdot r_t = F_A \cdot r_A \text{ of } F_L \cdot r_t = F_B \cdot r_B$$

Hetzelfde geldt, afgezien van wrijving, als je de last met konstante snelheid wilt ophijsen. Om hetzelfde moment te leveren, kun je bij een twee keer zo lange arm volstaan met de helft van de kracht.

In de foto hiernaast zie je een poeliewiel met meerdere schijven op de as van de elektromotor. Bij hetzelfde draaimoment van de elektromotor kun je een grotere kracht in de rubber snaar verkrijgen door de snaar over een kleinere schijf te leiden.

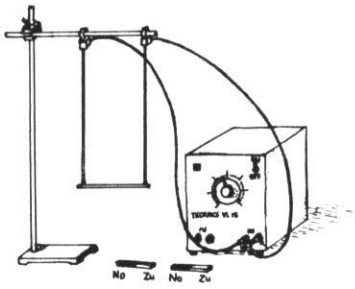
We spreken over een *koppel* als er sprake is van twee tegengesteld gerichte krachten aan weerskanten van de draaias. In de figuur hiernaast leveren beide handen een moment rechtsom, groot $F \cdot r + F \cdot r = F \cdot 2r$

Het maximum koppel in Nm is de gebruikelijke maat voor de 'sterkte' van een motor. Hoe wordt dit koppel opgewekt in de motor?
Om een antwoord op deze vraag te vinden moeten we onderzoeken:
- hoe er krachten op de rotor ontstaan;
- waar deze krachten aangrijpen;
- waar de grootte van die krachten van af hangt.

Tenslotte zullen we in hoofdstuk 3 aan kant en klare motoren het maximum koppel meten, dat die motoren kunnen leveren.

kracht op een stroomdraad in een magnetisch veld

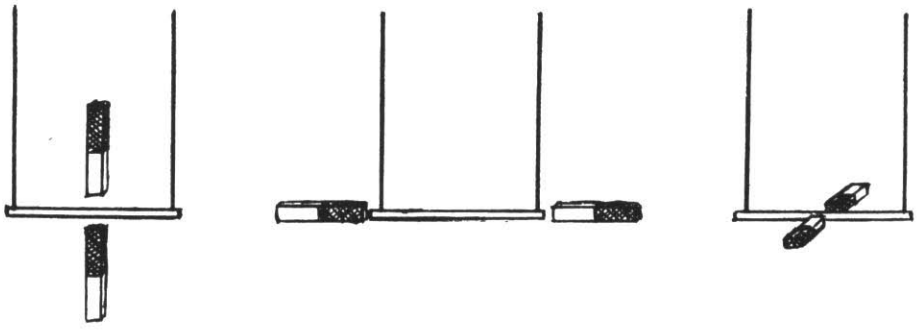
We onderzoeken eerst de kracht die een stroomdraad ondervindt in een magnetisch veld. Deze kracht heet de *lorentzkracht*. De lorentzkracht gaan we onderzoeken aan de hand van de volgende vragen:
- wat is de richting van de lorentzkracht;
- hoe hangt de kracht af van de stroomsterkte in de draad, van de afmetingen van het magnetisch veld en/of de draad, van de magnetische veldsterkte en van het aantal wikkelingen, als we van de stroomdraad een spoel maken.



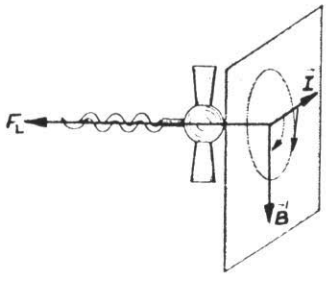
Opstelling voor het bepalen van de richting van de lorentzkracht.

2. RICHTING VAN DE LORENTZKRACHT

• Hang een licht staafje op aan twee dunne draden. Laat een grote stroom (bijv. 5 A) door het staafje gaan. Houd in de buurt van het staafje twee magneten (of een hoefmagneet).
Zoals je in de figuur hieronder ziet, kun je die magneten minstens in drie standen houden. In welk geval wordt de schommel naar voren of achteren geduwd? Je ziet dit het beste door de stroom een paar keer in en uit te schakelen.

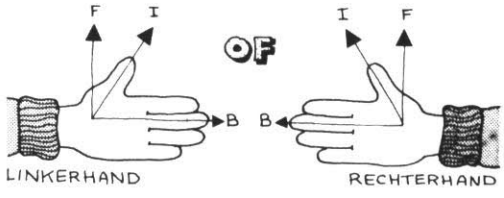


Een andere richtingsregel voor de lorentzkracht: als je een kurketrekker loodrecht op het vlak door B en I houdt en over de kleinste hoek van I naar B draait, dan zal hij voortgaan in de richting van de lorentzkracht.



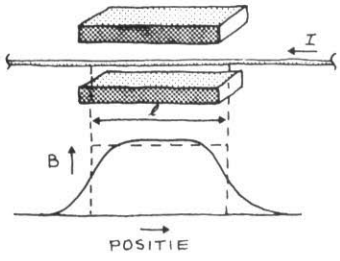
• Noteer je waarnemingen zó, dat duidelijk de richtingen van stroom, magnetisch veld en lorentzkracht vastliggen.
• Om de richting van de lorentzkracht te kunnen onthouden, gebruiken we onze handen als ezelsbrug. We nemen als de drie richtingen van stroom, veldlijnen en kracht de richtingen van duim, vingers en handpalm van een uitgestrekte hand:
- duim in de richting van de stroom;
- gestrekte vingers in de richting van de veldlijnen;
- de handpalm duwt dan in de richting van de lorentzkracht.

Vergelijk je eigen waarnemingen met de handen in de figuur. Ga na of je de linkerhand of de rechterhand moet gebruiken.

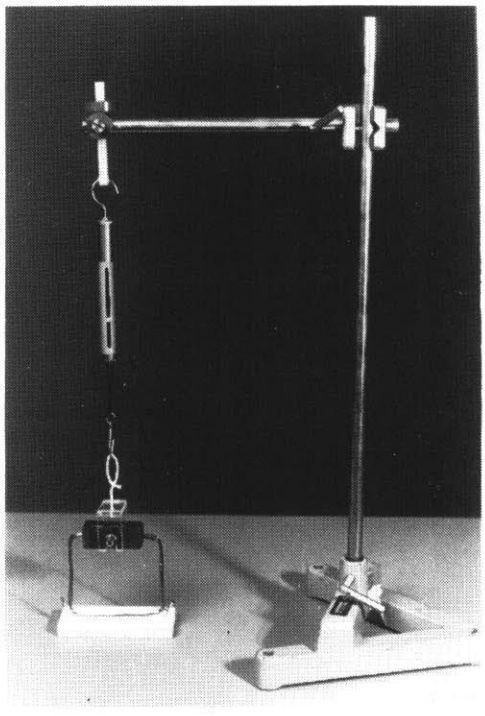


Handregel voor het bepalen van de richting van de lorentzkracht.

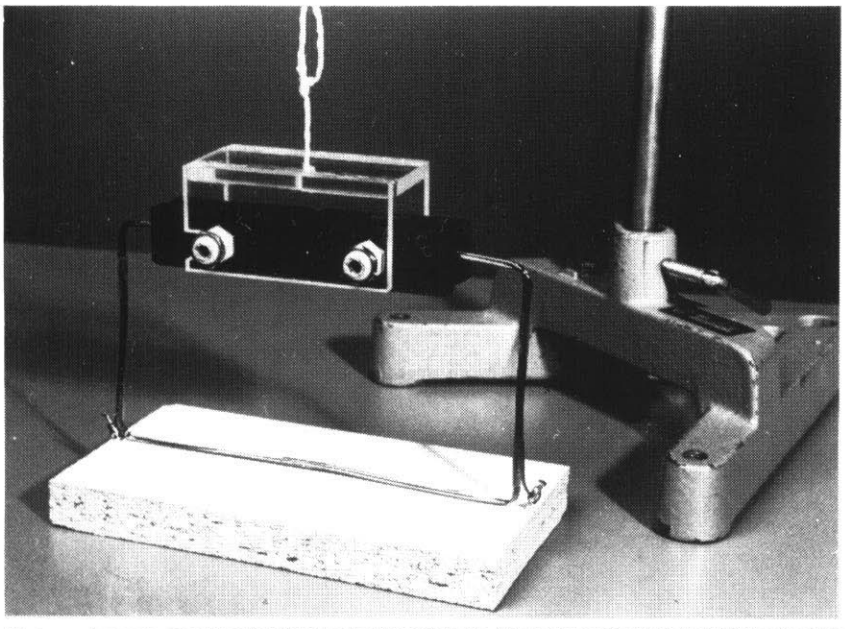
MEETPROBLEEM
Het veld tussen twee polen is niet echt homogeen, zelfs niet tussen twee brede, platte magneten. Toch wordt vaak gerekend met een homogeen veld over de hele breedte (l) van de magneet; zie de streeplijn in het diagram. De werkelijkheid lijkt vermoedelijk meer op de getrokken lijn.
Kontrole met een hall-sonde is wenselijk, om zo goed mogelijk tot een gemiddelde waarde te komen.



3. LORENTZKRACHT METEN MET EEN VEERUNSTER



Lorentzkracht meten met veerunster.



Met een langere magneethouder is de draadlengte *l* in het magnetisch veld twee keer zo groot te maken.

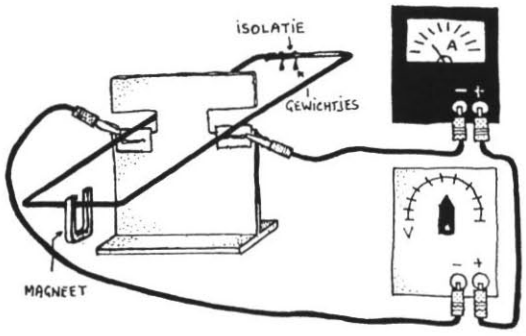
Twee platte magneten in een houder hangen onder een veerunster; tussen beide magneten loopt een enkele draad of, zoals in de foto's hiernaast, een zijde van een draadraam met enkele windingen. Als er stroom door de draad gaat, zal op de draad een lorentzkracht naar boven of naar beneden werken.
Tegelijkertijd zullen, aangezien elke aktie een reaktie kent, de magneten een kracht naar beneden of naar boven ondervinden, gelijk van grootte en tegengesteld gericht. De veerunster meet het gewicht van de magneten plus of min de reaktiekracht.
Door gebruik van een houder met vier magneten (zie tweede foto) kan de lengte van het draadraam tussen de magneten worden verdubbeld.
Tenslotte kun je, door de spleet tussen de magneten groter of kleiner te maken, de sterkte van het magnetisch veld kleiner of groter maken. Een maat voor die veldsterkte is te verkrijgen met de hallsonde.
Let op dat je de hoogte steeds bijstelt, zodat de draad midden tussen de magneten blijft; zie daarvoor de stelschroef boven aan de veerunster.

- Onderzoek met deze opstelling de volgende vier werkvragen (let op dat je steeds eerlijk vergelijkt):
  – hoe hangt de lorentzkracht af van de stroomsterkte *I* in de draad;
  – hoe hangt de lorentzkracht af van de draadlengte *l*, die zich in het magnetische veld bevindt;
  – hoe hangt de lorentzkracht af van de magnetische veldsterkte *B*;
  – hoe hangt de lorentzkracht af van het aantal windingen *N* van het draadraam?
- Verwerk de resultaten van de afzonderlijke delen in diagrammen, en trek zo duidelijk mogelijke conclusies.

4. LORENTZKRACHT METEN MET STROOMBALANS

Het toegevoegde gewicht vind je met behulp van de formule $F_z = m \cdot g$ (massa m in kg *en kracht F_z in* N; *g = 9,82* m/s^2*). Op een massa van 3,5* g = *0,0035* kg *werkt dus een zwaartekracht van 0,035* N *(= het toegevoegde gewicht).*

Een groot draadraam, aan één kant onderbroken door een stuk isolerend materiaal, balanceert op twee scheermesjes. Via de scheermesjes kun je het raam verbinden met een voedingskast, zodat er een stroom door de ononderbroken zijde gaat. Als je een hoefijzer-magneet of een houder zoals in onderzoek 3 bij de stroomdraad houdt, zal er een lorentzkracht werken die de balans verstoort. Zorg dat de lorentzkracht naar beneden werkt en herstel het evenwicht met behulp van gewichtjes aan de tegenoverliggende zijde. De lorentzkracht is nu gelijk aan het toegevoegde gewicht. Meet voorzichtig opdat het draadraam



niet over de scheermesjes verschuift.
• Onderzoek met deze opstelling de volgende drie werkvragen (let op dat je steeds eerlijk vergelijkt):
– hoe hangt de lorentzkracht af van de stroomsterkte I in de draad;
– hoe hangt de lorentzkracht af van de draadlengte l, die zich in het magnetische veld bevindt;
– hoe hangt de lorentzkracht af van de magnetische veldsterkte B?
• Verwerk de resultaten van de afzonderlijke delen in diagrammen en trek zo duidelijk mogelijke conclusies.

een lorentzkracht-formule opstellen

Uit de voorgaande proeven volgt:
– op een stroomdraad in een magnetisch veld werkt een lorentzkracht;
– deze lorentzkracht is maximaal als stroomrichting en veldrichting loodrecht op elkaar staan, en neemt geleidelijk af tot nul als deze richtingen verdraaien tot evenwijdig of tegengesteld;
– de richting van de lorentzkracht is te vinden met de rechterhand-regel;
– de lorentzkracht is evenredig met de stroomsterkte I;
– de lorentzkracht is, voorzover de draad door een homogeen magnetisch veld loopt, evenredig met de lengte l, van het draadstuk binnen het veld;
– de lorentzkracht is evenredig met de sterkte B van het homogeen magnetische veld.

Samengevat:
als $B \perp I$, dan is de lorentzkracht F_L zowel evenredig met I, als met l, als met B; ofwel: de lorentzkracht is evenredig met $B \cdot I \cdot l$.

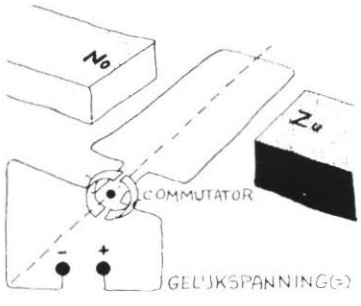
Nu wordt het tijd om af te spreken in welke *eenheid* de magnetische veldsterkte wordt uitgedrukt!
De eenheid van magnetische veldsterkte is de *tesla* (afgekort: T). Als een rechte draad met daarin een stroomsterkte van 1 A een homogeen magnetisch veld met een sterkte van 1 T loodrecht snijdt, dan werkt op elke meter draad een lorentzkracht van 1 N.
Dankzij deze gelukkige keuze van de tesla geldt voor de lorentzkracht op één stroomdraad:

$$F_L = B \cdot I \cdot l \text{ mits } B \perp I.$$

De lorentzkracht blijkt echter ook evenredig met het aantal wikkelingen N (als we van de stroomdraad een spoel maken). De lorentzkracht op N stroomdraden samen is dus N-maal zo groot als de lorentzkracht op één stroomdraad:

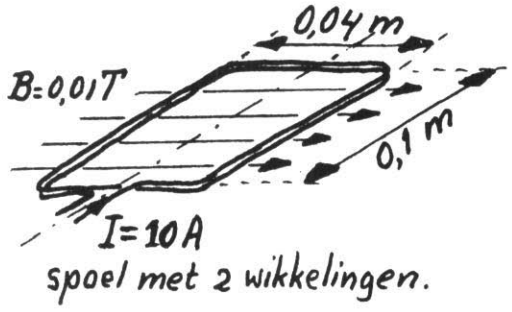
$$F_L = N \cdot B \cdot I \cdot l \text{ mits } B \perp I.$$

5. KOPPEL OP DE ROTOR

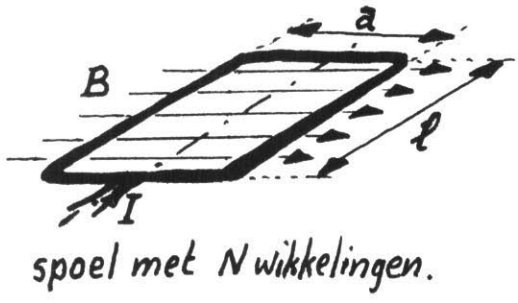


Schematische voorstelling van een commutator-motor.

• Ga met behulp van de richtingsregel voor de lorentzkracht na op welke delen van de hiernaast getekende winding een kracht werkt, en in welke richting.
• Om het maximum koppel op de spoel van de figuur op blz. 24 te berekenen, nemen we de volgende stappen:
– bereken de lorentzkracht op één draad aan één zijde van de spoel;
– bereken de totale kracht op één zijde



van de spoel;
– bereken het koppel dat op de spoel werkt (in Nm).
• Ga na wat er van het koppel overblijft als de spoel 90° draait bij onveranderde stroomrichting.



6.
Herhaal de maximum koppelberekening; gebruik niet de getallen van vraag 5, maar de letters uit de figuur hiernaast. Kontroleer of je zo vindt dat het maximum koppel op de spoel gelijk is aan $I \cdot B \cdot A \cdot N$, waarin A gelijk is aan de oppervlakte van de spoel in m^2 (ofwel: $A = l \cdot a$).

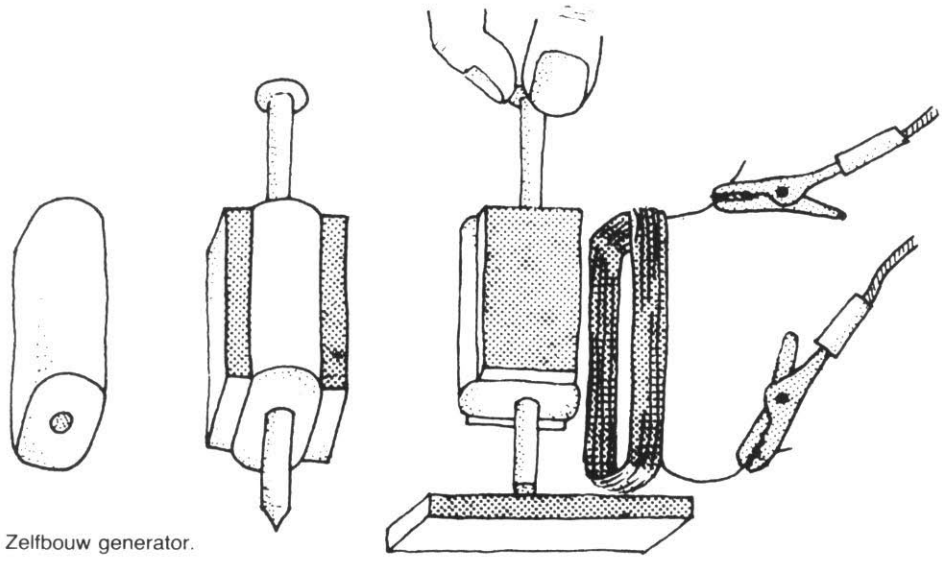
7.
Aan de in opdracht 6 afgeleide formule kun je zien hoe een elektromotor zo sterk mogelijk te maken is. Zorg ervoor dat elk van de grootheden I, B, A en N zo groot mogelijk wordt.
Ga na hoe men I, B, A en N kan vergroten, en waardoor de mogelijkheden daartoe worden begrensd.

Voor een gebruiker van een motor of een ontwerper is niet alleen het koppel van de motor belangrijk. De motor moet ook draaien met een redelijk *toerental*. In hoofdstuk 3 zullen we onderzoeken hoe het toerental wordt beïnvloed door de *belasting* (= het koppel dat van de motor gevraagd wordt).

2.4 HET GENERATORPRINCIPE

1. MAAK ZELF EEN GENERATOR

Van een kurk, een spijker, twee platte magneten, cellotape en een meter dun geïsoleerd koperdraad kun je ook vrij eenvoudig een generator maken.
In de tekeningen hieronder zie je de generator ontstaan.

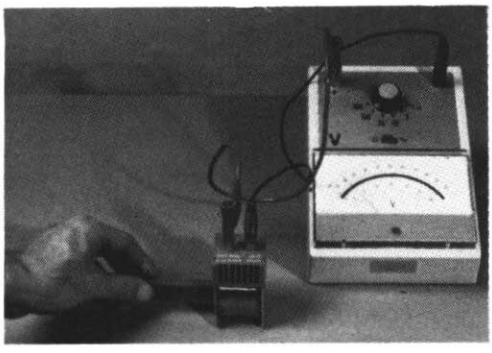


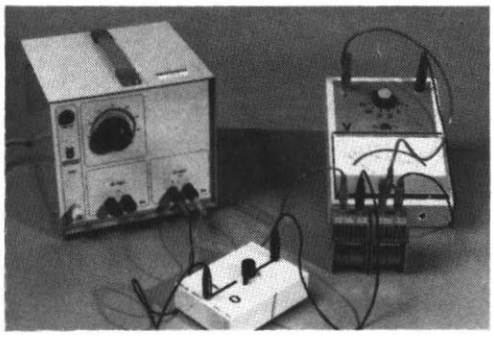
Zelfbouw generator.

- Snij van de grote kurk twee plakjes af.
- Boor een gat door de kurk waar een lange spijker met enige moeite door kan worden gedrukt.
- Plak de twee magneten met cellotape op de afgeplatte zijkanten van de kurk, zodat ze met verschillende polen naar buiten wijzen.
- Wikkel van het koperdraad een spoel en schraap de uiteinden blank.
- Bevestig de spoel op een plankje.
- Als je nu de spijker voor de spoel houdt, zodanig dat de kurk juist vrij van de spoel kan draaien, kun je een tik op de spijker geven opdat de punt niet te gemakkelijk verschuift.
- Als je tenslotte de afgeschraapte uiteinden van de spoel met een gevoelige voltmeter verbindt en de spijker als een tol ronddraait, zul je zien dat je generator spanning levert.

2.

Een verklaring van het generatorprincipe met behulp van bekende verschijnselen is hier onmogelijk. Aan de hand van twee korte proefjes proberen we duidelijker vast te leggen onder welke omstandigheden spanning wordt opgewekt in een spoel.





- Breng plotseling een staafmagneet met zijn uiteinde in een spoel (als in de foto hiernaast), en let op de met de spoel verbonden voltmeter. Verwijder de magneet weer.

Zie je overeenkomst met je modelgenerator?

Wat verandert er als je de andere pool van de magneet laat naderen en weer weggaan?

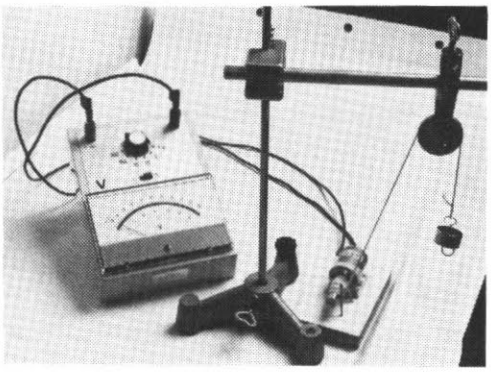
- Zet twee gelijke spoelen tegen elkaar in elkaars verlengde (als in de tweede foto). Verbind de eerste spoel (de primaire) met een gelijkspanningsbron, via een schakelaar. De tweede spoel (de secundaire) wordt aangesloten op een voltmeter.

Welk effekt zal het magnetisme van de eerste spoel hebben op de tweede spoel? Schakel daartoe de primaire stroom een paar keer in en uit. Wat zie je?

Toen Faraday in 1831 dit verschijnsel van elektromagnetische inductie pas had ontdekt, werd hem door een belangrijk persoon de vraag gesteld: 'Wat is daar nu het nut van?' Waarop Faraday als antwoord gaf: 'Wat is het nut van een pasgeboren baby?'

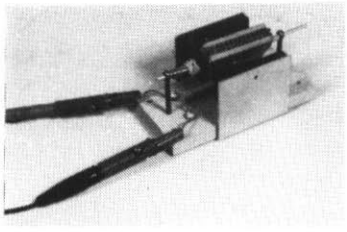
In eerste instantie is de conclusie: in een wikkeling of spoel ontstaat een spanning als het magnetisme binnen de spoel verandert.
Dit verschijnsel is bekend onder de naam *elektro-magnetische inductie*.

3. OMKEERBAARHEID MOTOR-GENERATOR



Op de as van een commutator-motor is een klos bevestigd. Je kunt een touwtje op de klos winden. Aan het touwtje hang je een gewicht dat bij loslaten de motor op gang brengt.
De draadjes van de motor verbind je met een voltmeter. Als de proef niets oplevert, heb je een verkeerd type motor óf moet je een voltmeter voor wisselspanning gebruiken.

- Wat is het maximum voltage dat je afleest? Op welk moment?



• Vervang de voltmeter door een fietslampje en herhaal de proef. Zie je verschillen?
• Een commutator-motor is de professionele versie van je zelfgebouwde motor. Kun je verklaren waarom in de draaispoel ook elektro-magnetische inductie optreedt?

4. EEN GENERATOR UIT DE PRAKTIJK

Onderdelen van een fietsdynamo.

Hiernaast zie je een gedemonteerde dynamo. Een echte dynamo is mogelijk in de klas te bekijken. Probeer in de foto en in de echte dynamo de onderdelen van je zelfgemaakte generator terug te vinden. Zoek op:
– de *draaibare magneet* met twee, of soms meer, polen;
– de *stilstaande spoel* en de bevestiging van de draadeinden van de spoel.
– de weekijzeren onderdelen die het magnetisme beter door de spoel leiden;
– *frame* en *lagers*.

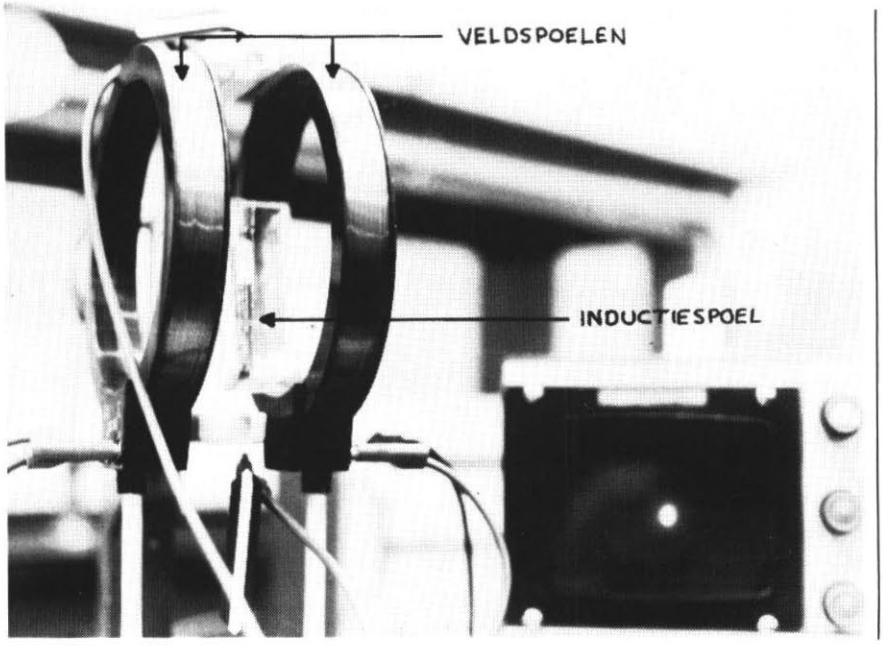
2.5 DE SPANNING DIE DE GENERATOR OPWEKT

In de vorige paragraaf beschreven we elektro-magnetische inductie als volgt: in een spoel ontstaat een (inductie)spanning als het magnetisme binnen de spoel verandert. Deze beschrijving is nog vaag.
Aan de hand van de volgende vragen zullen we proberen een duidelijker idee van inductie te krijgen:
– wat moeten we verstaan onder 'het magnetisme binnen de spoel';
– hoe hangt de grootte van de inductiespanning af van de hoeveelheid 'magnetisme binnen de spoel', van de snelheid waarmee het magnetisme verandert, van het aantal wikkelingen van de spoel, van het gebruik van een weekijzeren kern in de spoel, van de stroom die door de spoel wordt geleverd;
– wat is de richting van de inductiestroom?

het magnetisme binnen de spoel
In het voorgaande hebben we kennis gemaakt met de magnetische veldsterkte *B*, uitgedrukt in tesla. Die veldsterkte is op ieder punt in de omgeving van een magneet verschillend van grootte en van richting. Op het moment dat je een magneet vlak voor een spoel houdt, zou je het hele binnenste van de spoel stukje voor stukje af moeten tasten en op de een of andere manier alle beetjes magnetisme op moeten tellen om te komen tot 'het magnetisme binnen de spoel'. Gemakkelijker gezegd dan gedaan.
Om het eenvoudiger te houden zouden we voor een homogeen magnetisch veld van redelijke afmetingen moeten zorgen, dat we in en uit kunnen schakelen.

1. INDUCTIESPANNING EN DWARSDOORSNEDE

Twee grote spoelen worden in serie met elkaar, via een ampèremeter en een schakelaar, aangesloten op een gelijkspanningsbron. Deze grote spoelen noemen we de veldspoelen.
Hoe homogeen het veld is, kun je testen met een hall-sonde. Vervolgens gaan we onderzoeken of de inductiespanning afhangt van de dwarsdoorsnede van de inductiespoel, die je in het homogene veld opstelt.
Aangezien die spanning maar kort optreedt zullen we met een oscilloscoop moeten meten, want een wijzerinstrument is veel te traag.
• Pak of maak tenminste twee inductiespoelen met een gelijk aantal wikkelingen en verschillend oppervlak. Meet de



maximale inductiespanningen die optreden bij in- en uitschakelen van de veldspoelen. Zorg dat de veldsterkte gelijk is bij beide metingen.

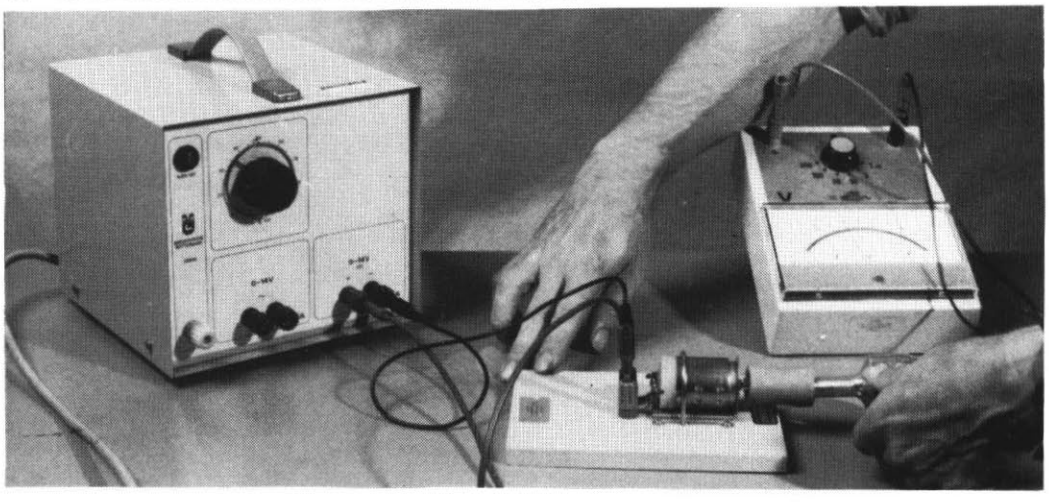
- Meting van de inductiespanning bij in- en uitschakelen is moeilijk. Dat schakelen is nodig om de magnetische veldsterkte te veranderen. Als je de veldspoelen op wisselspanning aansluit, verandert de magnetische veldsterkte voortdurend. Meet in dat geval nogmaals de maximale inductiespanningen.
- Probeer een conclusie te trekken over de invloed van het oppervlak *A* van de dwarsdoorsnede van de spoel op de inductiespanning

2. INDUCTIESPANNING EN VELDSTERKTE

Voor het bepalen van het verband tussen veldsterkte en inductiespanning gebruik je dezelfde opstelling als bij aktiviteit 1.
De magnetische veldsterkte kun je variëren door de stroomsterkte in de veldspoelen te variëren. De grootte van de magnetische veldsterkte meet je met een hall-sonde.

- Stuur wisselstroom door de veldspoelen. Meet de maximale inductiespanning die optreedt in de inductiespoel. Doe dit bij een aantal verschillende waarden van de veldstroom. Gebruik bij je metingen steeds dezelfde inductiespoel.
- Probeer een conclusie te trekken over de invloed van de magnetische veldsterkte *B* op de inductiespanning.

3. INDUCTIESPANNING EN DRAAISNELHEID

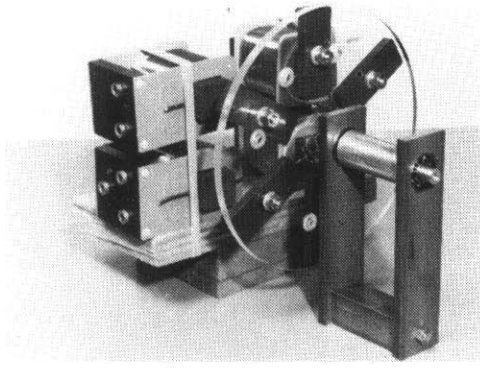


Een elektromotor wordt flexibel, bijv. met een stukje rubberslang, gekoppeld aan een dynamo.
De dynamo wordt verbonden met een oscilloscoop en met een voltmeter.

- Bepaal bij tenminste drie draaisnelheden de trillingstijd en de amplitude van de wisselspanning uit het oscilloscoopbeeld. Noteer ook de uitslag van de voltmeter.
- Bereken de frekwenties van de gemeten wisselspanningen. Teken een diagram waarin de amplitude van de wisselspanning is uitgezet tegen de frekwentie, en trek een zo duidelijk mogelijke conclusie.

OSCILLOSCOOP EN VOLTMETER
De amplitude van de wisselspanning is niet gelijk aan de aanwijzing van de voltmeter. Een oscilloscoop meet de werkelijke spanning op elk moment. In een halve periode verandert deze spanning van 0 naar een maximum waarde V_{max} en weer terug naar 0. De voltmeter meet de zogenaamde effectieve spanning V_{eff}: een soort gemiddelde waarde gedurende die halve periode.
Uit nauwkeurige metingen blijkt: $V_{eff} = 0{,}71\ V_{max}$.
Een wisselstroommeter meet effectieve stroomsterkte. *Voor de warmte ontwikkeling in een draad maakt het niet uit of de stroom afwisselend van links naar rechts en omgekeerd gaat. De effectieve stroomsterkte bij een wisselstroom is gelijk aan de stroomsterkte bij een gelijkstroom die evenveel warmte produceert in dezelfde tijd. Ook hier geldt:* $I_{eff} = 0{,}71\ I_{max}$.

4. INDUCTIESPANNING EN AANTAL WIKKELINGEN



De schijfgenerator met verwisselbare spoelen.

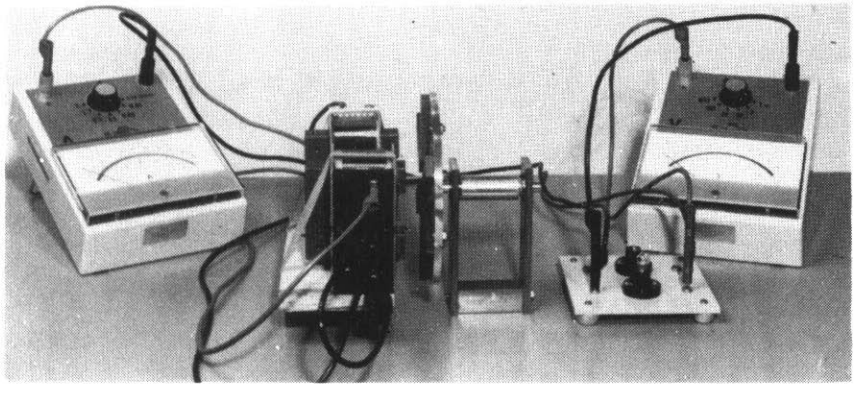
• Een schijf met zes platte magneten, afwisselend noord-zuid-noord enz., kan worden rondgedraaid tegenover enkele stilstaande spoelen. Zorg dat de spoelen verschillende aantallen wikkelingen hebben. Verbind elke spoel met een eigen wisselspanningsmeter. Draai de magneetschijf regelmatig rond en lees de voltmeters af.
Welk effekt heeft het aantal wikkelingen op de grootte van de inductiespanning?

5. INVLOED VAN WEEKIJZEREN KERN

• Verwijder de U-vormige weekijzeren kernen. Herhaal proef 4 en meet de inductiespanningen die nu optreden.

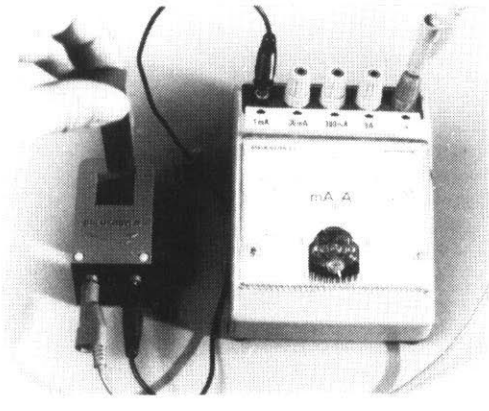
6. INVLOED VAN INDUCTIESTROOM

• De vier spoelen uit proef 4 kunnen in serie worden geschakeld en als spanningsbron op een lampje worden aangesloten (zie ook de foto hiernaast). Probeer de draaisnelheid van de schijf konstant te houden, en meet de spanning op het lampje met het lampje uit en met het lampje aan.
Welk effekt heeft de inductiestroom op de gemeten spanning?

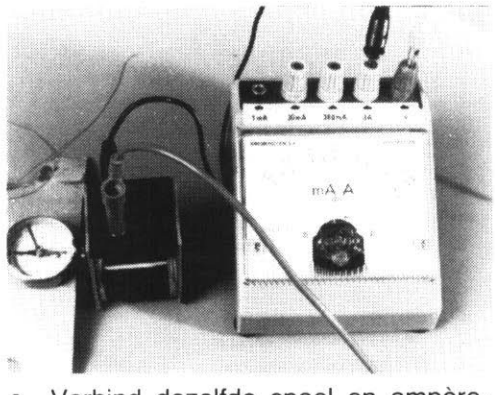


• Meet ook de uitlooptijd van de magneetschijf vanaf dezelfde beginsnelheid, zowel met ingeschakeld als met uitgeschakeld lampje.
Welk effekt heeft de inductiestroom op de weerstand tegen draaien die de magneetschijf ondervindt?

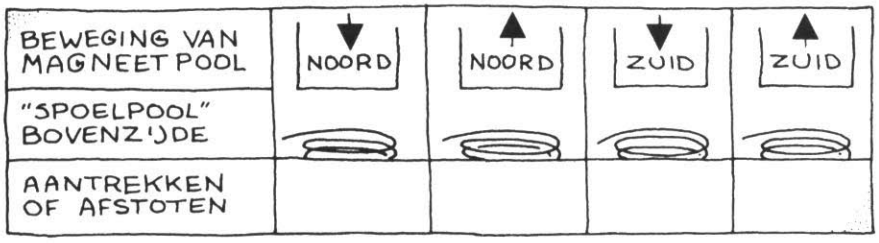
7. RICHTING VAN DE INDUCTIESTROOM



• Als we een magneet in en uit de spoel bewegen, zijn er vier gevallen te onderscheiden: noordpool komt, noordpool gaat, zuidpool komt, zuidpool gaat. Verbind een spoel met een ampèremeter, en onderzoek in welke van deze vier gevallen de meter naar rechts uitslaat en in welke gevallen naar links.



• Verbind dezelfde spoel en ampèremeter nu met een gelijkspanningsbron, zodanig dat de meter naar rechts uitslaat. Onderzoek met een kompasnaaldje waar de noord- en zuidpool van de spoel zich bevinden bij deze stroomrichting.
Doe hetzelfde voor een ampèremeteruitslag naar links.



• Verzamel de resultaten in een tabel zoals hiernaast is weergegeven. Zet ook in de tabel in welke gevallen de bewegende magneet en de spoel elkaar aantrekken en in welke gevallen ze elkaar afstoten.
Zie je regelmaat in de tabel?

Uit de proeven in een homogeen magnetisch veld blijkt:
– de inductiespanning is evenredig met de sterkte van het magnetisch veld B;
– de inductiespanning is evenredig met het oppervlak A van het gat van de inductiespoel.

'Magnetisme binnen de spoel' blijkt dus evenredig te zijn met de (gemiddelde) veldsterkte B dwars door de spoel én met het oppervlak A van het gat van de spoel.
Samengevat:
het 'magnetisme binnen de spoel' is evenredig met $B \cdot A$.

Uit de andere proeven blijkt:
– de inductiespanning is evenredig met de snelheid waarmee het magnetisme verandert (dat wil zeggen: met de draaisnelheid van de generator);
– de inductiespanning is evenredig met het aantal wikkelingen van de spoel;
– de inductiespanning neemt toe als men een weekijzeren kern in de spoel plaatst.
Als je de inductiespoel gebruikt als spanningsbron voor een stroomkring blijken nog twee verschijnselen:
– de spanning tussen de uiteinden van de spoel neemt af naarmate de spoel meer stroom moet leveren;
– door inductiestroom wordt de spoel magnetisch, en wel zodanig dat de verandering van het 'magnetisme binnen de spoel' wordt tegengewerkt.

Deze laatste conclusie over de inductiestroom staat bekend als de *wet van Lenz* en luidt: de in een spoel of winding opgewekte inductiestroom heeft een zodanige richting, dat daardoor de oorzaak van het ontstaan van die inductiestroom wordt tegengewerkt.

magnetische flux
'Magnetisme binnen de spoel' heet onder natuurkundigen de *magnetische flux* van de spoel, aangeduid met Φ (Griekse hoofdletter phi) en gemeten in weber (afgekort Wb). De magnetische flux vind je door de magnetische veldsterkte B (in T) en het oppervlak A van de dwarsdoorsnede van de spoel (in m^2) te vermenigvuldigen:

$$\Phi = B \cdot A$$

Een inductiespanning treedt dus op als de magnetische flux verandert.

De invloed van een weekijzeren kern lijkt roet in de formule van de inductiespanning te gooien. In werkelijkheid valt dat mee. Weekijzer heeft een concentratie van het magnetisch veld tot gevolg. De veldsterkte en dus ook de flux worden groter, waardoor ook een hogere inductiespanning wordt opgewekt. Ter illustratie daarvan: paragraaf 2.4 proef 2, tweede opstelling. Schuif, terwijl er stroom door de primaire spoel loopt, een weekijzeren kern in de secundaire spoel en let op de voltmeter!

EEN FORMULE VOOR INDUCTIESPANNING
De inductiespanning V_{ind} is evenredig met de verandering van de magnetische flux $\Delta\Phi$. Als die verandering twee keer zo snel gaat, dus in de helft van de tijd, wordt de inductiespanning V_{ind} twee keer zo groot. Voor één wikkeling kun je dat verwerken in de formule:

$$\text{inductiespanning} = \frac{\text{fluxverandering}}{\text{tijdsduur}}$$

$$V_{ind} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Met N wikkelingen wordt deze formule: $V_{ind} = N \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

DE INVLOED VAN DE INDUCTIESTROOM

Tot nu toe heb je gekeken naar het optreden van een inductiespanning tussen de uiteinden van een spoel als die uiteinden niet 'buitenom' geleidend verbonden zijn. Met andere woorden: de spoel hoeft geen stroom te leveren.

Wat gebeurt er nu met de spanning tussen de uiteinden van de spoel, als deze wél stroom levert (de inductiestroom I_{ind})?

De draad waarvan de spoel gemaakt is, heeft een zekere weerstand R. Er is spanning nodig om de inductiestroom ook door díe draad te laten gaan ($V = I_{ind} \cdot R$). Er blijft zodoende minder over aan de uiteinden van de spoel. De spanning aan die uiteinden heet wel de klemspanning V_k. Voor de klemspanning geldt:

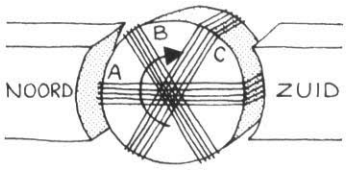
$$V_k = V_{ind} - I_{ind} \cdot R$$

Naarmate de spoel meer stroom moet leveren, neemt de spanning tussen de uiteinden van de spoel (de klemspanning) dus af.

8. HOE MAAK JE EEN HOGERE SPANNING?

- Leid uit de voorgaande proeven en conclusies af wat je aan een generator kunt veranderen, en op welke manier, om een zo groot mogelijke inductiespanning op te wekken.
- Ga voor elke gevonden faktor na welke praktische beperkingen je tegen zult komen bij deze veranderingen.

2.6 OPGAVEN

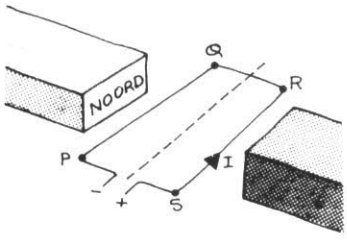


Een zespolige gelijkstroommotor.

1.

Een gelijkstroommotor heeft een rotor bestaande uit drie verschillende spoelen die onderling hoeken van 60° vormen.
De drie spoelen A, B en C staan op een bepaald moment in de getekende stand tussen de vaste magneetpolen. De pijl geeft de draairichting van de motor aan.

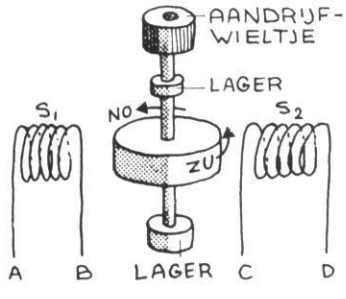
- Door welke van de drie spoelen moet op dit moment een stroom lopen, om een zo groot mogelijk koppel te produceren? Verklaar je antwoord.
- Geef aan in welke richting de stroom door de spoel moet gaan om de motor in de aangegeven richting te laten draaien.



2.

De getekende winding PQRS, lang 0,08 m en breed 0,03 m, bevindt zich in een homogeen magnetisch veld met een veldsterkte $B = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ T. De stroom I door de winding is 0,2 A in de aangegeven richting.

- Bereken de grootte van de lorentzkracht op elk der vier zijden van de winding.
- In welke richting wil de winding gaan draaien?
- Bereken het koppel dat op de winding werkt.



3.

De dynamo van Sanne levert geen stroom meer. Samen met Floor heeft zij de dynamo gedemonteerd. Zij hebben een tekening gemaakt die je hiernaast ziet. Een ronde magneet met één noord- en één zuidpool draait rond tussen twee spoelen S_1 en S_2. De vier uiteinden van de spoeldraden zijn losgebroken. Zij beredeneren welke inductiestromen ontstaan als de noordpool naar S_1 en de zuidpool naar S_2 toekomt.

- Welke pool zou S_1 aan de rechterkant krijgen, als er een inductiestroom kon lopen? En S_2 aan de linkerkant?
Wat zou dan de stroomrichting zijn in S_1 en S_2?
- Volgens Sanne moet nu B met C worden verbonden terwijl A en D naar de lamp moeten. Floor wil A met C en B met D verbinden, en dan ook van A én van D een verbinding naar de lamp leggen.
Wie heeft gelijk? Verklaar je antwoord.

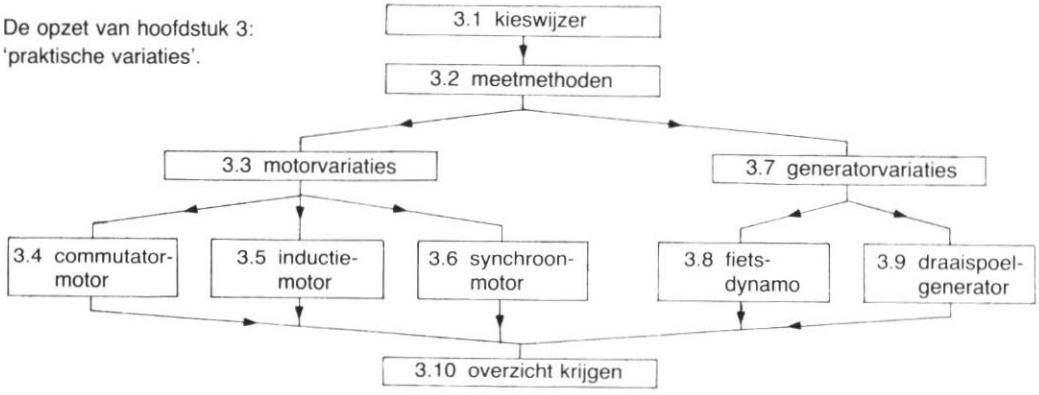
hoofdstuk 3

PRAKTISCHE VARIATIES

inhoud blz

3.1	kieswijzer	32
3.2	meetmethoden	34
3.3	motorvariaties	38
3.4	commutator-motoren	39
3.5	inductie-motoren	40
3.6	synchroonmotor	41
3.7	generatorvariaties	42
3.8	fietsdynamo's	43
3.9	draaispoelgeneratoren	43
3.10	overzicht krijgen	44

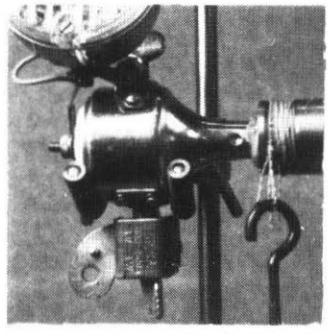
De opzet van hoofdstuk 3: 'praktische variaties'.

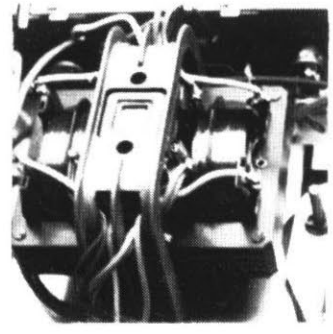


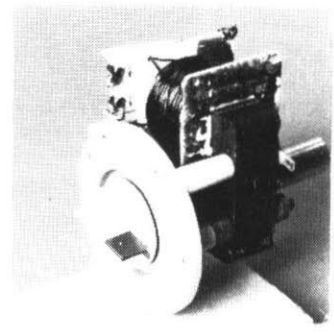
praktische variaties

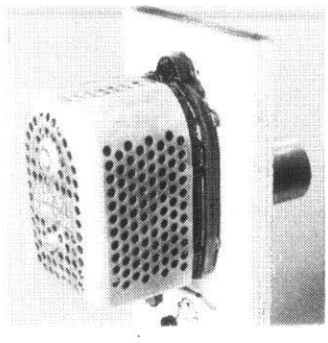
Een uitstapje in de veelvormige werkelijkheid, waarbij we ons vooral op de capaciteiten van machines richten. Daarbij gaat het om zaken als toerental, vermogen en rendement onder verschillende belastingen.
Naast de motoren en generatoren die je tot nu toe bekeken hebt, bestaan er nog andere types. Op de werking van die andere types motoren en generatoren gaan we in, voor zover dat belangrijk is voor het beoordelen en begrijpen van het gedrag van die machines.

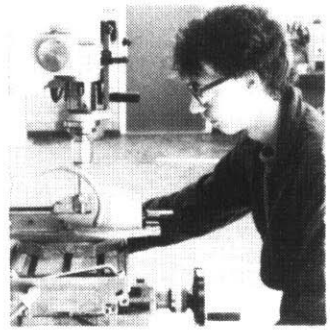
Er is veel variatie, zodat werkverdeling over zes tot acht groepjes, elk met een ander soort machine, aan te bevelen is. Uit de rapportages door de groepjes moet blijken hoe de eigenschappen en de toepasbaarheid van die machines verschillen.

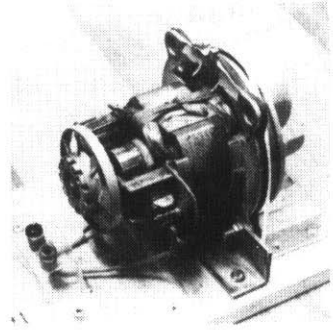






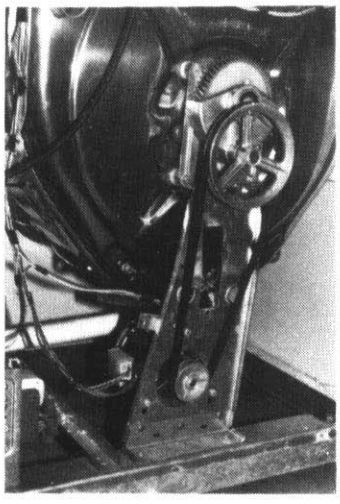






3.1 KIESWIJZER

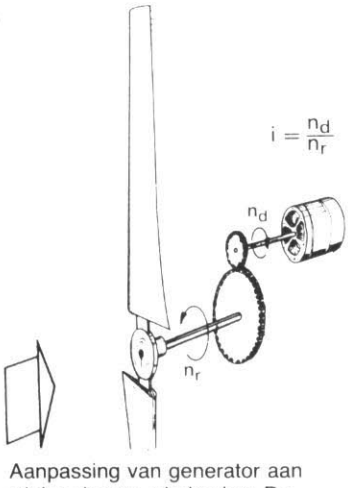
In hoofdstuk 2 heb je één soort motor en één soort generator gezien. Er is uitgebreid ingegaan op de principes van die motor en die generator. Maar er zijn ook andere typen. Bijv. de inductiemotor, waarbij de rotor helemaal geen deel uitmaakt van een stroomkring. Of de autodynamo, waar geen permanente magneet in zit. Ook wat betreft deze andere machines zullen we nagaan wat er in zit en hoe ze werken.
Aan de andere kant is het voor een gebruiker vooral belangrijk dat het werkt, en wel zo goed mogelijk. Het is duidelijk dat, als er één type motor stukken beter zou zijn dan alle andere, alleen dit type motor gebruikt zou worden. Klaarblijkelijk zijn er verschillende goede motoren voor verschillende doelen. Hetzelfde geldt voor generatoren. Degene die machines moet ontwerpen, zal met een heleboel eisen rekening moeten houden. Wij richten ons in dit hoofdstuk vooral op de volgende drie eisen:
- de machine moet zuinig zijn met energie;
- de machine moet voldoende vermogen kunnen leveren;
- de machine moet betrouwbaar en niet kwetsbaar zijn.



Aanpassing van motor aan apparaat in een wasmachine.

In hoofdstuk 6 zullen we meer de toepassing onderzoeken van motoren en generatoren in allerlei apparaten en systemen zoals hijskranen en windgeneratoren. Dan komen ook andere eisen naar voren, zoals:
- de machine moet goedkoop zijn;
- de motor moet een voldoende groot koppel kunnen leveren;
- de generator moet een passende spanning kunnen leveren;
- de generator moet bij de beschikbare toerentallen en de beschikbare energie kunnen werken;
- de machine moet, ook bij abnormale gebeurtenissen, veilig zijn.

De ontwerper heeft hier heel wat creatieve mogelijkheden. Hij kan bijvoorbeeld een geschikte overbrenging kiezen van motor naar apparaat of van molenwieken naar generator. Hij kan met een transformator de spanning veranderen. En zo is er meer, teveel om in een thema te overzien.



Aanpassing van generator aan wieken in een windmolen. De overbrengingsverhouding *i* geeft aan hoeveel keer de dynamo-as sneller draait dan de rotor-as.

Tenslotte zijn er nog een aantal eisen waar we ons níet mee bezig houden:
- de machine mag niet zwaar zijn;
- de machine mag maar weinig lawaai maken;
- de machine mag niet veel ruimte innemen.

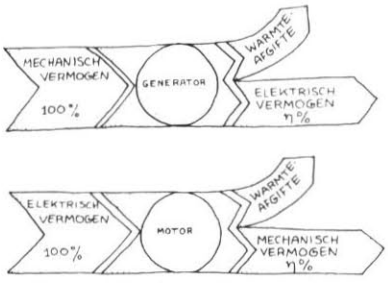
Jammer genoeg zijn de eisen vaak strijdig met elkaar. Om maar een voorbeeld te noemen: het is altijd mogelijk om bestaande motoren zó te veranderen, dat ze zuiniger zijn met energie. Je hoeft bijvoorbeeld alleen maar dikkere koperdraden voor de spoelen te gebruiken om de warmte-ontwikkeling in die draden te verminderen. Het gevolg is echter dat de motor ook zwaarder, duurder en groter wordt. En per slot van rekening is niemand geïnteresseerd in een stofzuigermotor, die 50 kg weegt, 50 cm diameter heeft en duizend gulden kost, maar dan wel héél zuinig is met energie.

onderzoeksvragen

In dit hoofdstuk gaat het om de volgende twee onderzoeksvragen:

– door te meten aan het opgenomen en het nuttig geleverde vermogen van machines kunnen we meer te weten komen over 'zuinigheid met energie' en 'geleverd vermogen' onder verschillende omstandigheden;

– door na te gaan wat er in zit en hoe ze werken, kunnen we van elke machine een indruk krijgen van zijn betrouwbaarheid en kwetsbaarheid.



De energie-stroomdiagrammen van een motor en van een generator.

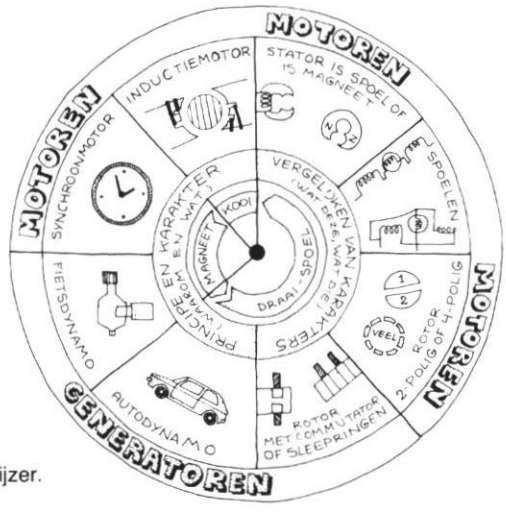
Hiernaast zie je de energieschema's van een motor en een generator. Er gaat elke seconde een hoeveelheid energie de machine in. We noemen die hoeveelheid het *opgenomen vermogen*. De motor neemt elektrisch vermogen op, waarvan we hebben geleerd dat het gelijk is aan het produkt van stroomsterkte en spanning: $P_{el} = V \cdot I$.
De generator neemt mechanisch vermogen op; dat wil zeggen dat er elke seconde een hoeveelheid arbeid op de as van de generator moet worden verricht om de generator met konstante snelheid te laten draaien. Arbeid is het produkt van kracht en weg. In de volgende paragraaf wordt uitgelegd hoe je dat mechanisch vermogen kunt meten.

In beide machines wordt een deel van het opgenomen vermogen omgezet in *warmte*. Aangezien we generatoren en motoren meestal niet als kachel gebruiken, is deze warmte niet nuttig. Een deel van deze warmte komt tevoorschijn in de draden van de spoelen en neemt toe met toenemende stroomsterkte. Een ander deel ontstaat door wrijving in lagers en eventueel in de overbrenging.
Tenslotte leveren beide machines een *nuttig vermogen*.
De motor levert mechanisch vermogen, ofwel elke seconde een bepaalde hoeveelheid arbeid.
De generator levert elektrisch vermogen.
Dit nuttige vermogen is steeds een *deel* van het opgenomen vermogen. De verhouding van nuttig vermogen P_{nuttig} en opgenomen vermogen $P_{opgenomen}$ wordt het *rendement* van de machine genoemd, aangeduidt met η (Griekse letter èta):

$$\eta = \frac{P_{nuttig}}{P_{opgenomen}}$$

Het rendement is een decimaal getal of een percentage. Een machine die zuinig is met energie vormt zo weinig mogelijk nutteloze energie, in dit geval zo weinig mogelijk warmte. Het rendement van zo'n machine ligt zo dicht mogelijk bij 100%.

kiezen

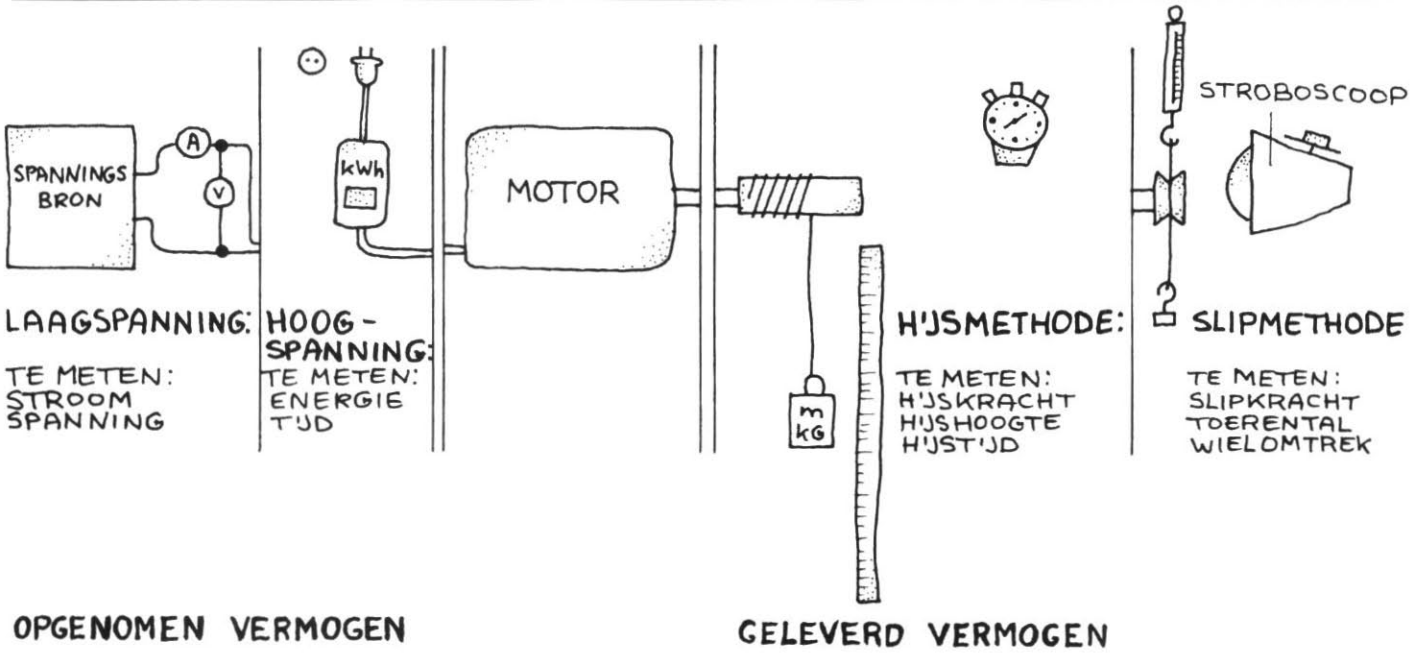


De kieswijzer.

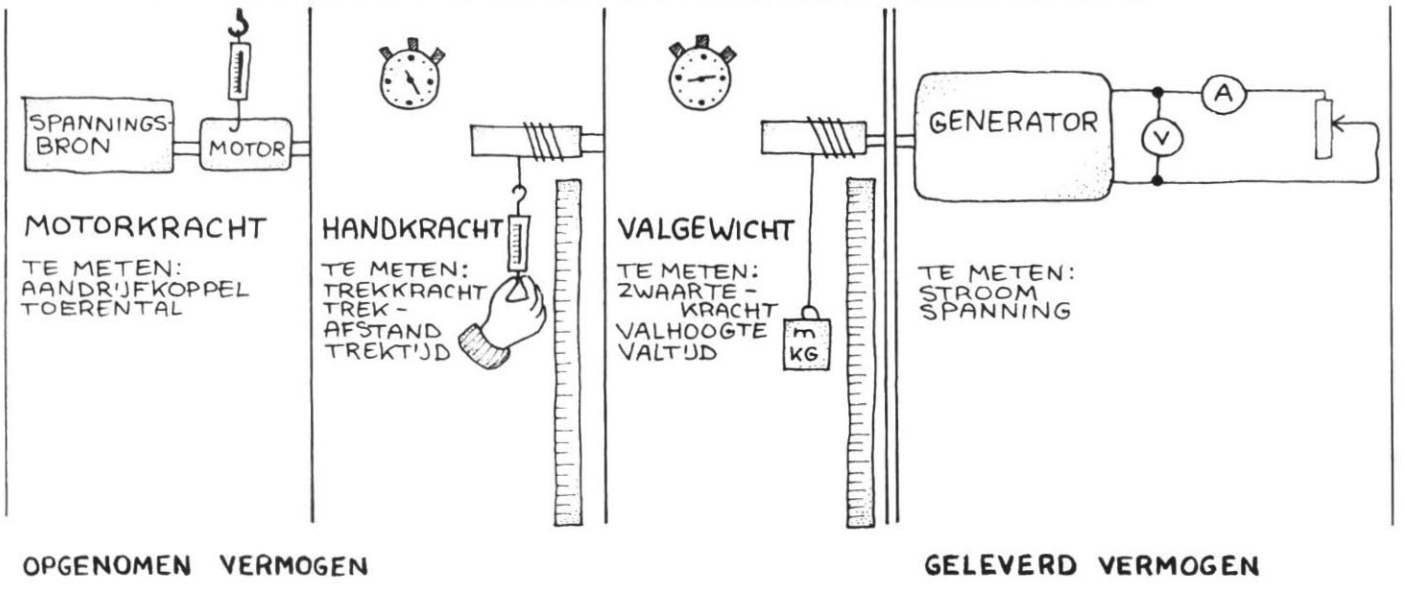
In de roos hierboven zijn acht verschillende keuzes aangegeven. In sommige gevallen gaat het om het vergelijken van twee uit het vorige hoofdstuk bekende types. Je vindt die keuzes aan de rechterkant. In andere gevallen gaat het om onderzoek aan één machine van een afwijkend type. Die keuzes vind je aan de linkerkant.

3.2 MEETMETHODEN

Deze paragraaf dient als ideeënbron bij de onderzoeken in de paragrafen 3.3 t/m 3.9. Er wordt aangegeven op welke manieren het opgenomen en het nuttig geleverde vermogen kan worden gemeten. Elke manier is, waar nodig, van een toelichting voorzien. Elk onderzoek begint met het kiezen, na eens wat uitproberen, van de voor jouw machine meest geschikte meetmethode.

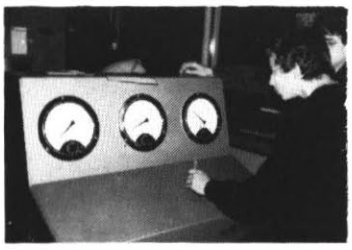


Motormeetmethoden.



Generatormeetmethoden.

De bovenstaande schema's geven voor motor en generator een overzicht van mogelijke meetmethoden. Hierna worden die mogelijkheden toegelicht. Waar nodig is vermeld in welk geval de methode slecht bruikbaar is.



Veilig meetpaneel voor het meten bij een spanning van 220 V.

elektrisch vermogen meten

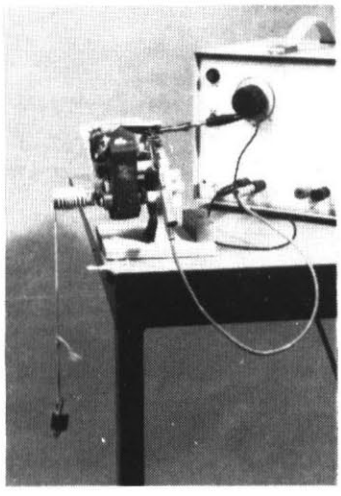
Het elektrisch vermogen P_{el} dat wordt geleverd of opgenomen hangt af van de stroomsterkte I (in A) en de spanning V (in V) : $P_{el} = V \cdot I$ (in W).

– *Laagspanning.*

Een ampèremeter in de stroomkring en een voltmeter parallel aan de onderzochte machine zijn voldoende. Sommige elektrische machines werken met wisselspanning. Kies dus het juiste type meters.

– *Proeven met 220 V netspanning.*

Uit veiligheidsoverwegingen moet de stroomkring worden opgebouwd uit goedgekeurde snoeren, stekers en contactdozen. Eventueel zijn stroom- en spanningsmeters te verwerken in een gesloten huis of in een wandpaneel. De energietoevoer in een bepaalde tijd kan ook direkt worden gemeten met een kilowatt-uurmeter (1 kWh = 1000 W · 3600 s = $3{,}6 \cdot 10^6$ J). Zo'n meter kan ook in joule zijn geijkt; we spreken dan van een joulemeter.



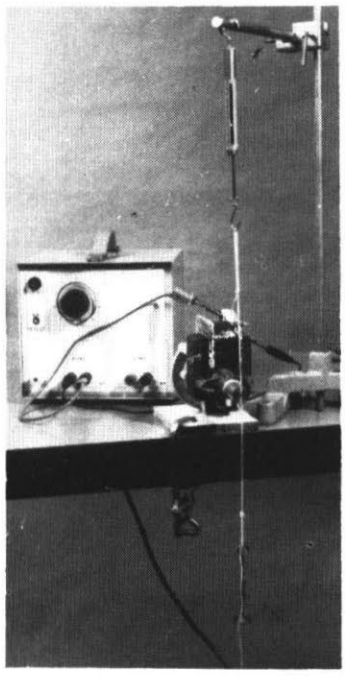
hijsmethode voor motor

Het door een motor geleverde vermogen kun je bepalen door de motor een massa te laten ophijsen. Bij een eenparige beweging moet de trekkracht F_t omhoog op de massa gelijk en tegengesteld zijn aan de zwaartekracht F_z omlaag. Op een massa m werkt een zwaartekracht $F_z = m \cdot g$, waarin g = 9,82 m/s^2. Tijdens het hijsen moet de hijshoogte h en de hijstijd t worden gemeten.

De motor verricht arbeid: $W = F_t \cdot h$

Geleverd nuttig vermogen: $P = \dfrac{F_t \cdot h}{t}$

Beperking: het hijsen moet zo goed mogelijk *eenparig* gebeuren en langzaam genoeg om de hijstijd, de stroom en de spanning nauwkeurig te kunnen meten, respectievelijk aflezen.



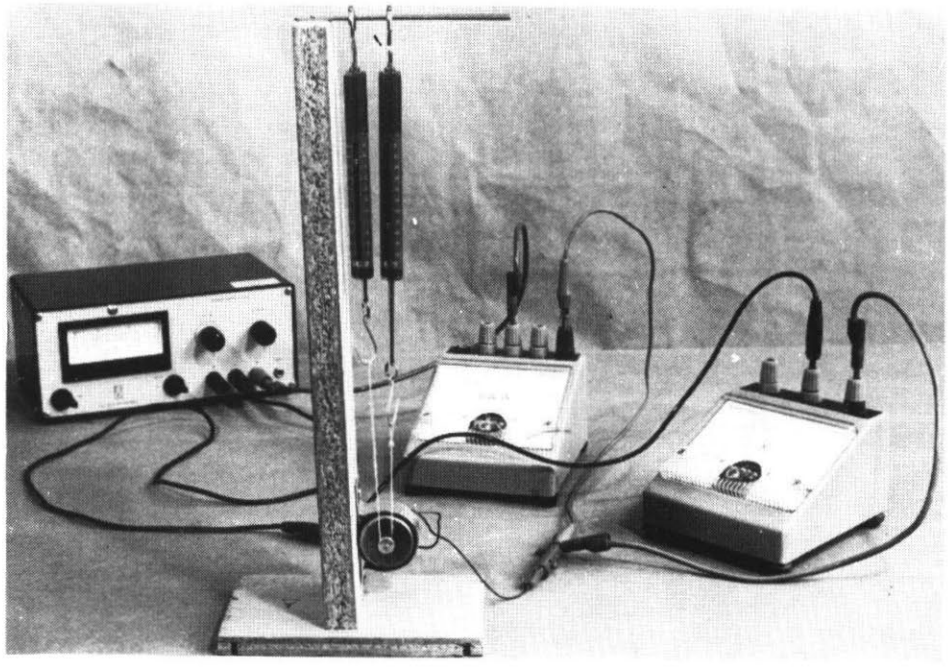
slipmethode voor motor

Met behulp van wrijving kun je een tegenwerkende kracht F_w produceren, die te meten is. Als je daarbij de wrijfsnelheid v_w bepaalt, dan kun je het door de motor geleverde vermogen berekenen: $P = F_w \cdot v_w$.

– *Bepaling wrijvingskracht F_w*

Een koord wordt een keer om de motoras geslagen en met een variabel gewichtje meer of minder strak gehouden. Als de motor stilstaat, wijst de veerunster de grootte van het gewicht aan. De draairichting van de motor moet zo zijn, dat de veerunster verder wordt uitgetrokken (in de foto hiernaast bijv. van 0,10 N naar 0,67 N).

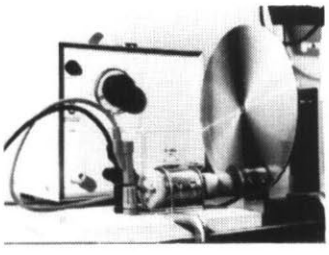
De wrijvingskracht F_w is nu het verschil van de unsteraanwijzingen bij stilstaande en draaiende motor.

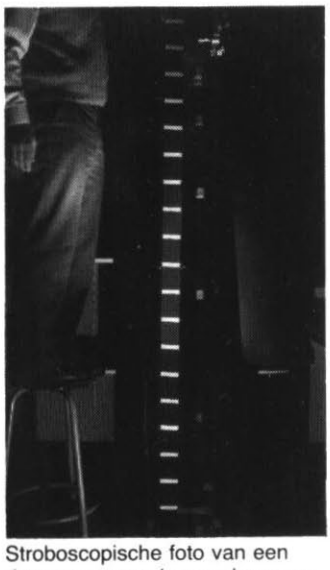


Bij een soortgelijke methode wordt het koord door twee unsters strak gehouden (zie foto onderaan blz. 35). Als de motor stilstaat, wijzen de veerunsters dezelfde waarde aan. Bij rechtsom draaiende motor, als in de foto, zullen wrijvingskracht F_w en linkerunster het koord rechtsom trekken, terwijl de rechterunster het koord linksom trekt. Het koord blijft in rust, dus geldt: $F_w + F_{links} = F_{rechts}$. De wrijvingskracht is het verschil van de aanwijzingen van de twee veerunsters.

– *Bepaling wrijfsnelheid* v_w

Per omwenteling wrijft de as over één asomtrek ($2\pi \cdot r$) langs het koord. Bij een toerental van f omwentelingen per seconde zal de as in een seconde over een afstand $2\pi \cdot r \cdot f$ langs het koord wrijven. Dat is precies de wrijfsnelheid v_w. Let wel op dat je de straal r in meter invult om de snelheid in m/s te berekenen.





Stroboscopische foto van een dynamo, aangedreven door een valgewicht.

toerental van de motor

Voorzie de as van een merkteken.

– *Langzaam draaiend*

Als je oog de draaiing kan volgen, meet dan met een stopwatch de tijd t voor 10 omwentelingen. Het toerental is dan $f = 10/t$ omwentelingen per seconde.

– *Snel draaiend*

Gebruik een stroboscooplamp en zoek de hoogste flitsfrekwentie f waarbij de as lijkt stil te staan. Deze frekwentie is dan het toerental van de motor (zie de tekst in het kader op blz. 38).

– *Snel omzetten in langzaam draaiend*

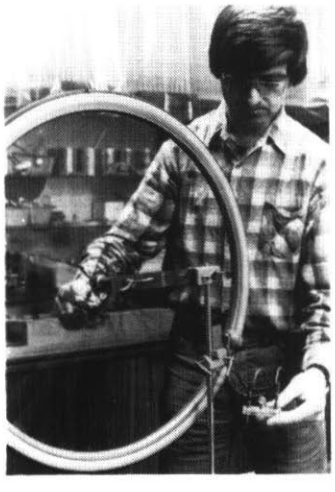
Met een lichtlopende, niet slippende overbrenging van de motoras naar een groter wiel (bijvoorbeeld zoals in de bovenste foto weergegeven), kun je het gebruik van een stroboscoop omzeilen. Eventueel kan ook het geleverd vermogen aan het grote wiel worden gemeten.

generator met valgewicht

Het door een generator opgenomen vermogen kun je bepalen door de generator aan te drijven met een vallend gewicht. Vanaf het moment dat de beweging van het valgewicht eenparig is, wordt de generator aangedreven met een konstante kracht F_t, die gelijk is aan de zwaartekracht: $F_z = m \cdot g$ (met de massa m in kg en $g = 9{,}82$ m/s^2).
Tijdens het vallen moet de valhoogte h en de valtijd t worden gemeten.
De verrichte arbeid: $W = F_t \cdot h$.

Het opgenomen vermogen: $P = \dfrac{F_t \cdot h}{t}$

Beperking: de stroboscopische opname hiernaast laat helemaal geen konstante snelheid zien; de methode is alleen bruikbaar als de valsnelheid klein is en je redelijk nauwkeurig de tijd kunt meten en de stroom- en spanning af kunt lezen.
Kontrole: de meterstanden moeten, na een korte aanloop, konstant zijn.



generator op handkracht

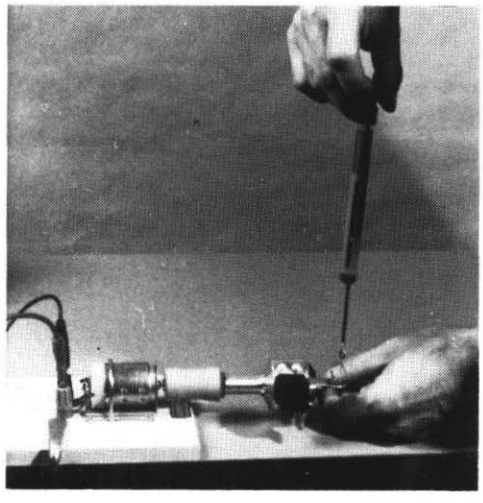
Je kunt het door de generator opgenomen vermogen ook bepalen door aandrijving met handkracht. Met de hand kun je een vrij konstante en meetbare snelheid v leveren. Door een veerunster voort te trekken is de trekkracht F_t direkt af te lezen. Het geleverd vermogen: $P = F_t \cdot v$.
Beperking: de handsnelheid is mogelijk niet groot genoeg om de generator voldoende op toeren te brengen; de generator draait dan niet snel genoeg om díe spanning op te wekken waarvoor hij ontworpen is.

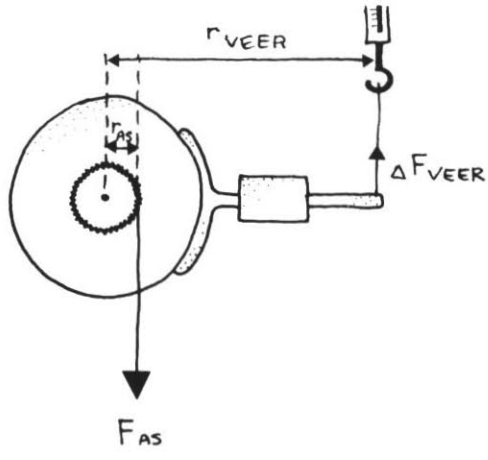
valgewicht of handkracht via overbrenging

Met een slipvrije en lichtlopende overbrenging zijn de beperkingen van de twee voorgaande methodes misschien te verhelpen, ten koste van wat energie'verlies' door wrijving.
De opstelling hiernaast toont een dynamo die via een fietswiel wordt aangedreven. Door

middel van een holle cylinder, bevestigd aan het wiel, is aandrijving met een valgewicht of met de hand te realiseren.
Bij hetzelfde generatortoerental is de valsnelheid of de treksnelheid veel kleiner.

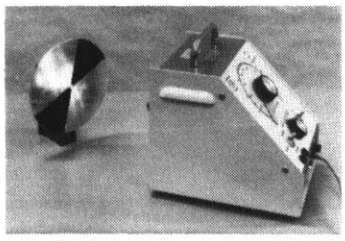
generator met motoraandrijving
Het door een generator opgenomen vermogen kun je ook bepalen door de generator met een elektromotor aan te drijven. Om een generator een langere tijd te laten draaien en dat ook nog met verschillende snelheden, is deze methode het meest bruikbaar. Er is dan een flexibele koppeling nodig van motor naar generator: een stukje rubberslang of een asje met dubbele cardankoppeling.
In de foto hieronder wordt een dynamo wel ondersteund, maar kan over een kleine hoek met de motor meedraaien.





Dit draaien wordt tegengegaan met een veerunster. Bij stilstaande motor wijst de unster een kleine kracht aan. Als de motor draait neemt de unsterkracht toe, omdat de unster een moment moet leveren, tegengesteld aan het aandrijfkoppel.
ΔF_{veer} is het verschil in unsterkracht, wel en niet draaiend. Het momentenevenwicht leert ons: $\Delta F_{veer} \cdot r_{veer} = F_{as} \cdot r_{as}$. De arbeid die de motor op de generator verricht in één omwenteling is het produkt van kracht en weg, ofwel van F_{as} en de asomtrek $2\pi \cdot r_{as}$. Bij een toerental van f omwentelingen per seconde wordt er door de motor f keer zoveel arbeid verricht.
Het door de generator opgenomen vermogen is dus: $P = F_{as} \cdot 2\pi \cdot r_{as} \cdot f$.

toerental generator
Het toerental is te vinden met een stroboscooplamp óf, bij gebruik van een slipvrije overbrenging, door de tijd van 10 omwentelingen te meten met een stopwatch (zie ook 'toerental motor').
Het toerental van een wisselstroomgenerator is ook te meten met een oscilloscoop. Bepaal eerst hoeveel spanningspieken de generator levert tijdens een langzame omwenteling; bijvoorbeeld + − + −). Als de generator sneller draait, zul je op de oscilloscoop een wisselspanning zien, waarvan je de frekwentie kunt bepalen.
Als er, zoals in het voorbeeld, twee spanningsperioden bij een omwenteling horen, zal het toerental de helft van de wisselspanningsfrekwentie zijn.



Een stroboscooplamp.

GEBRUIK STROBOSCOOPLAMP

Er zijn diverse knipperlampen (stroboscopen) in de handel. Ze bestaan gewoonlijk uit een met gas (bijv. neon of xenon) gevulde buis, die aan en uit flitst met een frekwentie die je zelf kunt regelen. Met deze lampen kun je heel goed de draaisnelheid van een motor of generator bepalen. Voor de duidelijkheid is het handig een witte stip op het uiteinde van de as te schilderen. Als bij stroboscopisch licht de stip stil lijkt te staan, weet je zeker dat de as bij iedere flits in dezelfde stand staat. Je weet echter niet hoeveel omwentelingen hij tussen twee flitsen maakt. Daarom moet je de frekwentie van de stroboscooplamp verhogen, tot je *voor het laatst* een stilstaand *enkel* beeld krijgt. Als je de frekwentie dan nog eens verdubbelt, moet je een dubbel beeld krijgen (zie ook de tekening hieronder).

Stilstaande beelden bij meerdere stroboscoopfrekwenties. Het astoerental is 54 Hz.

3.3 MOTORVARIATIES

In deze paragraaf vind je een beschrijving van de aanpak van de proeven aan motoren. In de paragrafen 3.4, 3.5 en 3.6 staan de onderzoeksopdrachten per motortype. Het gaat daarbij steeds om het bepalen van de *motorkarakteristieken*: een drietal diagrammen van het verband tussen *toerental en stroomsterkte*, *toerental en koppel* en *toerental en rendement*.

voorbereiding

- Bestudeer het gedeelte over de bouw en het principe van de motor.
- Ga na voor welke spanning de motor ontworpen is, of probeer bij welke spanning de motor redelijk draait, ook als hij vermogen moet leveren.
- Onderzoek, door bestuderen en proberen, welke van de meetmethoden uit de vorige paragraaf bruikbaar is voor de beschikbare motor(en).

testen van de motor

- Houd de spanning steeds gelijk aan de hiervoor gevonden waarde.
- Varieer de belasting, ofwel het koppel dat de motor moet leveren.
- Meet telkens alle gegevens die nodig zijn om het opgenomen vermogen en het nuttig geleverde vermogen te bepalen.

uitwerking

Bepaal bij elke meting:

- het opgenomen vermogen;
- het geleverde koppel;
- het geleverd vermogen;
- het rendement.

Verwerk de resultaten in drie diagrammen (de motorkarakteristieken):

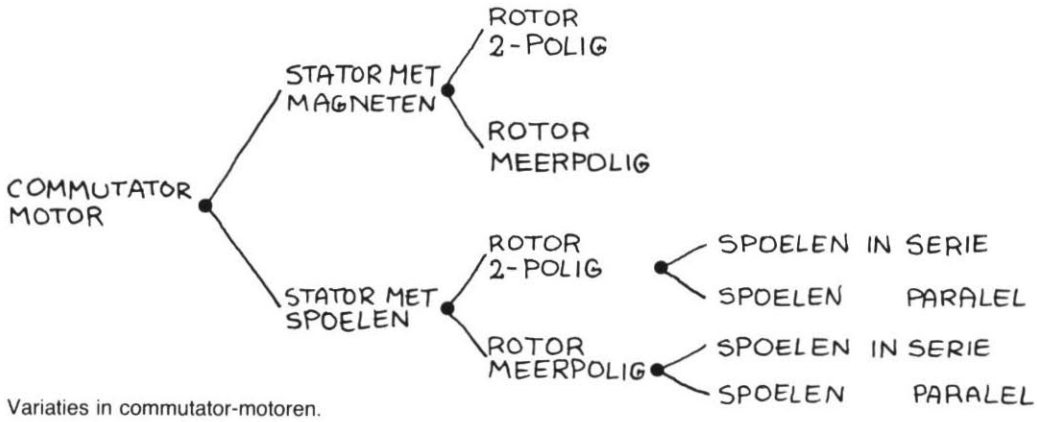
- toerental-stroomsterkte-diagram;
- toerental-koppel-diagram;
- toerental-rendement-diagram.

conclusies voor de gebruiker

- Ga na wat de meest kwetsbare punten zijn in de construktie van de motor.
- Ga na onder welke omstandigheden de motor kapot dreigt te gaan (te grote warmteontwikkeling of te snel draaien of ...).

3.4 COMMUTATOR-MOTOREN

Het principe van al deze motoren komt overeen met de zelfgebouwde motor. Toch zijn ook hier een aantal viariaties mogelijk, weergegeven in onderstaand schema.

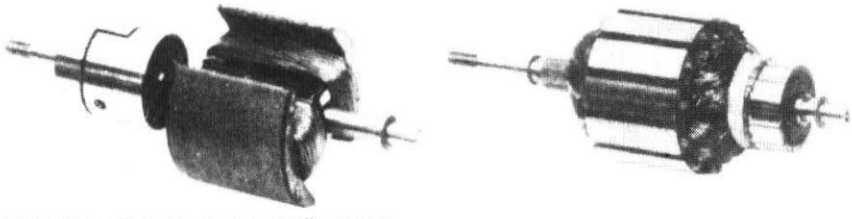


Variaties in commutator-motoren.

In proeven gaat het erom van deze variaties de karakteristieken te vinden en deze te vergelijken. Het is noodzakelijk je steeds af te vragen of je wel eerlijk vergelijkt.
Het is onbetaalbaar fabrieksnieuwe motoren van elk type te kopen, allen in dezelfde vermogensklasse en van overeenkomstige kwaliteit. In het algemeen zal er worden gewerkt met dump-motoren, soms zelf gerepareerd, soms omgebouwd voor lage voltages vanwege de veiligheid. Sommige motoren vormen een geheel met een tandwielkast die het toerental verlaagt, maar ook energie'verlies' veroorzaakt.
Soms krijg je demonstratiemodellen; deze zijn méér gemaakt om goed te bekijken en de werking te begrijpen, dan om efficiënt te werken.

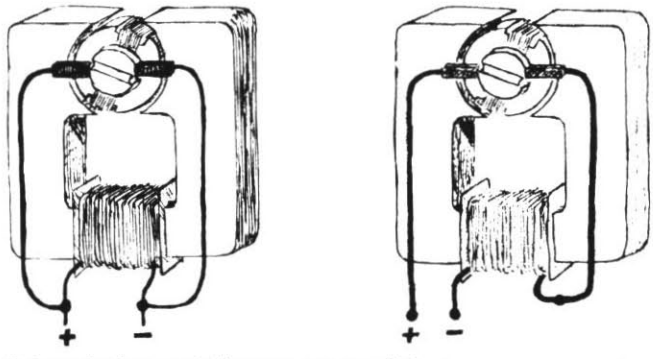
1. TWEEPOLIGE EN MEERPOLIGE ROTOR

In de figuur hieronder zie je een *tweepolige* en een *meerpolige rotor*. Bedenk eerst welke verschillen in sterkte en rendement je bij deze twee types verwacht. Een aanwijzing daartoe kun je vinden in paragraaf 2.3 vraag 5 en paragraaf 2.6 vraag 1.
Bepaal vervolgens van de beschikbare motoren de karakteristieken, zoals in paragraaf 3.3 aangegeven.
Kloppen de resultaten met de verwachte verschillen? Was het mogelijk de motoren eerlijk te vergelijken?



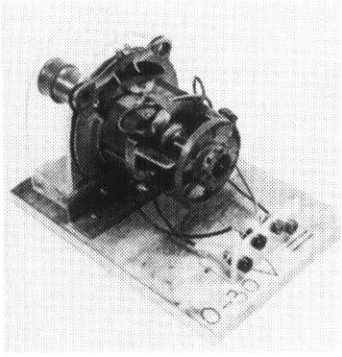
Een tweepolige en een meerpolige rotor.

2. SERIE- EN PARALLELMOTOR



Schematische voorstelling van een parallelmotor en van een seriemotor.

In deze motoren bestaat zowel de *rotor* als de *stator* uit *elektromagneten*. De spoelen van rotor en stator kunnen *in serie* zijn geschakeld, of *parallel*. In de fi-



guur hiernaast zie je een omschakelbaar type, oorspronkelijk een seriemotor voor een stofzuiger.
De draden van de statorspoelen en die van de collector zijn naar vier stekerbussen geleid. Je kunt dus zelf uitmaken of je de rotor in serie of parallel met de stator schakelt.

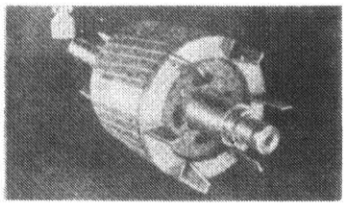
Probeer van tevoren te voorspellen op welke manier de benodigde spanning het grootst is. Doe hetzelfde voor de benodigde stroomsterkte.
Voer vervolgens de proeven uit volgens de aanwijzingen in paragraaf 3.3.

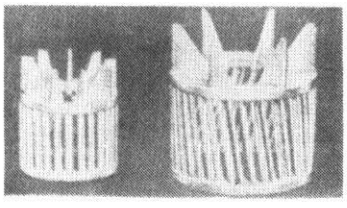
3. PERMANENTE OF ELEKTROMAGNEET ALS STATOR

Als stator kan in een elektromotor een permanente of een elektromagneet gebruikt worden. Zoek van beide soorten een exemplaar.
Naast het bepalen van de karakteristieken volgens de aanwijzingen in paragraaf 3.3, leent deze vergelijking zich voor een extra onderzoekje.

Je kunt een motor voeden met gelijkstroom (uit een batterij, accu of voedingskast) of met wisselstroom (netspanning of voedingskast). Heeft de aard van de spanningsbron effekt op de werking van de motor? Misschien kun je al tevoren tot een voorspelling komen.

3.5 INDUCTIE-MOTOREN



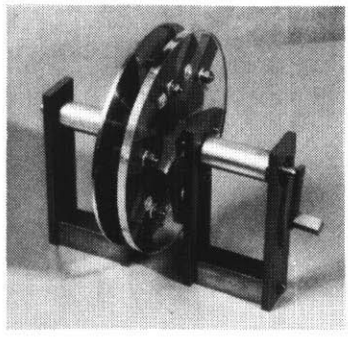


Een schijfanker en twee kooiankers uit inductiemotoren.

Inductiemotoren bevatten géén commutator. Dat betekent dat er geen stroom van buiten af naar de rotor wordt geleid. De uitvoering van het anker (de rotor) kan nog wel verschillen. In de figuur hiernaast zie je een schijfanker en twee kooiankers. De stator bestaat uit spoelen, maar ook daar zijn variaties mogelijk. Eerst zullen we proberen een idee te krijgen van de werking van dit type motoren.

1. MODELPROEF

Een stel magneten wordt rondgedraaid tegenover een geleidende metalen plaat,



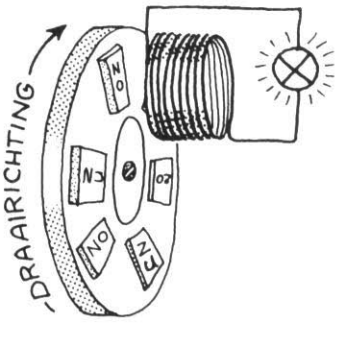
die zelf ook erg licht kan draaien.
De geleidende plaat is niet magnetisch (geen ijzer).
Of je nu 2, 4 of 6 magneten ronddraait, maakt in principe niet uit. Wél is belangrijk dat bij rondgang afwisselend noord- en zuidpolen passeren.

- Doe maar.

Wat gebeurt er?
Wie draait harder?

- Wat gebeurt er als je, door wrijving, de geleidende plaat iets moeilijker draaibaar maakt?

2. GEDACHTENPROEF

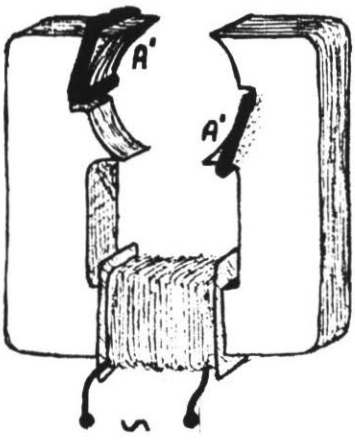


- Je zorgt ervoor dat het magnetisch veld ronddraait. Op een punt van de nog stilstaande schijf verandert de magnetische veldsterkte voortdurend.

Wat zou er gebeuren als je die schijf verving door enkele spoelen, elk verbonden met een lampje?

- Stel je nu voor dat je de lampjes weghaalt, en de draadeinden van elke spoel onderling verbindt. De spoelen (elk werkt als stroombron) worden dan kortgesloten. Wat gebeurt er nu tijdens het draaien? Wat kun je zeggen van de stroomsterkte bij kortsluiting?
- De wet van Lenz: de geïnduceerde stroom heeft een zodanige richting dat ...

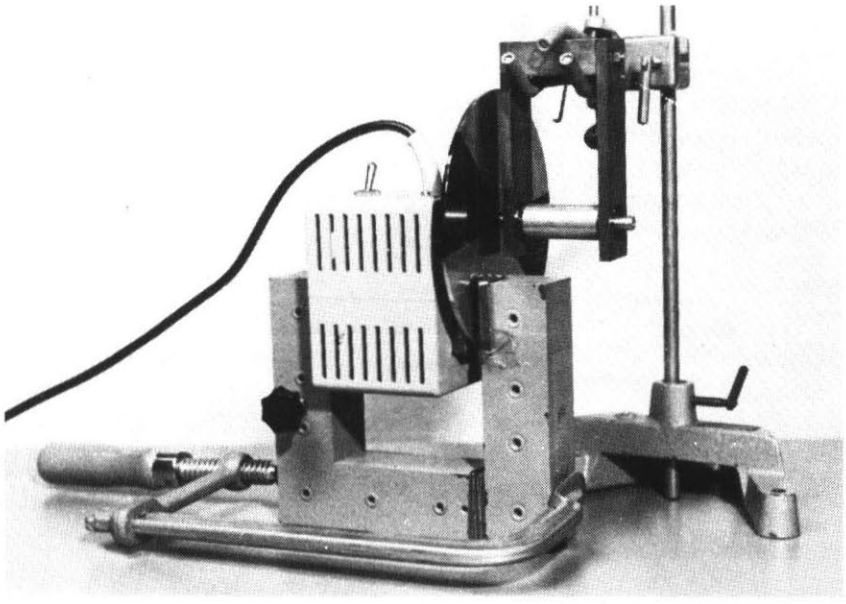
In welke richting zouden er krachten op de draaiende magneten worden uitgeoefend?
Aktie = reaktie. Ofwel: als er op de magneten een kracht linksom werkt, zal er tegelijkertijd op de spoelen een kracht rechtsom werken.
Welke beweging zouden de kortgesloten spoelen uit gaan voeren als ze de kans kregen?
Tot slot: wat is een schijf anders dan een serie kortgesloten spoelen die per ongeluk aan elkaar vastgebakken zijn?



Een inductiemotor met kortsluitringen.

Nu is het natuurlijk onpraktisch om met de hand een draaiend magnetisch veld op te wekken om daarmee een plaat in beweging te zetten.
Gelukkig kan het ook anders. Door vernuftige schakelingen en trucs kun je ook met *stilstaande* elektromagneten een *draaiend* magnetisch veld krijgen. Een oplossing die daarvoor veel gebruikt wordt is de kortsluitring. Men maakt een stator met twee polen, die aangesloten worden op een wisselspanning (zie de figuur hiernaast). Als de ene pool een zuidpool is, is de andere een noordpool. Men zaagt nu beide polen in, en legt dikke koperen windingen om de helft van elke pool. Door inductiestromen in deze windingen duurt het langer voordat de veldsterkte in het gedeelte A^1 op volle sterkte is. De inductiestromen zijn natuurlijk steeds zó gericht dat ze verandering tegengaan. De veldsterkte in het omwonden gedeelte zal daardoor langzamer toenemen, maar óók langzamer afnemen. Eerst wordt dus de onomwonden helft noord (of zuid) en daarna de omwonden helft van de pool: het magnetisch veld lijkt te draaien.
Hoe vaak lijkt het magnetisch veld rond te gaan in 1 s? Is de draairichting van de rotor willekeurig?

3. MODELPROEF



Model van een motor met kortsluitringen.

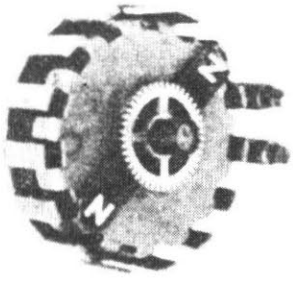
De aluminium plaat in de foto hiernaast loopt tussen de U-kern en het sluitstuk van een opbouwtransformator door. Met een aantal losse ijzeren plaatjes is hiervoor ruimte gemaakt. Aan weerszijden van de plaat is een koperen rechthoekige kortsluitring op de polen geklemd.
Stuur een wisselstroom door de transformatorspoel. Gaat je motormodel draaien?
Klopt de draairichting met jouw verwachting?

4. DE ECHTE INDUCTIEMOTOR

Bekijk de beschikbare motor goed, om te ontdekken hoe het draaiende magnetisch veld wordt gemaakt. Misschien kun je voorspellen in welke richting het anker zou moeten gaan draaien.

Probeer uit welke meetmethoden het meest geschikt zijn, en bepaal de motorkarakteristieken volgens de aanwijzingen in paragraaf 3.3.

3.6 SYNCHROONMOTOR



Synchroonmotor.

Voor sommige doeleinden heeft men motoren nodig die een nauwkeurig konstante snelheid moeten hebben. Men gebruikt dan de zogenaamde *synchroonmotoren*, gevoed met wisselstroom uit het net. De frekwentie van deze wisselstroom wordt zeer nauwkeurig konstant op 50 Hz gehouden (gemiddeld over een langere tijd).
Een kenmerk van dit type motor is dat de rotor een vaste noord- en zuidpool heeft: een staafmagneet bijv. Om de rotor in beweging te brengen, zou je met een andere magneet cirkels kunnen beschrijven. Leuk, maar onpraktisch. Dat ronddraaien is echter na te bootsen met elektromagneten, aangesloten op wisselstroom.
Regelmatig verdeeld over de cirkelomtrek vind je afwisselend noord- en zuidpolen. Steeds na 0,01 s zullen deze polen van type veranderen. Het lijkt dan alsof elke pool

een plaatsje is opgeschoven, linksom óf rechtsom. Als je de rotor nu maar een flinke zet geeft, kan hij dat verschuiven linksom of rechtsom bijbenen. Afhankelijk van het aantal statorpolen wordt het toerental van de motor 50 Hz, 25 Hz of 16⅔ Hz.
In de praktijk bestaan verschillende trucs (waarop we hier niet ingaan) om de draairichting wél vast te leggen: een terugdraaiende klok is niet zo zinvol.

1.
Als er geen echte klokmotor voorhanden is, kan een fietsdynamo als zodanig gebruikt worden. Ook daarin bestaat de rotor uit een permanente magneet.
- Probeer welke meetmethoden het meest geschikt zijn en bepaal de karakteristieken van de synchroonmotor.
- Kun je de draaisnelheid verklaren met behulp van een blik in het inwendige?
- Sommige klokken zullen, nadat de stroom is uitgevallen, even achteruit gaan lopen. Doet deze synchroonmotor dat ook?
Kun je dat verklaren?

3.7 GENERATORVARIATIES

In deze paragraaf vind je een beschrijving van de aanpak van de proeven aan generatoren. In de paragrafen 3.8 en 3.9 staan de onderzoeksopdrachten per generatortype. Het gaat daarbij steeds om het bepalen van de *generatorkarakteristieken*: een drietal diagrammen van het verband tussen *stroomsterkte en koppel* (of: toerental en stroomsterkte), *stroomsterkte en rendement* (of: toerental en rendement) en *stroomsterkte en elektrisch vermogen* (of: toerental en elektrisch vermogen).

voorbereiding
- Bestudeer het gedeelte over de bouw en het principe van de generator.
- Ga na voor welke spanning de generator ontworpen is en bij welk toerental deze spanning wordt overschreden.
- Ga na wat de maximum stroomsterkte is, die de generator mag leveren.
- Onderzoek, door bestuderen en proberen, welke van de meetmethoden uit paragraaf 3.2 bruikbaar zijn voor de beschikbare generatoren.

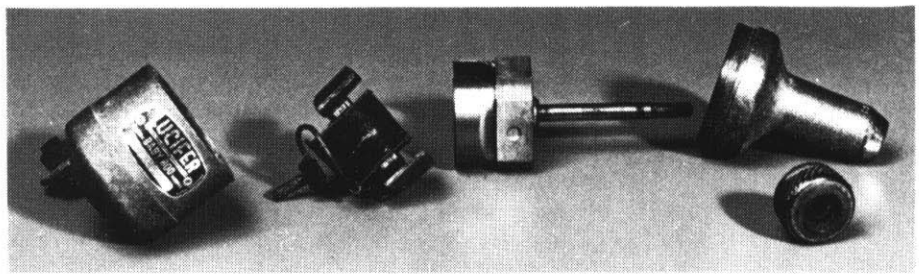
testen van de generator
- Houd het toerental (of het aandrijfkoppel) gelijk aan de hiervoor gevonden waarde.
- Varieer de weerstand van de aangesloten stroomkring zonder de maximum stroomsterkte te overschrijden.
- Meet telkens alle gegevens die nodig zijn om het opgenomen vermogen en het nuttig geleverde vermogen te bepalen.

uitwerking
Bepaal bij elke meting:
- het opgenomen vermogen;
- het benodigd koppel (het bereikte toerental);
- het geleverd vermogen;
- het rendement.

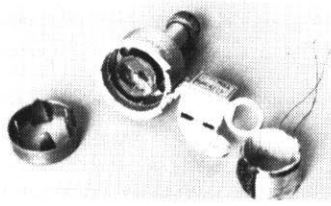
Verwerk de resultaten in drie diagrammen (de generatorkarakteristieken):
- stroomsterkte-koppel-diagram (of: toerental-stroomsterkte-diagram);
- stroomsterkte-rendement-diagram (of: toerental-rendement-diagram);
- stroomsterkte-elektrisch vermogen-diagram (of: toerental-elektrisch vermogen-diagram).

conclusies voor de gebruiker
- Ga na wat de meest kwetsbare punten zijn in de konstruktie van de generator.
- Ga na onder welke omstandigheden schade aan de generator dreigt.
- Ga na bij welke belasting (welke weerstand) het rendement van de generator maximaal is.

3.8 FIETSDYNAMO'S



De eenvoudige fietsdynamo.

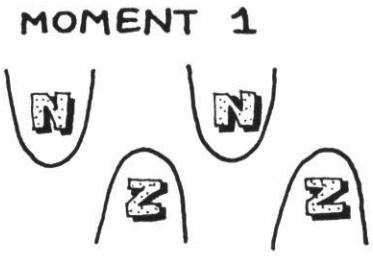


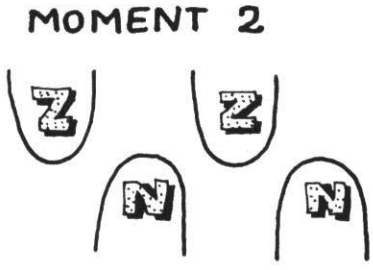
Een moderne fietsdynamo.

De zelfgebouwde generator leek het meest op de fietsdynamo waarvan je hierboven nog eens een foto ziet.
Een moderner, veel voorkomend type zie je in de tweede foto. Regelmatig over de omtrek van de cilindrische magneet verdeeld, vind je een gelijk aantal noord- en zuidpolen. Deze polen draaien langs de weekijzeren tongen die van weerszijden in de spoel steken (vier van de bovenkant en vier van de onderkant). Door influentie worden de tongen afwisselend noord en zuid.

1. WERKING MODERN TYPE FIETSDYNAMO

Er zullen steeds veldlijnen lopen van de boventongen naar de ondertongen, of omgekeerd. De schetsen hiernaast tonen vier opvolgende tongen, met erin geschreven de magnetische oriëntatie op twee opvolgende momenten.
Wat is de veldlijnrichting op moment 1 en moment 2?
Welk effekt hebben deze veldlijnen op de spoel?
Hoe vaak verandert de veldrichting door de spoel per omwenteling?

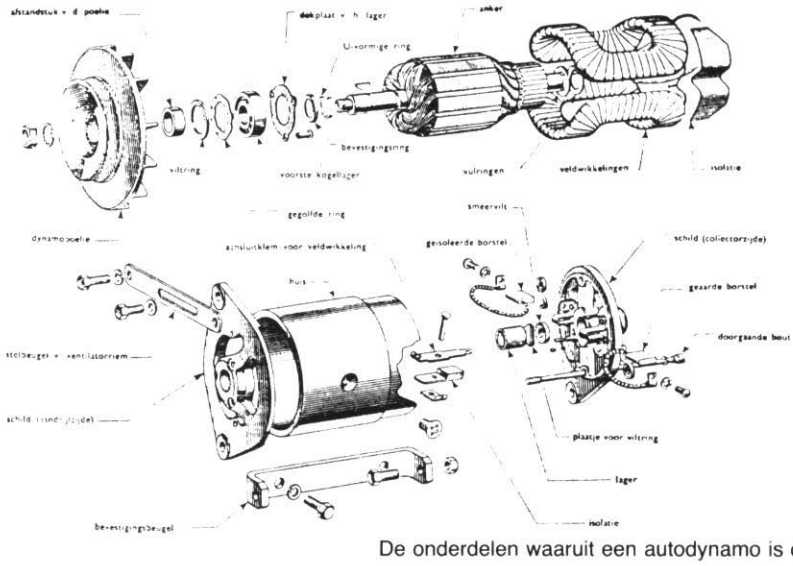




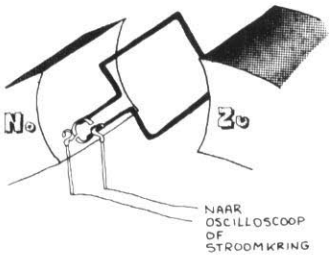
2. VERGELIJKEND ONDERZOEK FIETSDYNAMO'S

Om te weten wat voor dynamo's je hebt, kun je er een aantal demonteren. Het moderne type wordt dan voor altijd onbruikbaar. Je kunt ook met een oscilloscoop onderzoeken hoeveel spanningspieken de dynamo per omwenteling levert. Daaruit volgt met welk type de dynamo het best te vergelijken is.
Onderzoek de karakteristieken van beide dynamo's met de meest geschikte methoden, volgens de aanwijzingen in paragraaf 3.7.

3.9 DRAAISPOELGENERATOREN

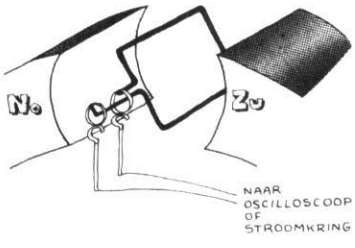


De onderdelen waaruit een autodynamo is opgebouwd.



Gelijkstroomdynamo, waarvan de stroom wordt afgevoerd via twee halve ringen;

Zoals je ziet is de opbouw vergelijkbaar met de commutatormotor (zie bijv. blz. 19). De stator bestaat in dit geval uit twee spoelen waardoor een stroom wordt gestuurd. De statorspoelen veroorzaken het magnetisch veld waarbinnen de draaispoelen (het *anker*) bewegen.
In plaats van statorspoelen kunnen er statormagneten worden gebruikt. In plaats van een *meerpolig* anker met commutator kan het anker ook *tweepolig* zijn. In dat laatste geval kan de commutator vervangen zijn door twee *sleepringen*, waardoor de stroom naar de buitenwereld vloeit.
De figuur hiernaast toont zowel de tweepolige versie met commutator, als de versie met twee sleepringen.



Wisselstroomdynamo waarbij de afvoer via twee afzonderlijke sleepringen is geregeld.

1. VERGELIJKING DRAAISPOELGENERATOREN

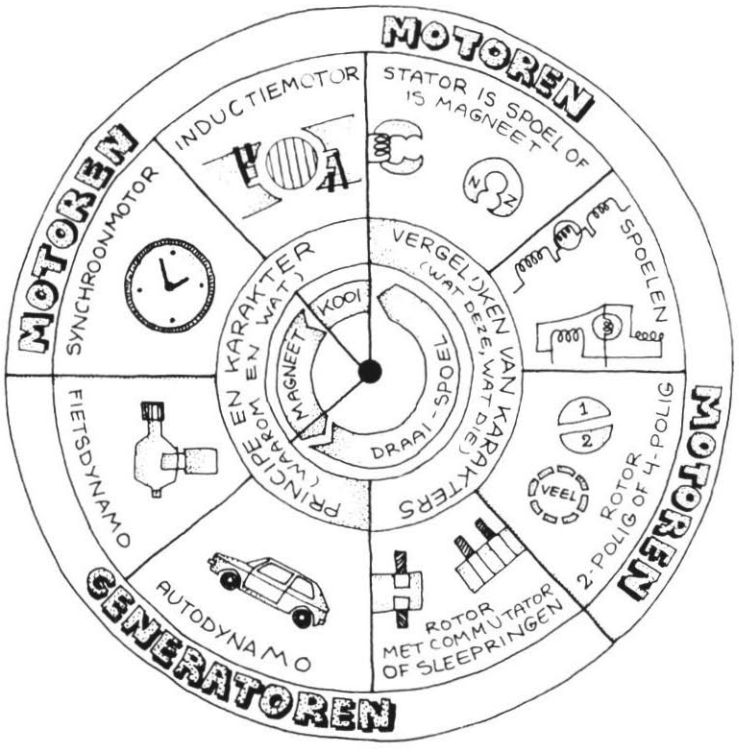
• Ga na welke soorten je ter beschikking hebt.
Onderzoek met behulp van een oscilloscoop van elk type de aard van de geleverde spanning. Uit het oscilloscoopbeeld is mogelijk ook een voorspelling af te leiden wat betreft het type met het hoogste vermogen en rendement.
• Bepaal vervolgens met de meest geschikte methoden de karakteristieken van een tweepolige en een meerpolige generator, volgens de aanwijzingen in paragraaf 3.7.

2. AUTODYNAMO MET REGELBAAR VELD

In autodynamo's worden de statorspoelen van buitenaf gevoed. Om elektrisch vermogen te produceren, is in deze dynamo's niet alleen arbeid nodig op de rotoras, maar moet ook elektrisch vermogen aan de statorspoelen worden geleverd. Dit biedt de mogelijkheid om de stroom door de statorspoelen, en daarmee de magnetische veldsterkte, aan te passen of te regelen. Van deze mogelijkheid wordt niet alleen in auto's gebruik gemaakt, maar ook in windgeneratoren.
• Probeer bij een auto-specialist of via literatuur te weten te komen hoe de variabele statorstroom wordt gebruikt in de auto.
• Onderzoek de karakteristiek van een autodynamo voor tenminste twee waarden van de veldstroom door de statorspoelen, volgens de aanwijzingen in paragraaf 3.7.

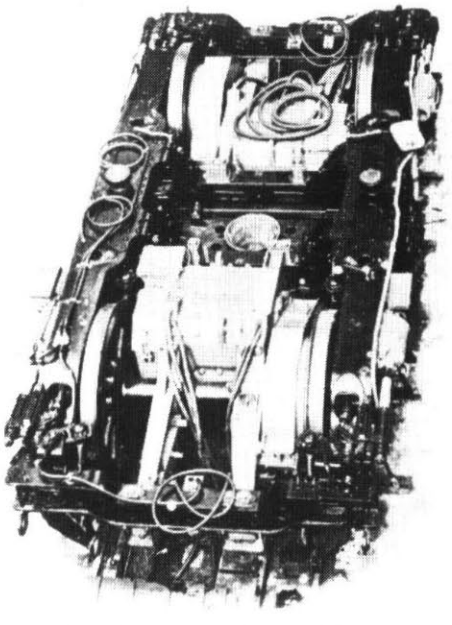
3.10 OVERZICHT KRIJGEN

1.
Maak voor elke onderzochte motor en generator een smalle poster, waarop onder elkaar voorkomen:
– het type;
– de drie diagrammen (niet te klein tekenen);
– conclusies voor gebruikers.
Hang deze posters naast elkaar in een zinvolle volgorde.
Elke groep kan karakteristieken en conclusies van de onderzochte machine kort toelichten, bijv. door in te gaan op het principe van de machine of op ondervonden praktische problemen bij de uitvoering van het onderzoek.



2.
Probeer uit de gemeten karakteristieken te bepalen:
– welke verbanden voor alle motoren van toepassing zijn;
– welke verbanden voor alle generatoren van toepassing zijn.
Maak vervolgens een overzicht van de types uit de figuur hiernaast. Geef in dat overzicht bij elk type aan, wat de belangrijkste kenmerken zijn waarin dat type zich van de andere onderscheidt.

3.
Ga na welke machine geschikt is voor de volgende toepassing en waarom:
– grammofoon;
– aandrijving van een trein;
– draaibank;
– wasmachine (bedenk dat de trommel heen en weer moet; hoe regel je dat?);
– cirkelzaag;
– kleine windgenerator;
– generator in een elektriciteitscentrale;
– racefietsdynamo.
In sommige gevallen voldoet géén van de onderzochte machines. Probeer dan aan te geven in welke opzichten de voor die toepassing geschikte machine anders moet zijn.



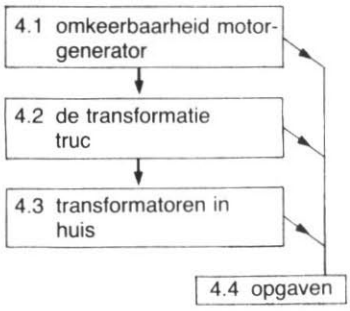
Het onderstel van een trein met elektromotor.

Draaibank.

hoofdstuk 4

VAN METEN TOT BEGRIJPEN

De opzet van hoofdstuk 4: 'van meten tot begrijpen'.



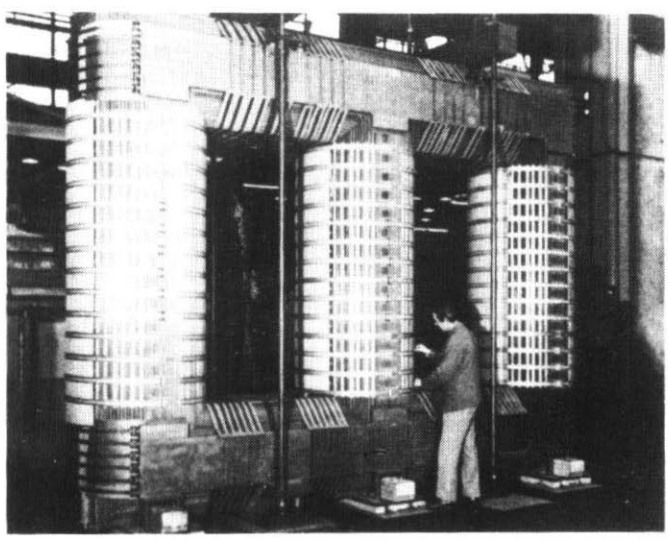
inhoud

		blz
4.1	omkeerbaarheid motor-generator	47
4.2	de transformatie-truc	51
4.3	transformatoren in huis	54
4.4	opgaven	56

van meten tot begrijpen

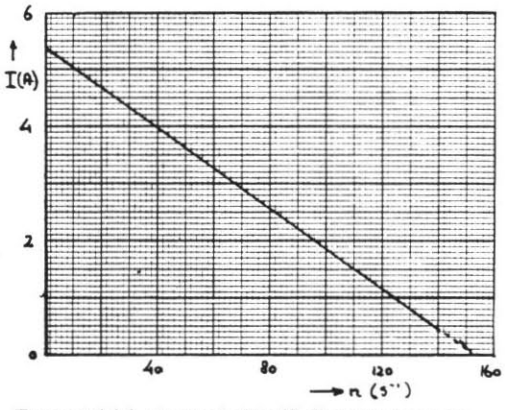
We proberen enkele algemene conclusies en verklaringen af te leiden uit de gemeten motor- en generatorkarakteristieken.
Enkele begrippen die je in dit thema bent tegengekomen, inductie en rendement, passen we toe op de transformator. We bestuderen ook waar transformatoren in huis worden toegepast, en waarom.
Het geheel wordt afgesloten met een serie opgaven.

Wie zijn toekomst in het hoger technisch of (voorbereidend) wetenschappelijk onderwijs zoekt, krijgt de gelegenheid zich te oefenen in het omgaan met lastige begrippen en formules. Voor hen zijn een aantal teksten in kader toegevoegd.



4.1 OMKEERBAARHEID MOTOR-GENERATOR

In de proeven uit hoofdstuk 3 komt een merkwaardig resultaat naar voren. Als het toerental van een motor nul is, is de stroom juist het grootst. De motor gebruikt dus een maximum aan energie als hij niets presteert!

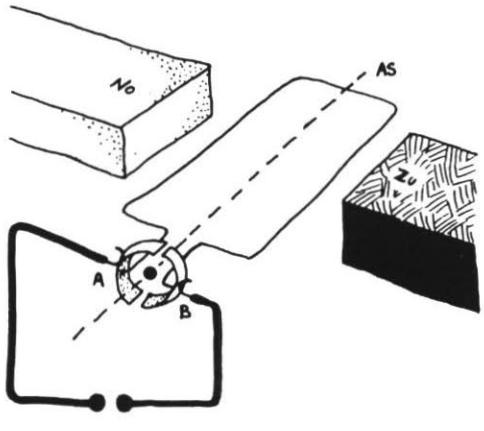


Toerental (n)-stroomsterkte (I)-diagram van een motor.

1.
Hiernaast zie je een toerenkromme van een commerciële motor.
Hoe groot is het rendement van een motor, die zo zwaar belast is dat hij stilstaat?
Bij welke toerental wordt alle toegevoerde elektrische energie in warmte omgezet? (Twee antwoorden!)

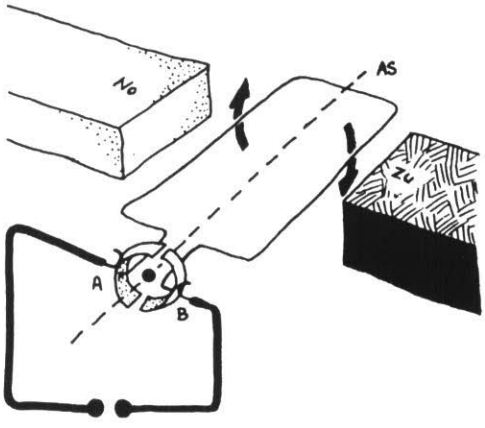
generator-effekt bij een motor
Een motor gedraagt zich totaal anders dan een gewone weerstand, die op een spanningsbron wordt aangesloten. De stroom door de motor hangt ook af van de belasting. Dit effekt treedt zowel op bij gelijkstroom- als bij wisselstroommotoren. De toerenkromme in het diagram bij opgave 1 wordt begrijpelijker als we de theorie van de motor en de generator combineren. Een motor en generator verschillen immers niet principieel van opbouw, zeker niet de motoren en generatoren met draaispoel en commutator. Vaak kunnen deze motoren zelfs als generator worden gebruikt, en omgekeerd. De as moet daartoe met de hand of op een andere manier worden gedraaid. Er ontstaat dan een spanning op de aansluitklemmen (= klemspanning V_k).
Het ligt voor de hand te veronderstellen dat de motor ook een spanning afgeeft als hij 'als motor' draait. In dat geval wordt de spoel aangedreven door de lorentzkrachten. Tijdens het draaien verandert echter de magnetische flux binnen de spoel. In de windingen van de draaispoel ontstaat daardoor een inductiespanning V_{ind}. Dat kun je het *generator-effekt bij een motor* noemen.

2. DRAAIRICHTING MOTOR



- In welke richting loopt de stroom door de spoel?
- Ga na in welke richting de 'motor' van de figuur hiernaast zal draaien als je er een spanning op zet. Neem aan dat B positief is ten opzichte van A.

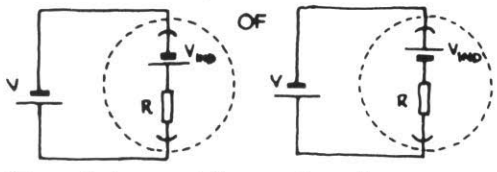
3. VAN MOTOR TOT GENERATOR



- Je laat de 'motor' uit opgave 2 als generator werken. De draairichting is dezelfde als bij opgave 2. In welke richting loopt nú de stroom door de spoel?
- De spoel kan stroom door een lampje sturen. Is B nu positief of negatief ten opzichte van A?
- Alternatief: met behulp van een gelijkstroommotor kun je de antwoorden op de voorgaande vragen ook vinden door middel van proeven, als je de draairichting bij gebruik als motor en als generator maar gelijk houdt.

4.

De wet van Lenz leert ons dat de inductiestroom zodanig is gericht, dat de oorzaak van zijn ontstaan wordt tegengewerkt.



Schematische voorstelling van de werking van een motor (R = weerstand van de motorspoelen; V_{ind} = inductiespanning door het draaien van de motor).

- Wat veroorzaakt de draaiing van de elektromotor? Hoe kun je die oorzaak in de stroomkring zélf tegenwerken?
- Welke richting moet de inductiespanning in de draaispoel hebben, om het draaien tegen te gaan?
- Welke van de twee hiernaast afgebeelde schema's is dus juist?

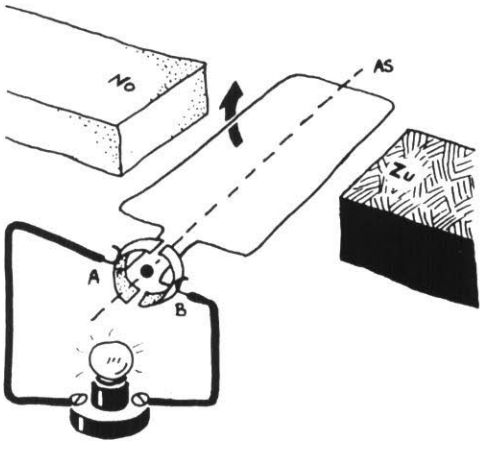
In de draaiende spoel van een motor ontstaat een inductiespanning V_{ind} die de voedingsspanning V_k tegenwerkt. De totale spanning die over de weerstand R van de spoelen staat is $V_k - V_{ind}$.
Toepassing van de wet van Ohm voor de weerstand R levert:

$$I = \frac{V_k - V_{ind}}{R}$$

De inductiespanning wordt groter als de motor sneller gaat draaien. De stroom I wordt dan kleiner.

motoreffekt bij een generator

Door de theorie van generator en motor te combineren, kunnen we ook een aantal verschijnselen bij generatoren verklaren. Kijk nog eens naar proef 3 uit paragraaf 2.4. De generator ging langzamer lopen als hij meer stroom moest leveren.



5.

- Ga na in welke richting stroom door de spoel gaat lopen als de spoel in de aangegeven richting draait.
Met behulp van die stroomrichting kun je de richting van de lorentzkrachten op de spoel bepalen. Welk effekt hebben die lorentzkrachten op het draaien van de spoel?
- Wat gebeurt er met die lorentzkrachten als de stroom door de spoel groter wordt? Welk effekt heeft dat?

Dat kun je het *motoreffekt bij een generator* noemen.
Een grotere stroom, veroorzaakt door een kleinere weerstand van de stroomkring, levert een groter tegenwerkend koppel. En dus langzamer draaien (als het aandrijvend koppel niet verandert).

OMKEERBAARHEID IN FORMULEVORM
We gaan uit van de stroomformule voor een motor:

$$I = \frac{V_k - V_{ind}}{R}$$

We schrijven dit als een spanningsformule:

$$V_k = V_{ind} + I \cdot R$$

Deze formule is om te werken tot de *energievergelijking* van een motor. Ga na dat geldt:

$$V_k \cdot I \cdot t = V_{ind} \cdot I \cdot t + I^2 \cdot R \cdot t$$

Hierin is $V_k \cdot I \cdot t$ de door de motor opgenomen *elektrische energie*. $I^2 \cdot R \cdot t$ is het gedeelte dat in de spoelen in *warmte* wordt omgezet. De rest van de energie ($V_{ind} \cdot I \cdot t$) wordt gebruikt om *arbeid* te verrichten. Een gedeelte hiervan is nodig om de wrijving in de motor te overwinnen.

6.
Als we de wrijving in de motor verwaarlozen, is uit de energievergelijking een eenvoudige uitdrukking voor het rendement η van een elektromotor af te leiden.

Probeer dat, en verklaar met die uitdrukking waarom het rendement van een stilstaande motor nul is.

Terug naar de energie-vergelijking:

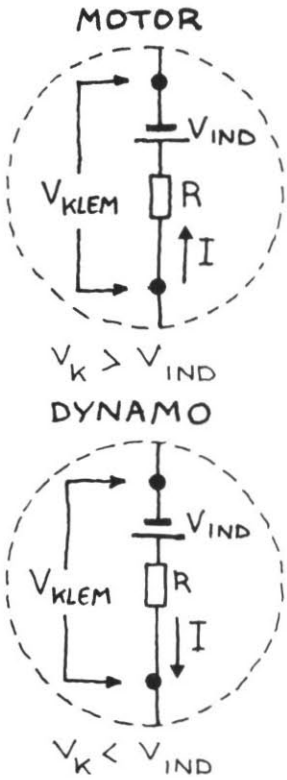
$V_k \cdot I \cdot t$	=	$V_{ind} \cdot I \cdot t$	+	$I^2 \cdot R \cdot t$
toegevoerde energie aan de motor	=	vrijgekomen arbeid	+	warmte

Als de motor steeds sneller gaat draaien, neemt V_{ind} toe tot bijna de waarde van de klemspanning. Echter: de stroomsterkte wordt zó klein, dat ook de arbeid die de motor verricht steeds minder wordt. Bij maximum toerental wordt alle arbeid gebruikt om de inwendige wrijving te overwinnen.
Als we nu van buitenaf de motoras nóg sneller aan het draaien brengen, neemt V_{ind} nog verder toe. Al snel wordt $V_{ind} > V_k$. De stroomrichting keert om, en de grootte van de stroomsterkte wordt gegeven door:

$$I = \frac{V_{ind} - V_k}{R}.$$

Daaruit volgt:

$$V_{ind} - I \cdot R = V_k$$



Schematische voorstelling van een motor die aangedreven wordt tot boven zijn eigen maximum toerental.

We komen tot een nieuwe energievergelijking:

$$V_k \cdot I \cdot t = V_{ind} \cdot I \cdot t - I^2 \cdot R \cdot t$$

geleverde elektrische energie door de generator	=	opgenomen mechanische energie	–	warmte

De oorspronkelijke spanningsbron kun je loskoppelen, en vervangen door een stroomkring met een bepaalde uitwendige weerstand R_u. (R was de *inwendige* spoelweerstand.)
De generatorstroom wordt dan gegeven door:

$$I = \frac{V_k}{R_u}$$

7.

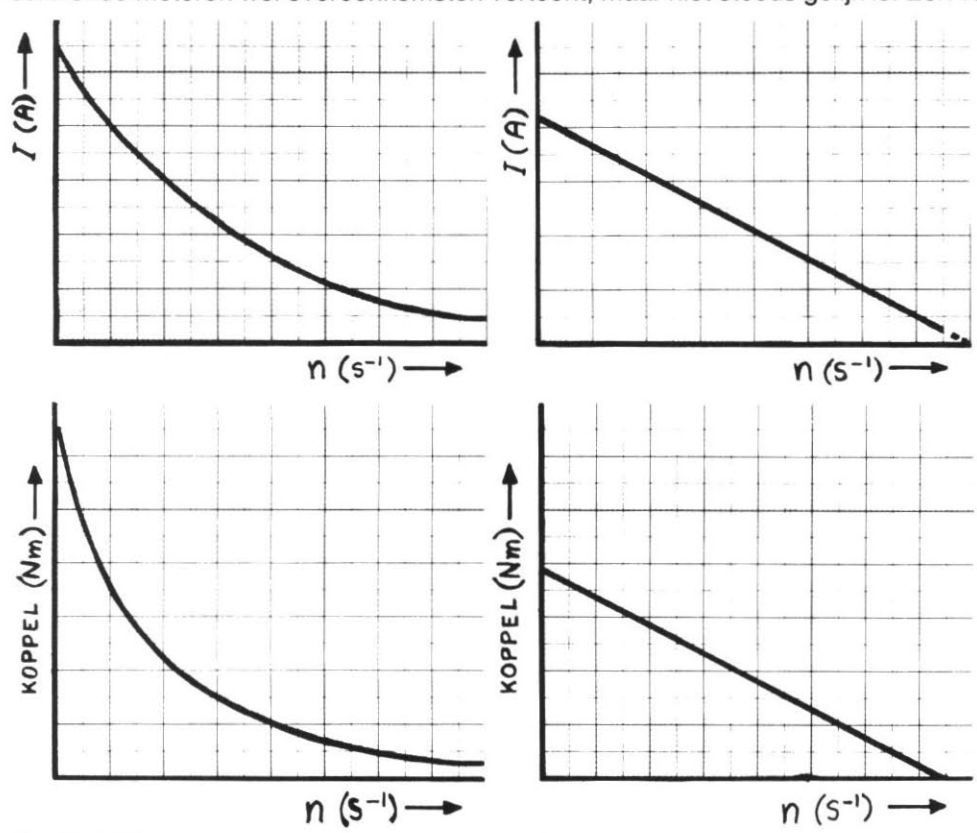
- Schrijf de energievergelijking van een generator op.
- Probeer uit het bovenstaande een formule voor het rendement van een generator af te leiden. Verwaarloos de wrijving.

Toon aan dat het generatorrendement precies het omgekeerde van het motorrendement is.

- Probeer het generatorrendement ook uit te drukken in R en R_u. Wat levert deze laatste uitdrukking op voor het rendement van een kortgesloten generator ($R_u = 0$)?

serie- en parallelmotor

In hoofdstuk 3 is gebleken dat het verband tussen toerental en stroomsterkte voor verschillende motoren wel overeenkomsten vertoont, maar niet steeds gelijk is. Een van de



Karakteristieken van een seriemotor en van een parallelmotor.

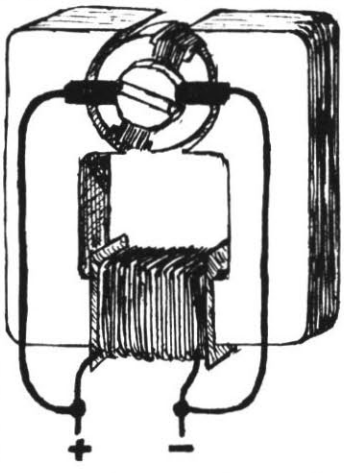
oorzaken ligt in de meer gecompliceerde verschijnselen in wisselstroommotoren. Maar ook gelijkstroommotoren verschillen, zoals blijkt uit de op blz. 50 staande diagrammen van een *seriemotor* (rotor- en statorspoelen in serie) en een *parallelmotor* (rotor- en statorspoelen parallel).

8.

- Vergelijk de op blz. 50 gegeven diagrammen met de zelf gemeten karakteristieken van seriemotor en parallelmotor.
- Eén van deze motoren kan op hol slaan, en zodoende schade oplopen. Welke motor is dat?

Met welk gebruiksvoorschrift kun je dit op hol slaan voorkomen?

- Eén van deze motoren wordt gebruikt in elektrische treinen. Leid uit de diagrammen af welke daarvoor het meest geschikt lijkt.



Schematische voorstelling van een parallelmotor.

VERKLARING VAN HET VERSCHIL TUSSEN SERIE- EN PARALLELMOTOR

In een *parallelmotor* is de totale stroom I_t de som van de stromen in de parallelle takken:

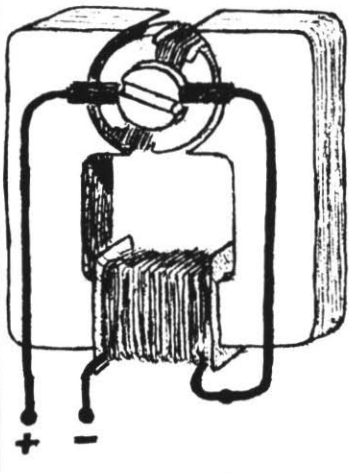
$I_t = I_{stator} + I_{rotor}$.

Aangezien alleen in de rotor een inductiespanning optreedt, zal voor I_t gelden:

$$I_t = \frac{V_k}{R_{st}} + \frac{V_k - V_{ind}}{R_{rot}}$$

Bij toenemend toerental zal, vanwege toenemende V_{ind}, de rotorstroom afnemen. De statorstroom en dus ook de sterkte van het magnetisch veld B_{st} blijft vrijwel konstant. Het maximum koppel ($I_{rot} \cdot B_{st} \cdot A \cdot N$) is bij stilstand dus zo groot mogelijk. Bij toenemend toerental zal V_{ind} geleidelijk toenemen; I_{rot} neemt dan geleidelijk af en daarmee ook het koppel.

Bij een zeker toerental komt V_{ind} zo dichtbij V_k dat I_{rot} en koppel tot nul naderen. Er is zodoende een maximum toerental in onbelaste toestand.



Schematische voorstelling van een seriemotor.

In een *seriemotor* is de stroomsterkte overal gelijk:

$$I_{st} = I_{rot} = \frac{V_k - V_{ind}}{R_{st} + R_{rot}}$$

Bij toenemend toerental neemt zowel de rotorstroom als de statorstroom af. Daardoor zal ook de magnetische veldsterkte B_{st} steeds kleiner worden.

Het maximum koppel ($I_{rot} \cdot B_{st} \cdot A \cdot N$) is bij stilstand erg groot. Bij toenemend toerental worden zowel I_{rot} als B_{st} kleiner, dus neemt het koppel in eerste instantie sterk af.

Anderzijds hangt V_{ind} af van het toerental èn van de veldsterkte B_{st}. Terwijl het toerental toeneemt, zal de veldsterkte afnemen. Daardoor neemt V_{ind} steeds minder toe, en wordt nooit gelijk aan de klemspanning V_k, hoe snel de motor ook draait.

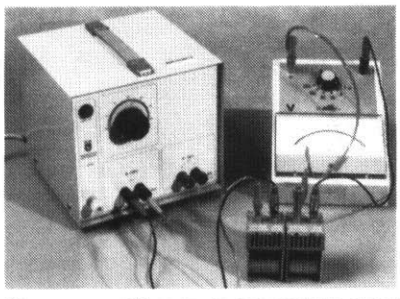
9.

Ga na wat er gebeurt met een onbelaste seriemotor. Komt dit overeen met de karakteristieken op blz. 50?

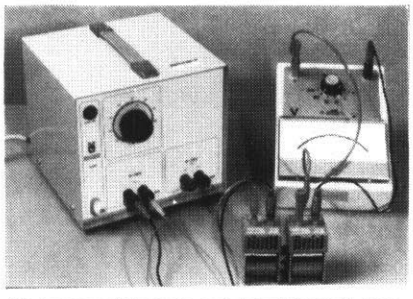
4.2 DE TRANSFORMATIE-TRUC

In paragraaf 2.4, aktiviteit 2, hebben we een proef uitgevoerd met twee spoelen. De eerste (of primaire) spoel werd gevoed met gelijkstroom. Alleen als die primaire stroom voortdurend aan en uit werd geschakeld, ontstonden er korte inductiespanningspulsen

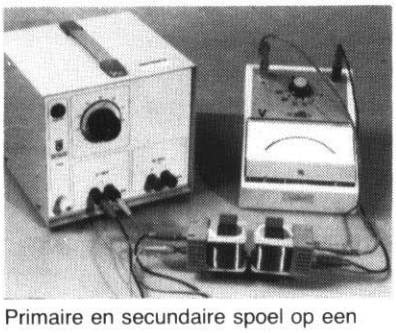
in de tweede (of secundaire) spoel. Ondertussen hebben we echter gezien dat diverse generatoren geen gelijkstroom maar wisselstroom opwekken. Dan is het in- en uitschakelen niet meer nodig. De mogelijkheden met wisselstroom ga je in de volgende proeven onderzoeken.



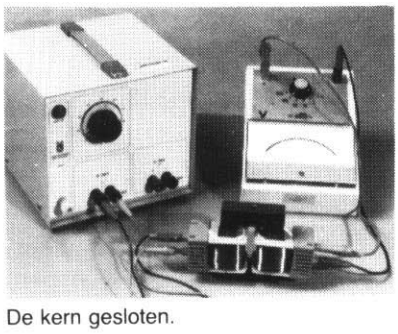
Stroomopwekking in de secundaire spoel met behulp van wisselspanning.



Na toevoeginig van een weekijzeren kern.



Primaire en secundaire spoel op een U-vormige kern.



De kern gesloten.

1. TRANSFORMEREN

Een spanningsbron levert wisselspanning aan de primaire spoel. Je gaat meten welke wisselspanning aan de uiteinden van de secundaire spoel aanwezig is.

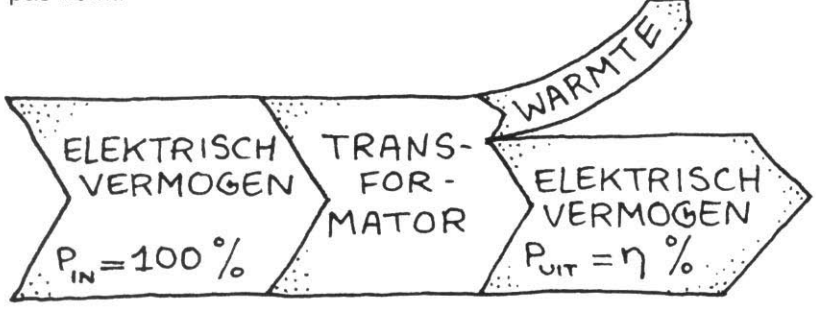
- Neem eerst een gelijk aantal wikkelingen primair en secundair.
- Probeer vervolgens een secundaire spoel met meer wikkelingen.
- Welke conclusie(s) trek je uit deze proef?

2. BETER TRANSFORMEREN

Ter verbetering van de situatie gaan we de spoelen koppelen met een weekijzeren kern, en bouwen langzamerhand een echte transformator op. Gebruik twee gelijke spoelen.

- Voeg een volt- en ampèremeter toe in de primaire stroomkring. Schuif een kern in de spoelen. Noteer de gemeten waarden van I_p, V_p en V_s.
- Herhaal de meting terwijl de spoelen op een U-vormig juk zijn geschoven.
- Sluit vervolgens het U-vormig juk, zodat je een gesloten rechthoekig juk krijgt. Noteer nogmaals I_p, V_p en V_s.
- Wat kun je zeggen over de beste manier om een inductiespanning in de secundaire spoel op te wekken?

Je hebt nu een *transformator* gemaakt: een apparaat dat een wisselspanning omvormt (transformeert) tot een wisselspanning met een hogere (of lagere) waarde van de spanning. Nadeel van deze opbouwtrafo is zijn matige rendement. Daar staat tegenover dat de spoelen verwisselbaar zijn, wat voor onderzoek naar de eigenschappen goed van pas komt.



Energie-stroomdiagram van een transformator.

Een transformator neemt elektrisch vermogen op via de primaire spoel. Tijdens het transformeren komt warmte vrij, en ontstaat soms geluid. Dat is niet nuttig en kan tot schade leiden.

De transformator geeft elektrisch vermogen af via de secundaire spoel. In een goede transformator is het verschil tussen inkomend en uitgaand elektrisch vermogen zo klein mogelijk. Het rendement wordt gegeven door de volgende formule:

$$\eta = \frac{P_{uit}}{P_{in}} = \frac{V_s \cdot I_s}{V_p \cdot I_p}$$

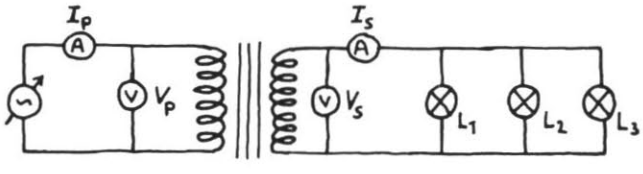
Dit rendement moet zo dicht mogelijk bij 1 (of 100%) liggen.
In de voorgaande proeven 1 en 2 werd er aan de secundaire kant geen stroom afgenomen. De trafo was onbelast. De stroom die dan toch in de primaire spoel loopt, heet de *nulstroom*. De ingaande energie wordt volledig omgezet in warmte en het rendement is nul.

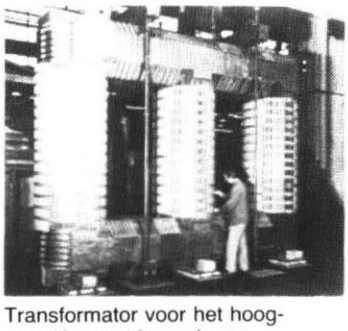
Verder onderzoek aan de transformator splitsen we in drie onderdelen, namelijk:
– hoe hangt de spanningsverhouding primair en secundair af van de aantallen wikkelingen van de spoelen;
– hoe hangt het rendement af van de belasting van de trafo, dus van het secundair geleverde vermogen;
– hoe hangt de nulstroom af van de spanning op de primaire spoel.

3. SPANNINGSVERHOUDING ONBELASTE TRAFO

• Gebruik dezelfde opstelling als aan het eind van aktiviteit 2, dus met gesloten kern. Varieer het aantal wikkelingen van de secundaire spoel.
Noteer bij elke meting de aantallen wikkelingen en de spanningen aan de primaire en secundaire kant van de trafo.
• Probeer een verband te vinden tussen de verhouding van de aantallen wikkelingen (N_p : N_s) en de bijbehorende spanningsverhouding (V_p : V_s).

4. RENDEMENT VAN BELASTE TRAFO

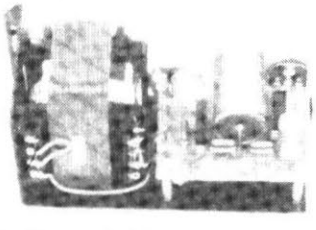




Transformator voor het hoogspanningsnet in aanbouw.

• Maak een proefopstelling aan de hand van de hierboven getekende schakeling. In die schakeling kun je door losdraaien het aantal ingeschakelde lampjes variëren. Zorg dat de secundaire spanning niet hoger wordt dan de maximale spanning waarop de lampjes mogen branden.
• Meet alle gegevens die nodig zijn om het opgenomen en het geleverde elektrische vermogen te berekenen. Noteer de resultaten in een overzichtelijke tabel. Bepaal voor elke meting het rendement van de transformator.
• Deze proef kan ook met een commerciële transformator worden uitgevoerd. Dan krijg je een indruk van de werkelijk haalbare rendementen. Veelal zetten deze transformatoren 220 V netspanning om in laagspanning. Netspanning is levensgevaarlijk. Werk dus aan de primaire kant met de maximum voedingskastspanning, en zoek passende lampjes voor de secundaire kant.

5. NULSTROOM



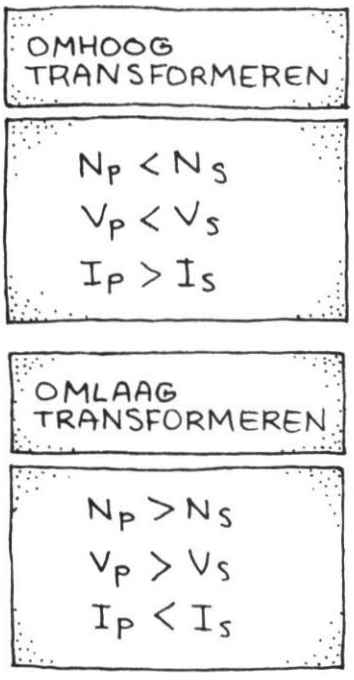
Voedingseenheid voor een geluidsversterker.

• Bepaal de weerstand van de primaire spoel met gelijkstroom. Deze weerstand R hangt af van de draaddikte en draadlengte, en zal niet veranderen als we wisselstroom gaan gebruiken. Of wel?
• Bepaal met behulp van wisselspanning het verband tussen I en V bij de primaire spoel. Doe dit bij gesloten kern en onbelaste, of zelfs afwezige, secundaire spoel.

transformator-theorie
In hoofdstuk 2 zagen we dat een spoel een magnetische flux Φ veroorzaakt. De grootte van die flux is afhankelijk van de stroom door de spoel en van het aantal wikkelingen. Binnen een primaire spoel, aangesloten op wisselspanning met een frekwentie van 50

Hz, verandert de flux honderd keer per seconde van richting. Met behulp van een gesloten weekijzeren kern wordt deze veranderlijke flux zo goed mogelijk door de secundaire spoel geleid. Daarin ontstaat dan een (wisselende) inductiespanning.

In de experimenten heb je het volgende gezien.
– Voor een onbelaste transformator geldt dat de spanningsverhouding (de verhouding tussen secundaire en primaire spanning) gelijk is aan de verhouding tussen de aantallen wikkelingen van de secundaire en primaire spoel.
In formulevorm:



Overzicht van de mogelijkheden van een transformator.

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

– Het secundaire vermogen P_s ($= V_s \cdot I_s$) is iets kleiner dan het primair opgenomen vermogen P_p ($= V_p \cdot I_p$). Het rendement η ($= P_s/P_p$) kan in de praktijk tot 98 à 99% worden opgeschroefd.
In globale berekeningen wordt van een ideale transformator uitgegaan, waarvoor geldt: $P_s = P_p$.
Dit ideaal wordt nooit werkelijkheid.
– De nulstroom is veel minder dan je op grond van de weerstand R van de spoeldraad zou verwachten. Een verklaring hiervoor is, dat de veranderende flux binnen de spoel een tegenwerkende inductiespanning in de spoel zélf opwekt. Dit verschijnsel noemt men *zelfinductie*. De wet van Ohm kan voor een spoel worden omgewerkt tot:

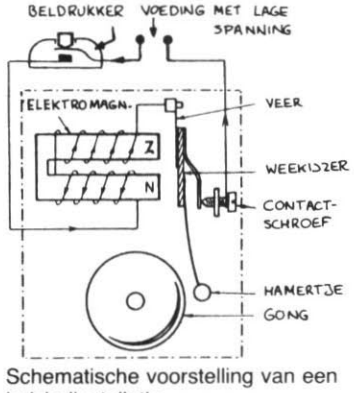
$$I = \frac{V_k - V_{zelfind.}}{R}$$

– Bij toenemende secundaire stroom neemt ook de primaire stroom toe. Volgens de wet van Lenz is de geïnduceerde secundaire stroom zodanig gericht dat de fluxverandering wordt tegengewerkt. Dit heeft een soort terugkoppeling tot gevolg: ook binnen de primaire spoel zal de flux minder snel veranderen en zal dus de zelfinductiespanning kleiner zijn. Als de zelfinductie in de primaire spoel afneemt, zal de primaire stroom toenemen.

4.3 TRANSFORMATOREN IN HUIS

Aan de hand van twee voorbeelden bekijken we waar je transformatoren in huis kunt tegenkomen. Deze paragraaf heeft voornamelijk tot doel de doe-het-zelf-mogelijkheden aan elektrische installaties in en rond huis te verruimen. Waarvoor dienen die transformatoren in huis, en hoe kun je hun goede werking kontroleren?

laagspanning

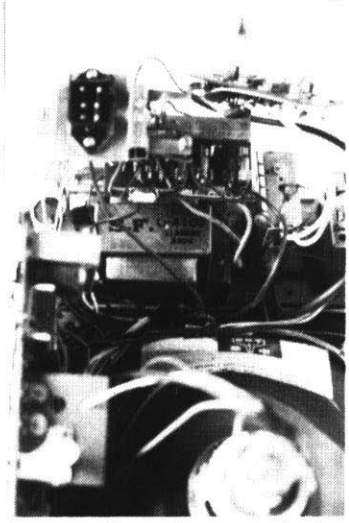


Schematische voorstelling van een huisbelinstallatie.

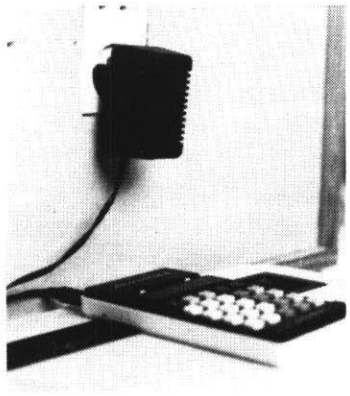
1. DE HUISBEL

- Onderzoek de werking van een eenvoudige elektrische bel. Let vooral op de stroomkring die door middel van de druknop bij de voordeur wordt gesloten, en op de rol van de elektromagneet.
- Bedenk redenen die er toe hebben geleid de huisbel met een lage spanning te voeden.
- Welke eisen kun je stellen aan een goede transformator die de huisbelinstallatie voedt?

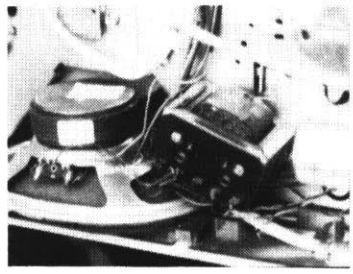
Ook in regelsystemen zoals de cv-thermostaat, waarvan de onderdelen op verschillende plaatsen in een huis zitten, heeft *laagspanning* duidelijk voordelen. Die voordelen zijn:
– verbindingsdraden kunnen dunner zijn en hoeven niet door buizen op of in de muur te lopen;



Laagspanning en hoogspanning in een tv-toestel.



De voeding van een rekenmachine.



De voeding van een bandrecorder.

– onderdelen kunnen eenvoudiger van aard zijn omdat de isolatie aan minder hoge eisen hoeft te voldoen. Een beldrukker in regen en wind zou men heel anders en vooral duurder moeten uitvoeren om de veiligheid van bezoekers te waarborgen.

Een eis is, dat het gewenste vermogen dat doorgegeven moet worden, laag is.

elektronika

Alle elektronische apparatuur (versterkers, tuners, computers enz.) heeft een lage voedingsspanning nodig.
In een cassetterecorder bijvoorbeeld, indien aangesloten op 220 V netspanning, bevindt zich altijd een transformator. Deze transformator wordt gevolgd door een *gelijkrichter*, die de wisselspanning uit de secundaire spoel omzet in gelijkspanning.
Om in geval van kortsluiting het heet worden van de transformator en eventueel brandgevaar te voorkomen, is in de primaire of in de secundaire stroomkring veelal een eenvoudige *zekering* opgenomen. Het dunne draadje in de zekering smelt door als de stroomsterkte boven een bepaalde waarde komt. Indien het apparaat van de juiste zekering is voorzien, gebeurt dit smelten lang vóór er gevaar dreigt.

Zekering.

hoogspanning

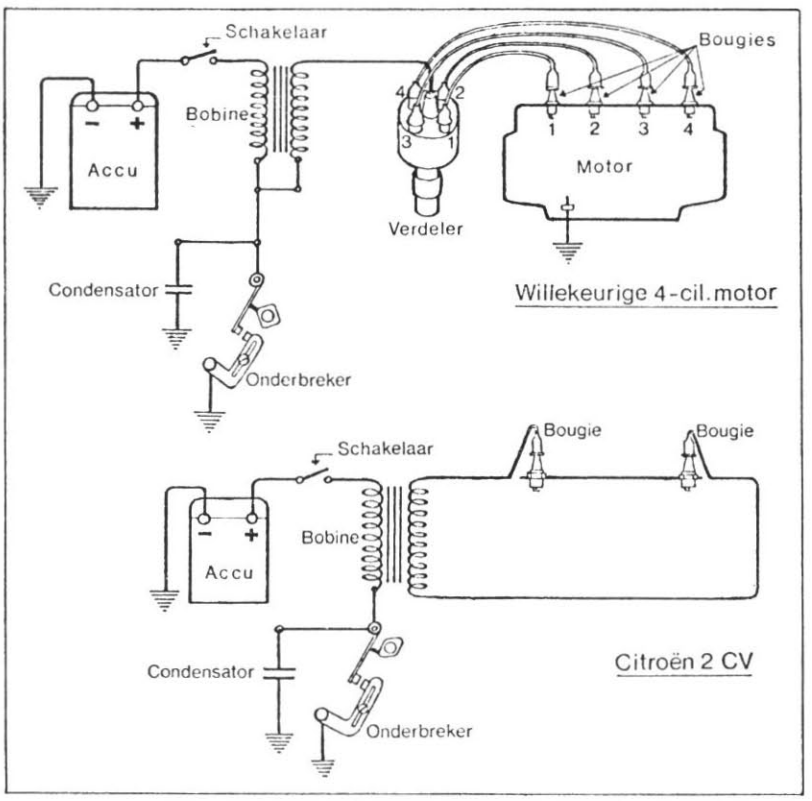
Ook in een tv-toestel bevindt zich een transformator. Deze is echter meervoudig. Hij levert laagspanning voor het afstem- en versterkergedeelte. Maar met een andere secundaire spoel vormt hij *hoogspanning*, welke nodig is om de beeldbuis te laten werken. Niet voor niets wordt de leek afgeraden een tv-toestel te openen!

AFWIJKEND TRANSFORMATOR-GEBRUIK

Bij de huisbel heb je kennis gemaakt met een *onderbreker*. Dat is een combinatie van een veer, elektromagneet en kontaktpunten, die de stroom regelmatig onderbreekt. In 1838 vond Charles Page deze automatische aan-en-uit-schakelaar uit.

Vonkinductiespoel.

Als eerste toepassing werd de onderbreker verwerkt in een inductiespoel: een soort transformator. In de primaire stroomkring, gevoed met een lage gelijkspanning, bevindt zich de onderbreker. In de secundaire spoel, welke veel meer windingen heeft, ontstaat tijdens het in- en uitschakelen een kortdurende, erg hoge spanning (zie ook paragraaf 2.5 aktiviteit 1). Met deze hoogspanning kun je vonken produceren.
Deze ontdekking wordt nu nog gebruikt bij de *ontsteking* van benzinemotoren.



Ontstekingssysteem voor een vier-cilinder automotor en het systeem van een Citroën 2 CV.

Een bougie in een benzinemotor moet een vonk leveren op het moment dat het benzine-lucht-mengsel zo ver mogelijk is samengeperst. Dan volgt een ontploffing, waardoor de motor weer een paar slagen verder kan draaien. De inductiespoel, die in een motor *bobine* wordt genoemd, produceert de hoogspanning voor de bougies. Een *verdeler* zorgt er in het algemeen voor dat de vonken eerlijk over de verschillende bougies worden verdeeld. De onderbreker in de primaire kring mag echter niet op willekeurige momenten openen en sluiten. Het openen en sluiten van de *kontaktpunten* wordt geregeld door een niet-ronde as (verbonden met de draaiende krukas), die regelmatig de kontaktpunten van elkaar duwt.

2. DE VREEMDE EEND

Vergelijk de ontsteking van een normale auto met die van een 2 CV. Welke verschillen zie je?

Welke voor- en nadelen zie je in dit bedenksel van de Citroën-ontwerpers?

4.4 OPGAVEN

1.

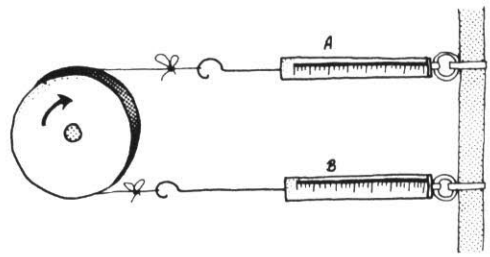
In een experiment is de nieuwe STENSIUS elektromotor gebruikt om een gewichtje op te hijsen. Tijdens het hijsen is de hijstijd over 1 m en de opgenomen stroom en spanning gemeten. De diameter van de poelie is 2,0 cm.

Meetresultaten:

spanning in V	stroom in A	hijstijd in s	massa in kg
6,0	0,020	1,2	0
6,0	0,141	1,4	0,10
6,0	0,242	1,6	0,20
6,0	0,289	1,9	0,30
6,0	0,331	2,4	0,40
6,0	0,358	3,0	0,50
6,0	0,398	4,2	0,60
6,0	0,525	n.v.t.	0,70

- Bepaal het rendement voor de acht metingen.
- Lever ideeën voor een verkoopfolder voor de STENSIUS motor. Bedenk wat voor een koper van belang is.
Vat je ideeën samen in hoogstens vier regels én in een grafiek voor de folder.

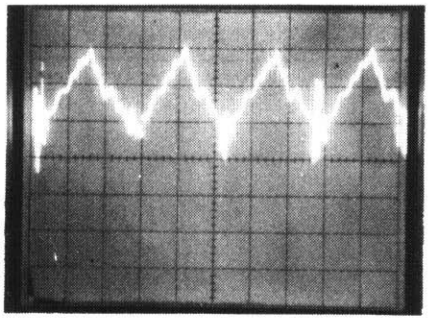
2.
De ARKELMAAT is zo anders van karakter én anders getest, dat we de onderzoekers niet te kort kunnen doen. In de figuur hiernaast zie je de slipkoppelingopstelling.
De motor draait kloksgewijs vanuit de getekende richting gezien. De omtrek van het aandrijfwiel is 0,12 m.

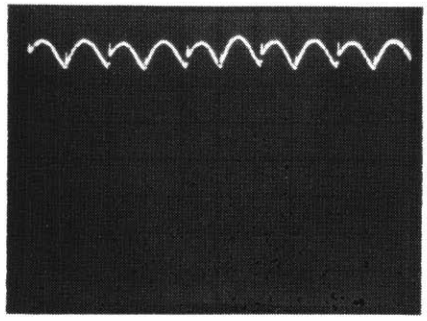


Meetresultaten:

spanning (V)	stroom (A)	toerental (s^{-1})	F_A (N)	F_B (N)
60	0,41	24	0	0
60	0,42	24	0,12	1,9
60	0,44	23	0,21	4,0
60	0,47	23	0,38	5,8
60	0,53	21	0,55	7,7
60	0,76	0	3,95	5,2

- Bepaal het rendement voor de zes metingen.
- De ARKELMAAT lijkt, vergeleken bij de STENSIUS, niet zo goed verkoopbaar. Probeer toch uit deze gegevens nog wat tips en argumenten voor de ARKELMAAT-bouwers te vinden.
Welk type motor lijkt dit te zijn, met welke voordelen?
Vergelijk ook het geleverd koppel van beide motoren.



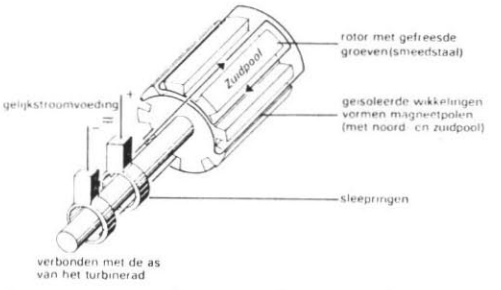


3.
Vergelijking van 2-polige met 12-polige elektromotoren valt op de volgende punten in het voordeel van de laatste uit:
- begint altijd vanzelf te lopen;
- loopt rustiger en gelijkmatiger;
- levert gemiddeld een groter koppel.

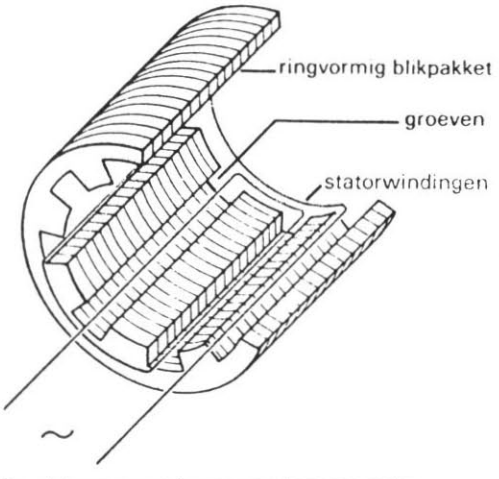
- Probeer vanuit de draaihoek waarover een bepaalde rotorspoel werkzaam

is, deze drie verschillen te verklaren.

- Als je deze motoren als gelijkstroomgenerator gebruikt, leveren ze spanning met een verschillend karakter. Welke van de twee oscilloscoopbeelden op blz. 57 hoort bij de veelpolige motor en waarom?



De rotor van een hoogspanningsgenerator.



De stator van een hoogspanningsgenerator.

4.

In de figuren hiernaast zie je de rotor en de stator van een hoogspanningsgenerator, zoals die in elektriciteitscentrales te vinden is.

Als je goed kijkt kun je eruit afleiden dat de rotor uiteindelijk één noord- en één zuidpool heeft. Tijdens het draaien ontstaan er krachten in de rotor (denk aan swing-mill of andere sneldraaiende kermisattrakties).

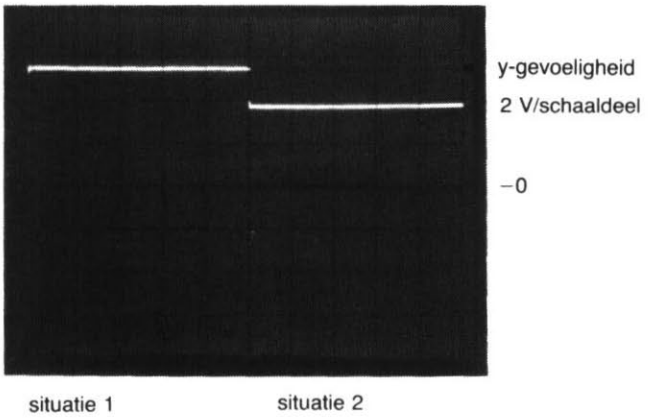
Om deze krachten te beperken, maakt men de diameter van de rotor niet groter dan 1 m.

In de stator wordt een wisselspanning met een frekwentie van 50 Hz opgewekt. Deze generator kan maximaal 200 MW (mega = 10^6) leveren bij een spanning van 20 kV.

- Bereken de geleverde stroomsterkte.
- Met welk toerental moet de rotor draaien?
- Welke faktoren in het ontwerp bepalen de grootte van de opgewekte inductiespanning?
- Geef tenminste twee goede redenen waarom de inductiespoelen in de stator zitten, en dus stilstaan.

5.

In een proefopstelling wordt een fietsdynamo aangedreven door een motortje. De geleverde spanning wordt eerst gelijkgericht en daarna op een oscilloscoop weergegeven.



situatie 1 situatie 2

Eerst (situatie 1) draait de dynamo met 48 omwentelingen per seconde, en levert alleen aan de koplamp (30 Ω) energie.

Na enige tijd wordt de achterlamp (60 Ω) parallel aan de koplamp aangesloten. Het toerental van de dynamo zakt naar 38 omwentelingen per seconde, en ook de spanning daalt (situatie 2).

- Verklaar waarom de groter wordende stroomsterkte in situatie 2 tot een lager toerental leidt.
- Benader uit de figuur en de beschrijving het elektrisch vermogen dat de dynamo in situatie 2 aan voor- en achterlicht levert.
- Rekening houdend met een dynamorendement van 30%, kun je uitrekenen hoeveel extra arbeid de fietser in een minuut moet leveren in situatie 2.

6.

Op een centrifuge staat 220 V/240 W. Meting met een volt- en ampèremeter (door middel van gelijkstroom) wijst een totale weerstand van de motor van 80 Ω aan.

- Bereken de stroomsterkte bij normaal draaiende centrifuge.
- Bereken de in de motor opgewekte inductiespanning tijdens normaal draaien.

7.

Marnix en Jan hebben zelf spoelen gemaakt voor een transformator. De primaire spoel heeft 2000 windingen en de secundaire 160. De heer Ash, hun leraar, kijkt bedenkelijk. 'Jullie hadden eigenlijk niet voor beide spoelen dezelfde draad moeten gebruiken.'

- Leg uit waarom de heer Ash deze opmerking maakt.

Hoe hadden Marnix en Jan deze kritiek kunnen voorkomen?

- Volgens Marnix moet de trafokern van ijzer zijn. Volgens Jan mag het ook best koper of aluminium zijn, als het maar niet massief is. Liever dunne plaatjes of draden met isolatie ertussen. Wie heeft gelijk? Of hebben ze beide een beetje gelijk?
- Een week later meten Marnix en Jan: I_p = 0,02 A; V_p = 220 V; I_s = 0,21 A; V_s = 16 V.

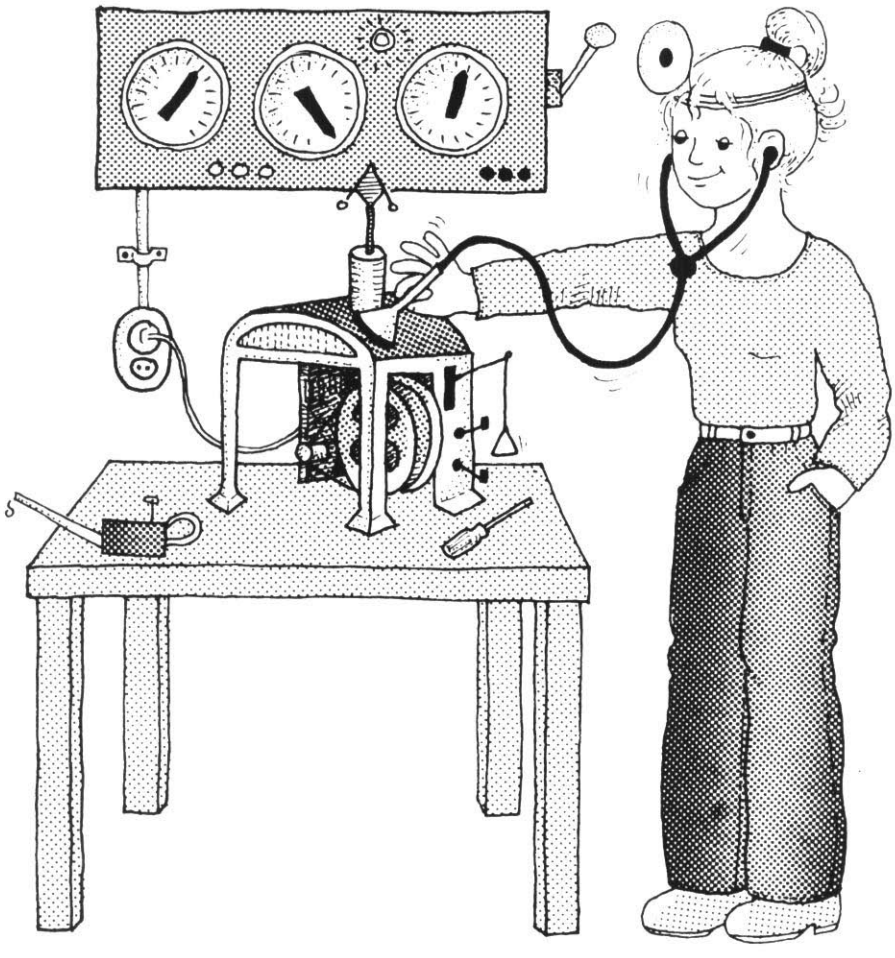
Bepaal het rendement van de zelfbouwtrafo.

hoofdstuk 5

MACHINE –HEEL– KUNDE

inhoud blz

5.1 voorkomen is beter 61
5.2 doe niet meer dan je kunt 63

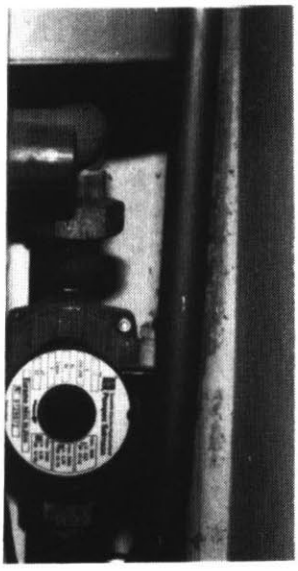


'Een machine is een dood ding, zegt men. Ik ben daar nog niet zo zeker van'.

machine-heel-kunde

In de geneeskunde wordt onderscheid gemaakt tussen preventief en kuratief werken. Hier ook.
Voorkómen is meestal goedkoper. Daar heb je zelf de grootste hand in, en de brokken op ongelegen momenten blijven uit. Hierover vind je in dit hoofdstuk een leestekst en enkele korte opdrachten.
Als het ondanks verstandig gebruik tóch mis gaat, kun je soms nog wel iets zelf doen. Doe dat dan wel veilig: bijv. aan de hand van onze herstelhandleiding.

5.1 VOORKOMEN IS BETER



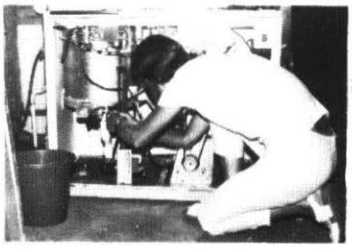
Cv-pomp.

Het is drie januari. Terug van een gezellig oud en nieuw. De vorst is ingevallen, maar gelukkig staat de cv aan. Alleen bedenk ik me dat de radiator in de schuur nog dicht staat. Ik draai de kraan open. Er tinkelt iets door de leidingen, maar het water blijkt te gaan stromen. Gelukkig geen lek te zien.
Een uurtje later is het nog steeds kil in huis. De radiatoren in de huiskamer zijn koud. De thermostaat staat goed. De druk is misschien te laag? Ellende.
Op zolder blijkt de waakvlam te branden, maar verder niets. Keteltemperatuur 15 °C. Druk goed. Wat ... DE POMP STAAT STIL. De buitenkant van de cv-pomp is gloeiend heet.
De service-afdeling van het gasbedrijf is werkelijk formidabel. 's Avonds om half elf rijden ze nog voor, en om kwart over elf is een nieuwe pomp geplaatst.
Het water stroomt. De branders slaan aan.
'Nog een beetje koffie, heren?'
'Aardig aangeboden, maar we hebben er al drie gehad en er staan nog twee adressen op ons lijstje.'

1.
Leid uit het verhaal met je kennis over elektrische machines af wat er kapot is gegaan in de elektromotor.

Welk type motor zou het kunnen zijn, of is elk type gevoelig voor deze kwaal?

motoren
Geen enkel apparaat is bestand tegen een dreun van een olifant. Als we vallen, gooien, natuurgeweld en ander onheil uitsluiten, blijven er vier manieren over waarop schade aan elektromotoren kan ontstaan. Dat zijn:
– zó zwaar belasten dat de motor blokkeert; je kent uit de motorkarakteristieken de gevolgen voor stroomsterkte en warmteontwikkeling in de motor;
– onbelast laten draaien, waarbij de motor op hol slaat;
– te lang aaneen laten werken (soms is een ontwerper er van uit gegaan dat een machine niet langer dan één minuut aan een stuk werkt; ga je toch door dan loopt de temperatuur te hoog op);
– water- of zuurlekkage, waardoor leidingen worden aangetast of kortsluiting in of rond de motor optreedt.



Tijdig repareren voorkomt ongemak.

generatoren
Mogelijke schade-oorzaken:
– té snel laten draaien, waardoor spanning en stroom te veel toenemen;
– té hoog belasten door te weinig weerstand in de aangesloten stroomkring (bijv. door teveel apparaten aan te sluiten of door kortsluiting).

2.
De motor van een 220 V/500 W cirkelzaag heeft een weerstand voor gelijkstroom van 22 Ω. Om de 180 gram koper van de stator- en rotorspoelen één graad in temperatuur te laten stijgen is 75 J nodig.

- Bereken hoeveel de temperatuur van de geblokkeerde motor per minuut stijgt, als je er van uitgaat dat 75% van de ontwikkelde warmte in de spoelen blijft.
- Welke schade denk je in de defekte motor aan te treffen?

3.
- Welk type motor slaat op hol bij onbelast draaien?

- Welke schade brengt op hol slaan aan zo'n motor toe?

4.
- Op een fietsdynamo is aangegeven: 6 V/3 W.
Wat mag de weerstand van de lampjes voor en achter zijn?
(De lampjes zijn parallel geschakeld.)

5. GEBRUIKSAANWIJZINGEN

Vaak worden bij elektrische machines gebruiksaanwijzingen geleverd.

- Als voorbeeld van zo'n gebruiksaanwijzing zie je hieronder een deel van de handleiding bij een keukenmachine met variabele hulpstukken.

Voorzichtig
Dit apparaat is uitsluitend geschikt voor huishoudelijk gebruik. Let er tevens op, dat uw opzetgroentesnijder een apparaat is, dat niet in handen van kinderen hoort.
De maximale draaitijd van één minuut zonder onderbreking is niet van toepassing voor de Multiquick wanneer u het apparaat samen met de opzetgroentesnijder gebruikt.

Schijven ④
Om de schijven gemakkelijk uit elkaar te houden, is in iedere schijf een nummer gegraveerd.

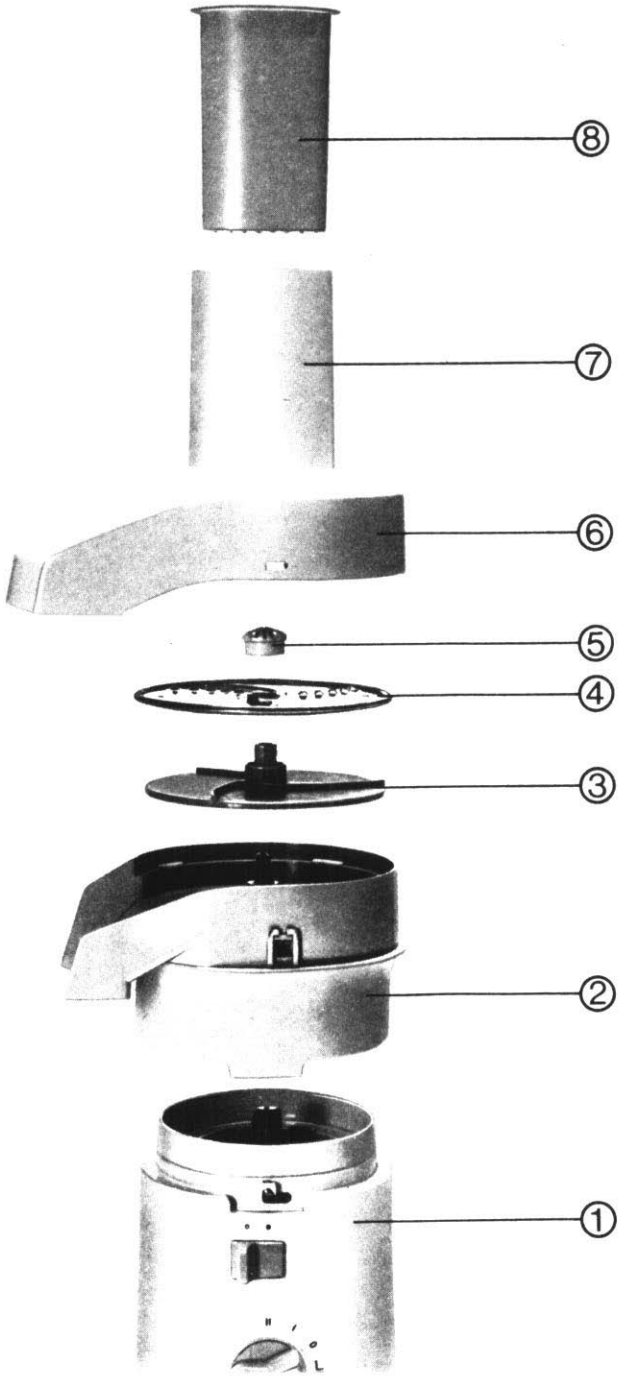
No. 1
Bovenkant: Grove snijplaat
Onderkant: Fijne rasp

No. 2
Onderkant: Fijne snijplaat
Bovenkant: Grove rasp

Werkwijze
Vul de opzetgroentesnijder met de te verwerken ingrediënten alleen als de machine is uitgeschakeld. Bijvullen is wel mogelijk terwijl het apparaat loopt.

Belangrijk: Kom nooit met de vingers in de vulopening ⑦, indien de motor loopt. Gebruik de naduwstop ⑧ om de groenten door de vulkoker na te duwen. Voor de verwerking wordt stand 1 (Multiquick) aangeraden. Apparaat pas openen als de motor volledig tot stilstand is gekomen.

Schoonmaken
Het aandrijfdeel ② en de draagschijf ③ uitsluitend onder de kraan afspoelen. Alle overige delen van de opzetgroentesnijder mogen ook in de afwasmachine.



Ga na wat er staat over:
- onderhoud en schoonmaken;
- gebruiksduur (waarom déze opmerking bij dit hulpstuk);
- de stand van de motorschakelaar.

- Andere preventieve aanwijzingen in handleidingen zijn bijvoorbeeld:
- welke hulpstukken bij welk materiaal (mixers);
- maximum kapaciteit (dikte materiaal bij zaagmachines; gatdiameter bij boormachines).

Ga voor elk van de in deze opgave genoemde aanwijzingen na welk defekt daarmee wordt voorkomen.

diamant
het volstrekte einde voor verwende doe-het-zelvers

Vergelijkingstabel

model	boorkapaciteit mm staal	steen	hout	toerental onbelast o.p.m.	aantal slagen p.m.	opgenomen vermogen Watt
1436H	10	13	25	2 100 2 600		320
1437H	10	13	25	0-2 600		320
1438H	10	16	30	2 100 2 600	29 000 36 000	380
1439H	10	16	30	0-2 600	0-36 000	380
1473H	10	16	30	0-2 600	0-36 000	400
1413H	10	13	30	0-2 600		400
1416H	10	13	30	0- 900 0-2 600		400
1417H	13	16	35	0- 900 0-2 600		420
1471H	13	16	35	0-2 600	0-36 000	420
1432H	10	16	30	0- 900 0-2 600	0-11 000 0-32 000	400
1433H	13	16	35	0- 900 0-2 600	0-11 000 0-32 000	420

6.

Een cv-pomp heeft een schakelaar met vier standen, 0, I, II en III. Stand 0 = motor uit. De cv-pomp moet altijd in stand III worden gestart.

Meetgegevens

stand	*R* bij gelijkspanning	*I* bij 220 V wisselspanning	toerental
I	85 Ω	0,22 A	1600 t.p.m.
II	80 Ω	0,30 A	2000 t.p.m.
III	70 Ω	0,38 A	2600 t.p.m.

Welk gevaar zou worden bezworen met de startaanwijzing?

7. WIE GEBRUIKT DE AANWIJZINGEN?

Gebruiksaanwijzingen worden gemaakt om gelezen en begrepen te worden. Doet men dat ook, en worden belangrijke aanwijzingen onthouden?

- Bestudeer een gebruiksaanwijzing. Beoordeel de leesbaarheid en de duidelijkheid.
- Ondervraag de eigenaar van het bijbehorende apparaat over zijn kennis en toepassing van de aanwijzingen. Beperk je daarbij tot die aanwijzingen die betrekking hebben op de gebruiksveiligheid en levensduur van het apparaat.
- Bedenk een duidelijker gebruiksaanwijzing òf andere methoden die een veiliger gebruik waarborgen.

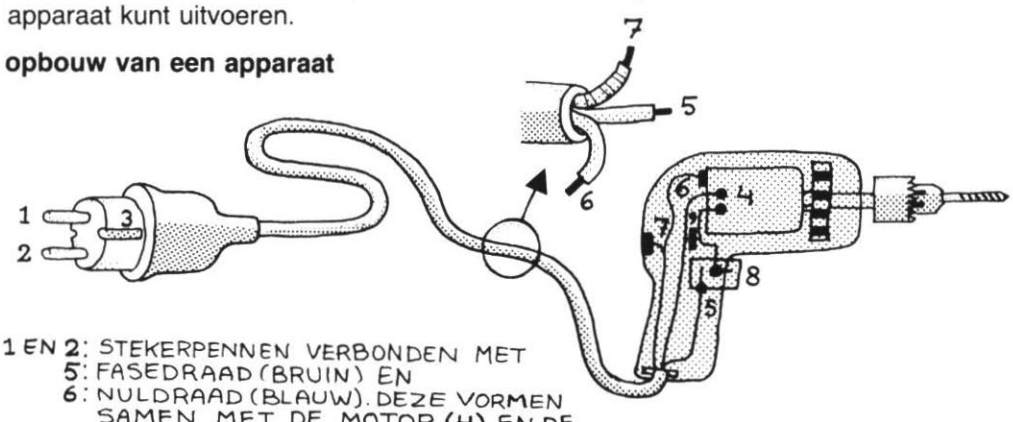
5.2 DOE NIET MEER DAN JE KUNT

Voor alles: WERK VEILIG.
Maak geen apparaat open zolang het nog op het lichtnet aangesloten is. Een spanning van 220 V kan dodelijk zijn.
Draai niet proef met een 'kale' 220 V motor. Door het principe aktie = reaktie gaat de rotor bijvoorbeeld rechtsom en wil het 'huis' tegelijkertijd linksom draaien. Gevolgen: gewiebel-van tafel vallen-grijpreaktie-schok-kreet-klap-vuilnisbak.

herstelhandleiding

De handleiding bestaat uit twee delen. Allereerst vind je een globale beschrijving van een elektrisch apparaat en van soorten elektrische storingen. Het tweede deel op blz. 66 en 67 is een blokschema, aan de hand waarvan je het onderzoek aan een defekt apparaat kunt uitvoeren.

opbouw van een apparaat

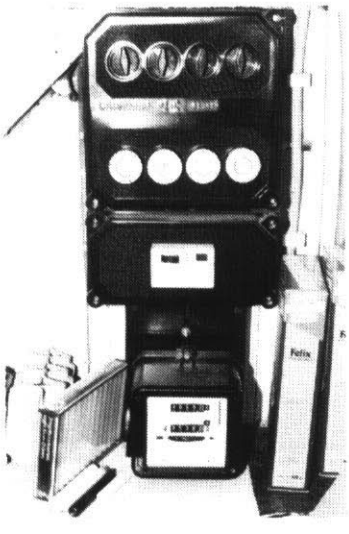


1 EN 2: STEKERPENNEN VERBONDEN MET
5: FASEDRAAD (BRUIN) EN
6: NULDRAAD (BLAUW). DEZE VORMEN SAMEN MET DE MOTOR (4) EN DE AAN-UIT SCHAKELAAR (8) DE STROOMKRING.
3: RANDAARDING IS VIA DE GEEL-GROENE DRAAD (7) VERBONDEN MET HET MACHINEHUIS.
9: ONTSTORINGSCONDENSATOR

De figuur onderaan blz. 63 toont een boormachine. Een steker met *randaarde* is door middel van een drie-aderig snoer verbonden met de machine. Van de drie aders maken er twee (meestal bruin en blauw) deel uit van de eigenlijke stroomkring. Bovendien zijn in die kring de aan-uitschakelaar (8) en de elektromotor (4) opgenomen.
De derde ader (geel met groene strepen) verbindt de randaarde van de wandcontactdoos met het machinehuis en het frame van de elektromotor. De randaarde van de wandcontactdoos is geleidend verbonden met de aarde.

AARDDRAAD
De aarde kan onder alle omstandigheden als elektrisch neutraal worden opgevat. Als er via een aarddraad een geleidende verbinding ontstaat van een geladen lichaam naar de aarde, ontstaat een stroom. De invloed van dit ladingtransport op de lading van 'de aarde' is verwaarloosbaar klein. Een eis is wel dat de aarddraad door loopt tot in de geleidende lagen van de bodem (tot in het grondwater).
De spanning op de aarddraad en de (grote) stroom door de draad blijft aanwezig, totdat één van de veiligheidsvoorzieningen (zekeringen) in het apparaat of in de huisinstallatie de stroomkring onderbreekt. Zonder aarddraad zal er eerst een aardlek (bijv. via het menselijk lichaam) moeten optreden, voordat de stroomkring wordt onderbroken (door de aardlekschakelaar).
Een aarddraad kan voorkomen dat je als gebruiker onder spanning komt te staan.

mogelijke defekten
Een stroomkring kan op twee manieren defekt raken. Het isolerende omhulsel van de draden raakt beschadigd door slijtage of door verhitting, zodat er een ongewenste elektrische verbinding ontstaat. Een andere mogelijkheid is dat de stroomkring wordt onderbroken door lostrillen van verbindingen, doorsnijden of doorsmelten van draden en dergelijke.
De volgende onderverdeling is te maken.
– *Kortsluiting* van stroomdraad naar stroomdraad. Hierdoor ontstaat een parallel-verbinding met zeer lage weerstand. De stroomsterkte in de verbindingsdraden kan hierdoor heel groot worden. De draden worden erg heet, waardoor brandgevaar ontstaat.
– *Kortsluiting* van stroomdraad naar aarddraad, eventueel via het apparaat. Hierdoor ontstaat een verbinding met zeer lage weerstand, waarover een spanning staat. Ook in dit geval zal de stroomsterkte erg groot worden en kan brand uitbreken.
– *Aardlek* van de stroomdraad naar het frame van de motor en eventueel de buitenkant van het apparaat. Het verschijnsel treedt alleen op bij afwezigheid van of een defekt in de aarddraad. Dit is gevaarlijk, omdat er spanning zal staan op elke verbinding van het apparaat naar de aarde. Als je dit apparaat aanraakt, zal er stroom gaan lopen door je lichaam. Bij een stroomsterkte van 50 mA kun je al bewusteloos raken.
– *Onderbreking van de stroomkring*. Een los draadeinde kan tegelijkertijd kortsluiting of een aardlek veroorzaken. Als dat niet het geval is, merk je als gebruiker alleen dat het apparaat niet werkt.

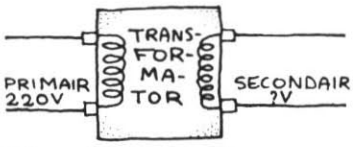


veiligheidsvoorzieningen
Bij binnenkomst in een huis wordt de stroom geleid via een kilowatt-uur-meter, die het energiegebruik registreert. Daarna splitst het net zich in enkele parallelle stroomkringen, *groepen* genoemd. Elke groep is voorzien van een *zekering*. Een zekering bevat een dun draadje, dat doorsmelt bij te grote stroomsterkte. Een zekering kan doorsmelten door:
– teveel ingeschakeld vermogen, waardoor de apparaten en lampen samen teveel stroom vragen;
– kortsluiting.

In sommige gevallen is een elektrisch apparaat voorzien van een eigen, kleine zekering. Ook deze zal in het algemeen slechts in het geval van kortsluiting doorsmelten. Onderzoek dus eerst de rest van het apparaat, vóór je het (met een nieuwe zekering) weer in bedrijf stelt.

Tenslotte is de installatie vaak voorzien van een *aardlekschakelaar*. Een aardlekschakelaar sluit de stroomtoevoer af als er lading uit de stroomkring weglekt naar aarde. In tegenstelling tot een zekering reageert een aardlekschakelaar al op stroomsterktes van 30 mA of meer (via je lichaam bijv.). De aardlekschakelaar onderbreekt in dat geval beide stroomdraden.

speciale onderdelen
– *ontstoringscondensator*
De ontstoringscondensator (zie paragraaf 2.2) is een onderdeel van de commutatormotor. Een condensator heeft een oneindig grote weerstand voor gelijkstroom. Hij kan echter 'doorslaan' (dat wil zeggen: wél geleidend worden), en veroorzaakt dan *kortsluiting*.
In dat geval moet hij worden vervangen.



Schematische voorstelling van een transformator. Let goed op vóór je draden verwijdert, want soms zijn er méér dan vier aansluitpunten.

Schematische voorstelling van een gelijkrichter.

– *voedingstransformator*

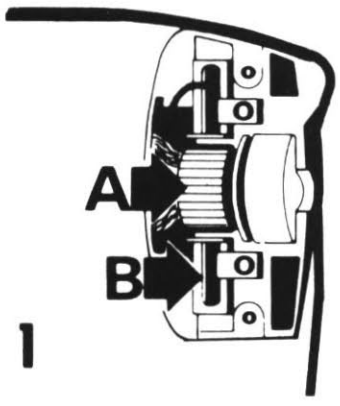
De voedingstransformator is al aan de orde geweest in paragraaf 4.3.
Een losgekoppelde transformator is te testen. De weerstand van de spoelen moet liggen tussen 0 Ω en oneindig. Je kunt ook de primaire kant aansluiten op een wisselspanning, en V_p en V_s meten.
Soms heeft een transformator meer dan vier aansluitpunten. Noteer dan welke draad waar vastzat, opdat je straks geen te hoge of te lage spanning op je apparaat zet.

– *gelijkrichter*

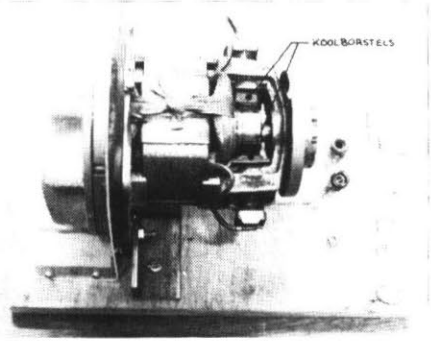
Ook de gelijkrichter is in paragraaf 4.3 al genoemd.
Indien losgekoppeld is de werking van de gelijkrichter te testen.
De ingangsweerstand (14 → 15) en de uitgangsweerstand (16 → 17) moeten oneindig groot zijn. De verbindingen 14 → 16, 14 → 17, 15 → 16 en 15 → 17 mogen steeds maar in één richting stroom doorlaten. Dit is te testen door de draden van de *ohmmeter* (zie blz. 66) te verwisselen. In de ene richting moet de weerstand klein zijn, en in de tegenovergestelde richting oneindig groot.

– *koolborstels*

Uit een gebruiksaanwijzing.



KOOLBORSTELS
De koolborstels dienen regelmatig nagezien en vrij gehouden te worden van stof en vuil, zodat zij steeds soepel in de houders (B in fig. 1) glijden.
Als de borstels zijn afgesleten tot een lengte van 5 mm, moeten zij worden vernieuwd. Gebruik steeds originele SKIL-borstels en veren en vernieuw altijd beide borstels en veren tegelijkertijd.



In een commutatormotor wordt de rotor gevoed via zogenaamde koolborstels, of soms via metalen glijkontakten. Deze glijdende kontakten moeten voldoende stevig tegen de commutator duwen, maar mogen het draaien niet belemmeren.

gereedschap van de hersteller

Allereerst schroevedraaiers, een mesje en eventueel een kniptang. Daarnaast heeft een doe-het-zelver nog twee hulpmiddelen nodig om zijn of haar elektrische mogelijkheden te verruimen. Dat zijn een *ohmmeter* en een *soldeerbout*.

– *ohmmeter*

De ohmmeter is een ampèremeter waarin zich een batterij en een variabele weerstand bevinden. De batterij is de spanningsbron van een stroomkring die, via de twee meetdraden, buiten de meter gesloten kan worden. Als er géén verbinding is tussen beide meetdraden, loopt er géén stroom en wijst de wijzer een oneindig grote weerstand aan ($R = \infty$). Als je de meetdraden tegen elkaar houdt, slaat de wijzer uit en moet dan 0 Ω aanwijzen ($R = 0$). Eventueel moet de variabele weerstand in de meter iets worden aangepast.

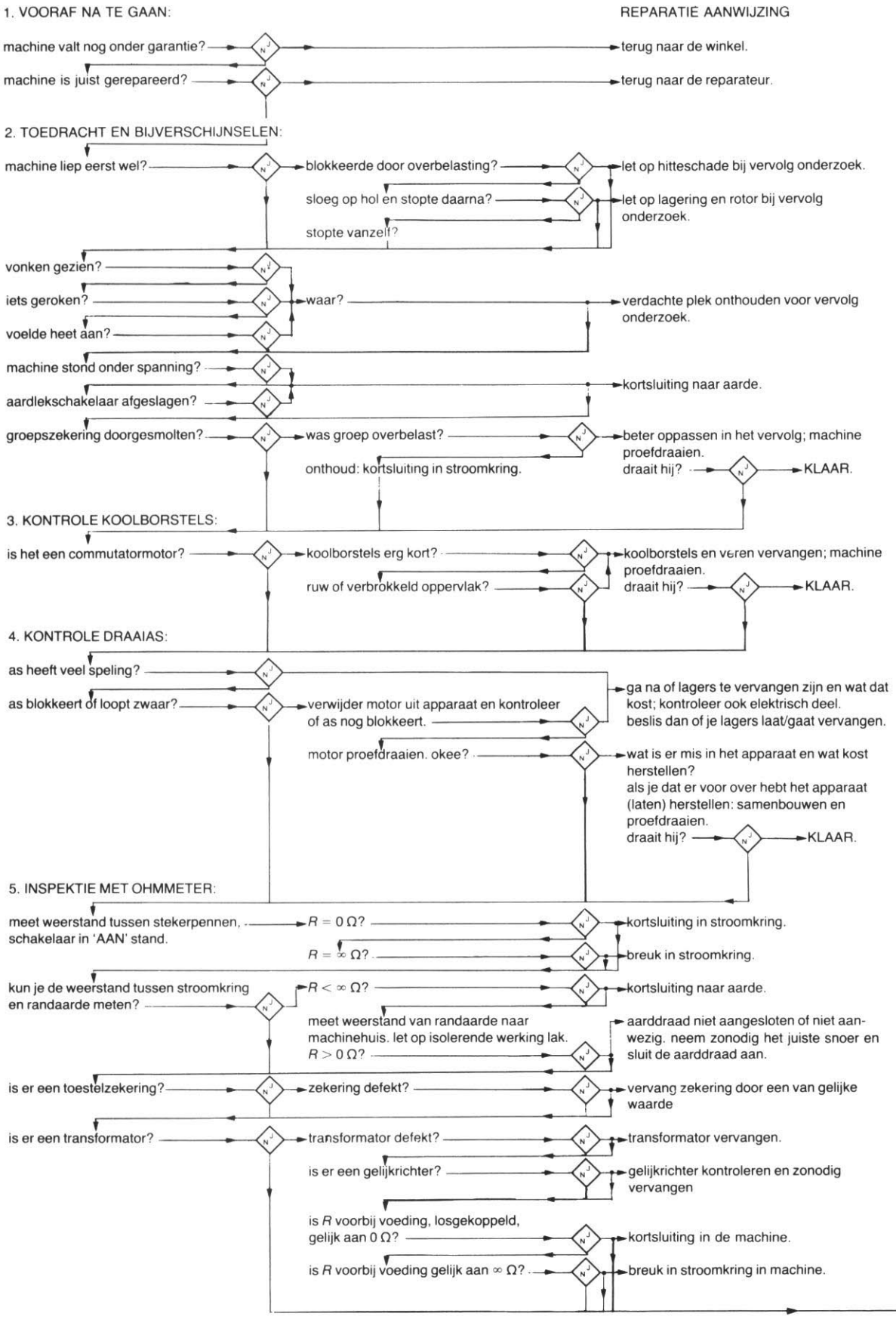
– *soldeerbout*

Om gesoldeerde verbindingen los en weer vast te maken, heeft de hersteller een soldeerbout nodig. Ook wordt een draadeind, bestaande uit dunne in elkaar gedraaide koperdraadjes, veel steviger als je soldeer (gesmolten tin) tussen de draadjes laat vloeien. Bij afkoelen stolt het tot een geheel.

1.

- Onderzoek en repareer een defekt apparaat. Gebruik het blokschema op blz. 66 en 67 voor het speurwerk.
- Schrijf op welke stappen je hebt ondernomen, wat je hebt gezien of gemeten en welke conclusies je hebt getrokken.
- Beschrijf het gevonden defekt en (zo mogelijk) hoe je dat hebt verholpen.

HERSTELHANDLEIDING.



ONDERZOEK

REPARATIEAANWIJZING

6. VISUELE INSPEKTIE INWENDIG:

zie je een los draadje? — N → waar hoort het vast? zet het vast.

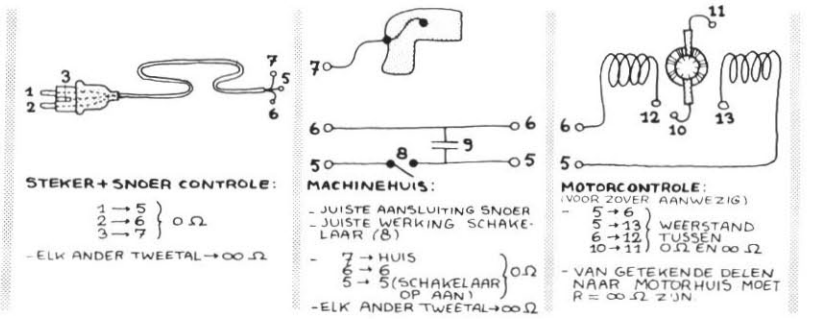
heeft een draad klem gezeten of zie je schade aan isolatie? — N → beschadigd stuk vervangen.

zie je zwarte of smeltplekken? — N → ernstig? — N → beschadigd stuk vervangen.

heb je iets gerepareerd? — N → terug naar '5' voor kontrole. als je daar geen alarmerende resultaten meer vindt, kun je proefdraaien.

7. ONDERDELEN ONDERZOEK:

neem het apparaat in onderdelen uiteen, als in de tekening hiernaast;



onderzoek snoer:

– meet de weerstand van elke ader. — $R > 0\,\Omega$? — N → snoer en/of steker vervangen.

– meet weerstand tussen stekerpennen. — $R = 0\,\Omega$? — N → snoer en/of steker vervangen.

– meet weerstand tussen stekerpennen en randaarde — $R = 0\,\Omega$? — N → snoer en/of steker vervangen.

kontroleer aan/uit schakelaar. — schakelaar defekt? — N → schakelaar vervangen.

meet weerstand condensator. — $R < \infty\,\Omega$? — N → condensator vervangen.

meet weerstand gehele motor of, indien mogelijk, elke spoel apart. — $R = \infty\,\Omega$? — N → draadbreuk

$R = 0\,\Omega$? — N → kortsluiting

} alleen in eenvoudige gevallen zijn spoelen opnieuw te wikkelen met een even dik en even lang stuk spoeldraad. het uiteinde van deze draad afkrabben en op juiste plaats vastschroeven of solderen.

GA NOG EENS GOED NA:

heb je bij elke defektaanwijzing (hitteschade, kortsluiting of draadbreuk) ook het werkelijke defekt gevonden? — N → is de reparatie nog nagelaten? — N → reparatie uitvoeren.

onderzoek of die defektaanwijzing nog bestaat. — N → herhaal het onderzoek vanaf die aanwijzing.

apparaat netjes samenbouwen en proefdraaien.

draait hij? — N → KLAAR.

JAMMER.

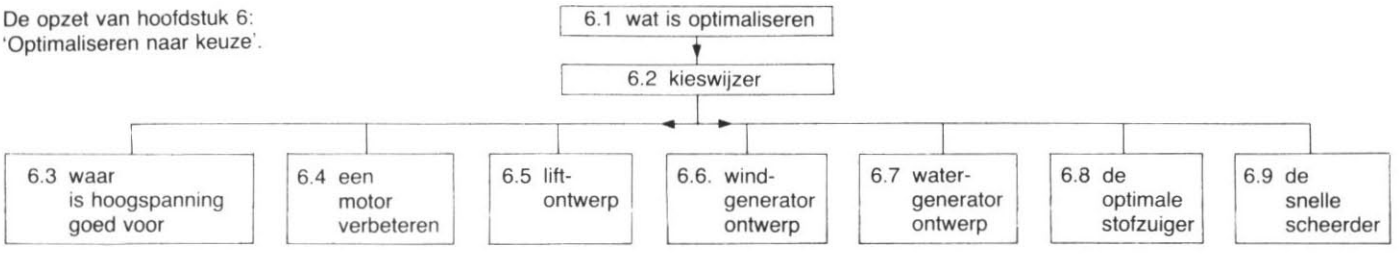
hoofdstuk 6

OPTIMALISEREN NAAR KEUZE

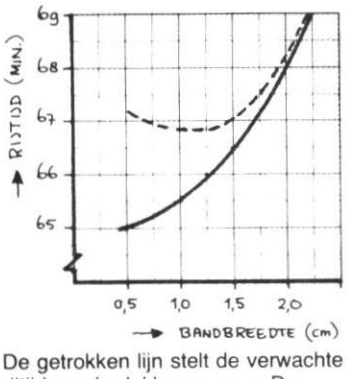
inhoud

		blz
6.1	wat is optimaliseren?	68
6.2	kieswijzer	69
6.3	waar is hoogspanning goed voor?	69
6.4	een motor verbeteren	71
6.5	liftontwerp	72
6.6	windgenerator-ontwerp	73
6.7	watergenerator-ontwerp	75
6.8	de optimale stofzuiger	76
6.9	de snelle scheerder	76

De opzet van hoofdstuk 6: 'Optimaliseren naar keuze'.



6.1 WAT IS OPTIMALISEREN?



De getrokken lijn stelt de verwachte rijtijd zonder lekkages voor. De streeplijn geeft de werkelijke tijd over 50 km weer, rekening houdend met het te verwachten aantal lekke banden. Met 0,6 cm brede banden is er elke 25 km een lek te verwachten. Met 1,2 cm brede banden ontstaat er gemiddeld per 50 km één lek.

Voorbeeld:
Een wielrenner staat voor een tijdrit over 50 km. Hij kan kiezen uit drie soorten banden. Hoe smaller en dunner de band, hoe kleiner de rolweerstand. Maar met die dunnere en harder opgepompte banden is het rijden vermoeiender (je voelt elke oneffenheid in je polsen), en het gevaar van een klapband is groter. Je hebt hier te maken met twee tegenstrijdige invloeden. Het doel is in zo kort mogelijke tijd de 50 km af te leggen. Door smallere banden te kiezen wordt de rijtijd korter. Tegelijkertijd zal de kans één of zelfs twee keer lek te rijden steeds groter worden. Wiel verwisselen en het weer op gang komen kost onze wielrenner ongeveer een minuut. Optimaliseren is nu het zo goed mogelijk afwegen van beide invloeden en vervolgens de beste oplossing kiezen. Hulpmiddel daarbij kan een grafiek zijn zoals hiernaast is getekend.
Een wielrenner kan ook gokken. Als hij geluk heeft rijdt hij niet lek, en is op zijn supersmalle bandjes straks de winnaar.
Optimaliseren komt voor in (top-)sport. Het hoort ook bij de aktiviteiten van ontwerpers: machines verbeteren waardoor misschien de verkoopprijs toeneemt, maar de gebruikskosten afnemen. Daar moet je niet te ver mee gaan. Een stofzuigermotor van duizend gulden is al eerder onpraktisch genoemd. Er is waarschijnlijk een zo goed mogelijke keuze, een *optimum*. Daarmee komen we bij een derde groep, de konsumenten. Als je méér uitgeeft voor een artikel, hoop je ook een béter artikel te krijgen. Want als een duurdere stofzuiger niet lánger meegaat of snéller zuigt of stíller is, dan ben je toch wel geflest.
Voordat je kunt optimaliseren, moet je een duidelijke *probleemstelling* kiezen. Voor de stofzuiger bijvoorbeeld de volgende:
– ik let alleen op aanschafprijs en op de prijs van elektrische energie, en ik wil weten wat het voordeligst is als ik tien jaar lang wekelijks de woonkamer wil zuigen.

Een andere mogelijkheid is:
– ik let alleen op aanschafprijs en op het fiktieve salaris van een huisvrouw/-man, en ik wil weten wat het voordeligst is als ... (enz.).

6.2 KIESWIJZER

De volgende paragrafen bevatten een zevental optimaliseringsproblemen. Je kunt kiezen uit een meer theoretische, meer technische of meer huishoudelijke richting.
In sommige gevallen is de probleemstelling al een heel eind uitgewerkt, terwijl je in andere nog een groot stuk vrijheid hebt.
Ook kunnen de geschetste ideeën tot een eigen probleemstelling leiden. Prachtig, maar wél in verband met elektrische machines.
Tenslotte is er een duidelijk verschil in omvang. De grotere problemen vragen om samenwerking van twee of drie parallelgroepjes óf kunnen niet worden afgerond in de tijd die voor dit thema beschikbaar is.
In het overzicht hieronder vind je een korte typering van de zeven optimaliseringsproblemen.

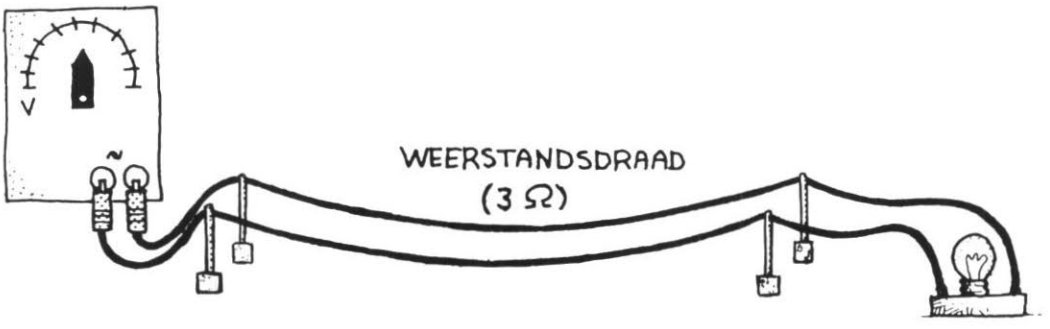
onderwerp	type	vrijheid	omvang
hoogspanning	theoretisch politiek	deels beperkt deels ruim	naar keuze 1 of 2 groepen
motor verbeteren	theoretisch	beperkt	beperkt
lift-ontwerp	technisch	vrij ruim	beperkt
windgenerator-ontwerp	theoretisch/ technisch	deels weinig deels vrij ruim	vrij groot 1 of 2 groepen
watergenerator-ontwerp	theoretisch/ technisch	ruim	groot
stofzuiger	konsument	vrij ruim	beperkt 1 of 2 groepen
scheerapparaat	konsument	vrij ruim	beperkt

6.3 WAAR IS HOOGSPANNING GOED VOOR?

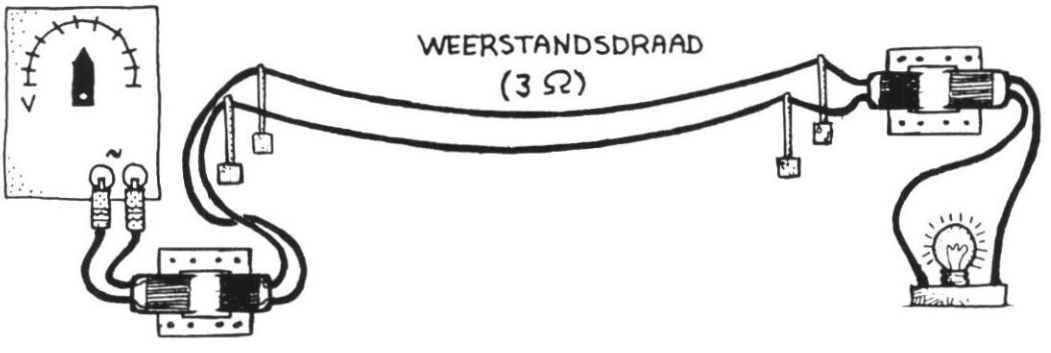
Bij het transporteren van elektrische energie ontstaat warmte in de transportdraden. De weerstand van de gebruikelijke bovengrondse kabel is 0,5 Ω/km.
Dat loopt aardig op, want je moet met de heen- en terugweg rekening houden. Menigeen woont enkele tientallen kilometers van de dichtstbijzijnde elektriciteitscentrale.
Het warmteverlies moet beperkt worden. Dat verlies wordt gegeven door $I^2 \cdot R \cdot t$.
Warmteverlies beperken kan dus door de weerstand en/of de stroomsterkte te verminderen.
Weerstand? Half ohm per kilometer; enig idee hoe dik die draad is? Moeten de draden aan die hoogspanningsmasten nóg dikker en zwaarder? Of misschien twee keer zoveel draden aan dezelfde rij masten?

1. MODELPROEF HOOGSPANNINGSLEIDING

• Bouw de hieronder weergegeven opstelling. Meet de stroom in de stroomkring (wisselstroom!) en bepaal hoeveel procent van de geleverde energie verloren gaat in de verbindingsdraden.



• Plaats vervolgens twee transformatoren in de leiding, zoals in de opstelling hieronder.



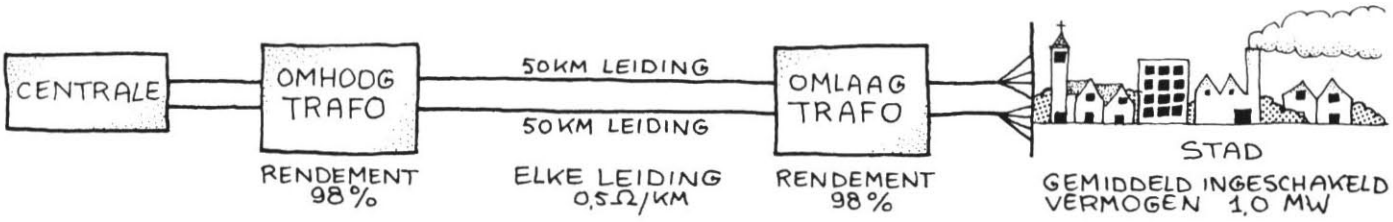
Meet de stroom in de verschillende stroomkringen. Meet ook de spanningen. Geef de resultaten overzichtelijk weer (bijv. in een schets van de schakeling).

Bereken tenslotte hoeveel procent nú verloren gaat in de beide transformatoren en in de verbindingsdraden.

Omhoogtransformeren van de spanning in werkelijkheid.

In de praktijk is het rendement van transformatoren voor hoogspanning meer dan 98%. De werkelijke situatie is dus nog gunstiger dan in het voorgaande experiment. Ook zijn de werkelijke stromen erg groot. Als er in een stad gemiddeld aan elektrisch vermogen

1 MW (M = mega = 10^6) is ingeschakeld bij 220 V spanning, bereken dan eens de gemiddeld geleverde stroom. Stel je voor dat die stroom door 50 km leiding naar die stad en dan weer door 50 km leiding terug zou moeten! Hoogspanning dus; maar hoe hoog dan wel?



Schematische voorstelling van een hoogspanningsnet.

2. OPTIMALISEER DE HOOGSPANNING

HOOGSPANNING IN kV	SYSTEEMKOSTEN IN MILJOEN GULDEN
5	0,8
10	0,8
25	1,0
50	1,4
100	2,0
200	2,8
300	3,5

Hoe hoger de spanning, hoe kleiner de stroomsterkte en dus het energieverlies in leidingen én transformatoren zal zijn. Dat levert een kostenbesparing op. Maar je hebt ook te maken met de aanschafkosten van transformatoren en isolatievoorzieningen.
Opvoeren van de hoogspanning levert lagere verliezen bij hogere aanschafkosten. Welke spanning is optimaal? Bepaal die waarde voor het geval dat in de figuur hierboven is geschetst. Reken met 10 jaar kontinu gebruik. Neem aan dat een kilowatt-uur voor de elektriciteitsproducenten in die tien jaar gemiddeld 20 cent waard is. Tenslotte vind je in de tabel de totale kosten voor aanleg van transformatorstations, extra isolatievoorzieningen én renteverlies in die tien jaar.

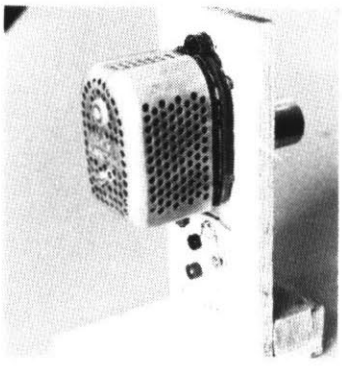
Leuk hoor, wat wij zo kunnen uitrekenen. Maar wat kiezen nu eigenlijk de samenwerkende elektriciteitsproducenten en wat beslissen de politici voor ons?
Het keuzegebied ziet er als volgt uit:

veel kleine centrales korte kabels	⟷	elf grote centrales lange kabels

Waar ligt het minimum-kosten-punt?
Welke keuze levert het laagste energiegebruik?
Welke kosten spelen eigenlijk een rol?
Welke andere overwegingen beïnvloeden de keuze?

3.
Ga na welke keuzes de elektriciteitsmaatschappijen en de regering in de laatste dertig jaar gemaakt hebben. Waarom maakten zij die keuzes en zijn er ook mensen of groepen die hele andere keuzes voorstaan?

6.4 EEN MOTOR VERBETEREN



De parallel-motor bijvoorbeeld. Dat leek zo mooi. Een ruitenwissermotor voor een tientje bij de sloop. Je prutst wat met de draadjes, en hij kan naar keuze als seriemotor of als parallelmotor draaien.
Ja, maar ... Als parallelmotor liep hij niet zo goed. Zes keer zoveel stroom bij een vijfde van de draaisnelheid vergeleken met de serie-uitvoering. Dat is toch te dol. Hoe zit dat eigenlijk?

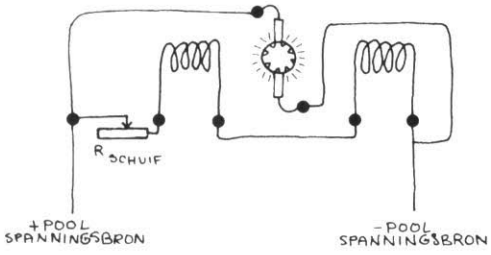
Om daarvan een idee te krijgen, wat meet- en denkwerk vooraf.

1.
Bepaal met gelijkstroom de weerstand van stator- en rotorspoel afzonderlijk.

2.
Ga in hoofdstuk 4 nog eens na in welke spoel voornamelijk inductie optreedt tijdens het draaien. Eventueel kun je statorstroom en rotorstroom apart meten tijdens het draaien als parallelmotor.

3.
Kijk eens of je een idee kunt krijgen van het aantal windingen van rotor en stator. Waar is de magnetische veldsterkte het grootst, en hoe verandert dat als de motor sneller gaat draaien? Lijkt dat zinvol en evenwichtig?

Aan een deel van de problemen kun je tegemoet komen met een extra weerstand. Dat levert het volgende optimaliseerprobleem:

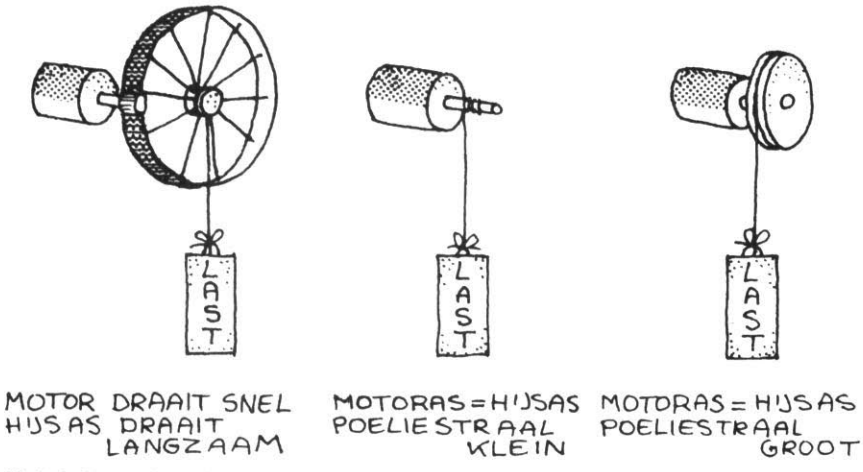


Aansluitschema voor de parallelmotor met extra weerstand in de statortak.

4.
Met behulp van een schuifweerstand in serie met de statorspoel kunnen we de statorstroom beperken en de voedingsspanning opvoeren zonder dat de zekeringen smelten. Zie de figuur hiernaast voor de te maken schakeling. Onderzoek bij welke waarde van de serieweerstand en bij welke voedingsspanning een zo hoog mogelijk rendement te halen is.

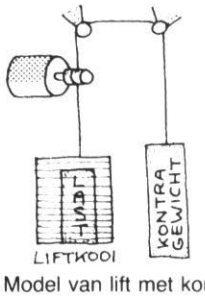
5.
Zo'n serieweerstand blijft natuurlijk een lapmiddel. Als je op grond van deze ervaring een parallelmotor zou moeten ontwerpen, wat zou je dan zeker anders doen?

6.5 LIFTONTWERP



Variatie in overbrenging van motor naar hijstouw.

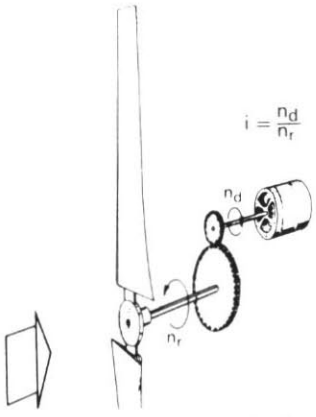
1.
Gegeven een draaispoelmotor (liefst een waarvan de karakteristieken al gemeten en dus beschikbaar zijn) en een op te hijsen gewicht.
Te variëren: de hijsafstand per motoromwenteling, ofwel de overbrenging van motor naar hijstouw. Mogelijkheden daartoe zijn geschetst in de figuur hiernaast.
Gezocht: de beste overbrenging.
Je moet nog wel kiezen wat je goed noemt. Is dat het minimum energiegebruik óf de kortste tijd voor een meter stijgen?



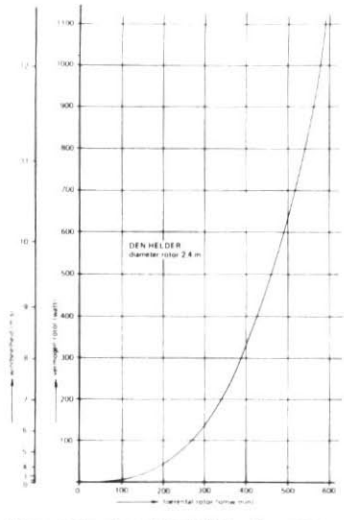
Model van lift met kontragewicht.

2.
Bij een echte lift is er nog iets meer aan de hand. De liftkooi gaat op en neer. Meestal beweegt een kontragewicht in tegenovergestelde richting. In de liftkooi staat de variabele last die omhoog of omlaag moet. Indien tijd en materialen het toelaten, zou je bij gegeven kooi en overbrenging ook het optimum kontragewicht kunnen bepalen. Levert een kontragewicht voordelen op? Zo ja, waarom eigenlijk?

6.6 WINDGENERATOR-ONTWERP



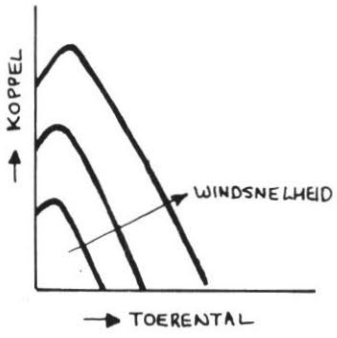
De overbrengingsverhouding *i* geeft aan hoeveel keer de dynamo-as sneller draait dan de molenas.



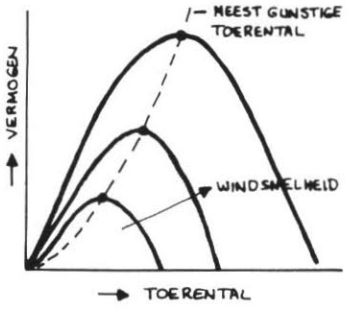
Een molenkarakteristiek: lijn voor het gunstigste toerental bij variabele windsnelheid.

Probleem: hoe koppelen we een windmolen zo goed mogelijk aan een dynamo.
Dat levert direkt een tweede probleem. Het gaat om het vinden van de beste overbrengingsverhouding *i* (zie de figuur hiernaast). Maar om die verhouding te variëren van bijvoorbeeld *i* = 1 tot *i* = 10 moeten we heel wat verschillende tandwielen op de assen monteren. Denk maar aan een racefiets met tien versnellingen. In dit geval kun je beter éérst denken en meten aan beide onderdelen, de molen en de dynamo, en dán gaan koppelen.

de windmolenkarakteristiek
De stand van de wieken legt voor elke windsnelheid het meest gunstige toerental vast: dat is het toerental waarbij de molen het maximum vermogen levert. Als je hem lichter belast (kleiner koppel) neemt het toerental wel toe, maar het vermogen neemt af. Een zwaardere last geeft een te sterke daling van het toerental en eventueel stilstand.



Toerental-koppel-kromme bij een aantal windsnelheden.



Toerental-vermogen-kromme bij dezelfde windsnelheden.

Een koppel-toeren-kromme kun je omzetten in een vermogen-toeren-kromme, zoals in de figuren hierboven. Als je bij meerdere windsnelheden een vermogen-toeren-kromme hebt bepaald en uit elk het optimale toerental hebt afgeleid, vind je de *molenkarakteristiek*. Hiernaast zie je het eindresultaat voor een 2-bladige molen met een diameter van 2,4 m.

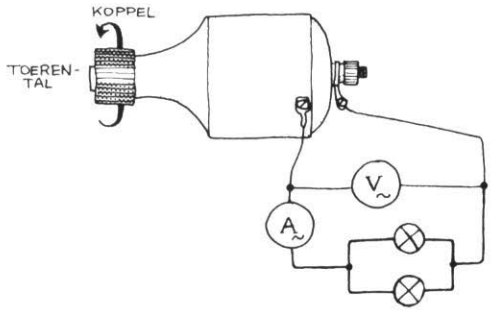
1. MOLENKARAKTERISTIEK METEN

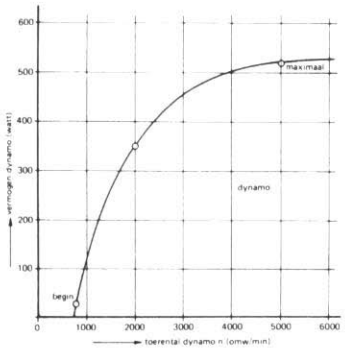
Om aan je eigen molen te meten heb je een slipkoppeling nodig (zie paragraaf 3.2), een toerenteller én tijd om bij meerdere windsnelheden te meten.
Meetmethode:
- bepaal bij een zo konstant mogelijke wind het verband tussen koppel en toerental;
- herhaal dit bij enkele andere windsnelheden;
- bereken voor alle gemeten windsnelheden het verband tussen geleverd vermogen en toerental;
- de punten met de maximum vermogens vormen de molenkarakteristiek.

de dynamokarakteristiek
Welk vermogen moet bij een bepaald toerental aan de as van de dynamo worden geleverd? Zoals je weet hangt dit ook af van de stroomkring waarvoor de dynamo spanning levert.
In dit geval zou je een fietsdynamo, gekoppeld aan twee parallelle lampjes kunnen nemen.

2. DYNAMO ONDERZOEK

- bouw de schakeling als aangegeven;
- zie paragraaf 3.2 voor geschikte methoden om toerental en benodigd koppel te meten;
- neem een ampèremeter in de stroomkring op, zodat je kunt stoppen zo gauw de stroom te groot wordt voor de dynamospoel;
- bepaal bij elk gemeten koppel het opgenomen vermogen;
- stel de vermogen-toerental-kromme vast, eindigend bij het maximum toelaatbaar toerental waarboven de dynamo te heet zou worden (voor een 6 V/3 W dynamo bij I = 0,5 A).

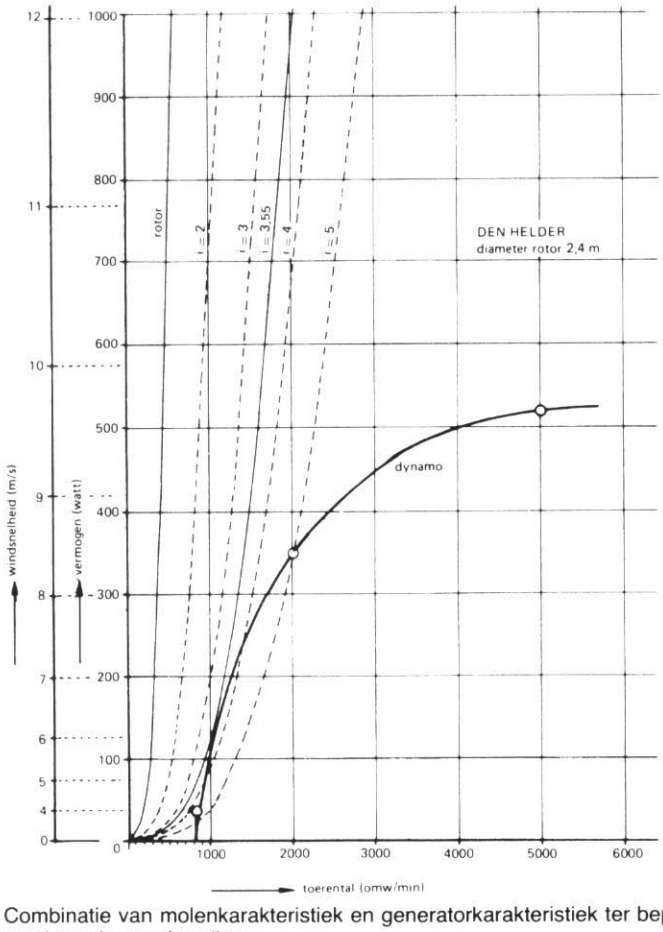




Karakteristiek van een autodynamo met spanningsregelaar.

In de praktijk wordt veel gewerkt met een autodynamo, die via een spanningsregelaar met een accu wordt verbonden.
De spanningsregelaar varieert de stroom door de veldspoelen, zodat de geleverde spanning boven 12 V blijft (dus geschikt om een 12 V accu op te laden).
Hiernaast zie je de karakteristiek van een aldus gebruikte autodynamo.

de keuze van de overbrenging



De molenkarakteristiek wordt gegeven door de dunne getrokken lijn (met 'rotor' als bijschrift). De molenkarakteristieken bij een bepaalde overbrengingsverhouding i (de gestreept getekende lijnen) worden daaruit afgeleid. Bij i = 3 bijv. wordt hetzelfde vermogen geleverd, maar bij een 3 maal zo hoog toerental (dus: 1500 omw/min in plaats van 500 omw/min bij P = 700 W).

Combinatie van molenkarakteristiek en generatorkarakteristiek ter bepaling van de meest geschikte overbrengingsverhouding.

Aan het voorbeeld hierboven zie je dat voor elke overbrengingsverhouding een aparte molenkarakteristiek ontstaat. Samen met de dynamokarakteristiek moet zo'n figuur tot een goede keuze van de overbrenging leiden. Volgens ingewijden mogen de molenkarakteristiek en de dynamokarakteristiek elkaar niet snijden.

3. OVERBRENGINGSVERHOUDING BEPALEN

- Bedenk eens wat er zou gebeuren als de molenkarakteristiek gedeeltelijk onder de dynamokarakteristiek ligt.
- Bepaal vervolgens uit je eigen metingen de gunstigste waarde van de overbrengingsverhouding *i*.
- Probeer molen en dynamo in die verhouding te koppelen, en test je generator in de praktijk.

Let wel op de veiligheid! Eén van die veiligheidsaspecten is de volgende. Uit de grafieken kun je opmaken bij welke windsnelheden je windgenerator kan en mag werken. Teveel wind zou te grote snelheid geven en een rokende dynamo. Zonder automatische beveiliging zal er altijd iemand de geleverde stroom in de gaten moeten houden. Bij een te grote stroomsterkte de dynamo uitschakelen en zo snel mogelijk de molen uit de wind draaien.

6.7 WATERGENERATOR-ONTWERP

Deze opdracht kent twee onderdelen:
– het ontwerpen en maken van een kleine waterturbine volgens het principe van een scheepsschroef of van een watermolenrad;
– het zoeken van de optimale overbrenging van waterturbine naar dynamo (bijv. een fietsdynamo die twee lampjes voedt).

1. TURBINE-ONTWERP

Enkele richtlijnen voor het turbine-ontwerp:
– uitgaand van een totaalrendement van 10%, een schroefvlak van A m^2 en een watersnelheid van v m/s kun je een elektrisch vermogen P_e winnen:
$P_e = 50 \cdot v^3 \cdot A$ watt;
– de meeste fietsdynamo's zijn berekend op 6 V/3 W;
– is er een snelvliedend beekje of een rivier in de nabijheid of kun je over een motorboot beschikken, ga dan na hoe groot de stroom- of vaarsnelheid is.

2. ONDERZOEK TURBINE

Om een overbrengingsverhouding van turbine naar dynamo te kunnen kiezen, moeten we eerst van beide delen de karakteristieken bepalen. Zie hiervoor bijv. paragraaf 6.6 over de windgenerator.

Bepaal het verband tussen koppel en toerental van de turbine en leid daaruit af bij welk toerental het geleverd vermogen zo groot mogelijk is.

3. ONDERZOEK DYNAMO MET LAMPJES

- Bepaal het verband tussen koppel en toerental van de dynamo. (Neem een ampèremeter in de stroomkring op, zodat je kunt stoppen zo gauw de stroom te groot wordt.)
- Bepaal bij elk gemeten koppel het opgenomen vermogen.
- Stel de vermogen-toerental-kromme vast.

4. AANPASSING

Net als in paragraaf 6.6 kun je voor elke overbrengingsverhouding van turbine naar dynamo een aparte turbinekromme tekenen.
Teken in hetzelfde diagram ook de dynamokromme. Denk goed na over de vraag bij welke overbrenging de dynamo zo goed mogelijk op toeren komt zónder dat de stroom te groot wordt voor de lampjes of dynamospoel.
Koppel turbine en dynamo met de gekozen overbrenging en test je waterkrachtcentrale in de praktijk.

6.8 DE OPTIMALE STOFZUIGER

Zuigsnelheidsbepaling.

In paragraaf 6.1 zijn een aantal mogelijke probleemstellingen voor stofzuigers gegeven. Kies er een van en werk die verder uit. Om te kunnen optimaliseren zul je tenminste aan twee (maar liever meer) verschillende stofzuigers moeten meten. Van elk moet je in ieder geval te weten komen:

- aanschafprijs;
- opgenomen elektrisch vermogen;
- zuigsnelheid.

Als suggestie voor het vergelijken van de zuigsnelheid het volgende. Verdeel duizend perforatorrondjes over 2 m^2 vloeroppervlak, en meet in hoeveel tijd je al die rondjes kunt opzuigen.

Werk de resultaten uit volgens de gekozen probleemstelling, en bepaal:

- welke stofzuiger in jouw geval optimaal is;
- een eventuele tendens, zoals: 'hoe goedkoper hoe beter';
- wat het effekt is van een groter huis, ofwel méér zuigwerk, op de keuze van de meest geschikte stofzuiger.

6.9 DE SNELLE SCHEERDER

Met welk scheerapparaat kan men zich het snelst of het voordeligst van baardstoppels ontdoen?

Evenals bij de stofzuiger zul je het probleem duidelijk moeten stellen. Is tijd geld en de tijd die je 's morgens extra in bed kunt blijven liggen ook extra veel waard? Of ben je alleen geïnteresseerd in de kostprijs van het scheerapparaat en het energiegebruik bij tien jaar dagelijks scheren?

Een suggestie voor vergelijken van de scheersnelheid: heeft je docent een baard?

index

aarddraad 64
aardlekschakelaar 64
anker 19
(kooi-) 40
(schijf-) 40
ampère 10
ampèremeter 11
arm (van een kracht) 20

belasting 38
bobine 56

commutator 19
commutatormotor 19
(parallel-) 39, 51
(serie-) 39, 51
coulomb 10

dynamo (fiets-) 43

elektromagneet 9
elektro-magnetische inductie 25
energie (elektrische -) 12

flux (magnetische -) 29
frame 19, 26

gelijkrichter 55, 65
generator 24
(draaispoel-) 43
generatoreffect (bij motor) 47
generatorkarakteristiek 42
groep 64

hall-sonde 16
hoogspanning 55

inductiemotor 40
inductiespanning 26, 29
inductiestroom 26, 29, 30
influentie (magnetische -) 9

klemspanning 47
kontaktpunten 56
koolborstels 65
koppel (maximum -) 21, 24
kortsluiting 64
kortsluitring 41
krachtwerking op afstand 8

laagspanning 54
lading 10
lager 19, 26
lenz (wet van -) 29
lorentzkracht 21, 23

magneet (permanente -) 9
magnetische veldsterkte 18, 23
magnetisch veld 10
(homogeen -) 17
magnetiseren 9
magnetisme 8
moment (draai-) 20
motoreffect (bij generator) 48, 49
motorkarakteristiek 38

nulstroom 53

ohm 12
ohm (wet van -) 12
ohmmeter 65
onderbreker 55
ontstoringscondensator 19, 20, 64

pool (magnetische -) 8

randaarde 64
rechterhandregel 21
rechtervuistregel 17
rendement 33, 53
rotor 19, 26
(meerpolige -) 39, 44
(tweepolige -) 39, 44

sleepring 44
spanning 10
(wissel-) 27
(effectieve -) 27
stator 19, 26
stroomsterkte 10
(wissel-) 27
(effectieve -) 27
synchroonmotor 41

tesla 23
toerental 36, 37, 38
transformator 52
(voedings-) 65

veldlijn (magnetische -) 10
ventilator 19
verdeler 56
vermogen 12, 33, 35, 36, 37
volt 10
voltmeter 11

weber 29
weerstand 12

zekering 55, 64
zelfinductie 54

Begeleidingscommissie S.V.O.-project 0213 (vooronderzoek voor het PLON, 1972-1974)

F. van de Maesen (voorzitter tot 1973); hoogleraar natuurkunde Technische Hogeschool Eindhoven
N.J. Heijkoop (voorzitter 1973-1974); inspecteur voortgezet onderwijs
W.P.J. Lignac (secr.); secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
S. Auer, algemeen didacticus Universiteit van Amsterdam
F. Balkema, inspecteur voortgezet onderwijs
H.P. Hooymayers, lector natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
H.J.L. Jongbloed (1972-1973), mediadeskundige NIAM
J. Schweers, leraar natuurkunde havo/vwo
J. Smit, inspecteur voortgezet onderwijs
E. Warries, hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
M. van Wieringen (1973-1974), mediadeskundige NIAM

Stuurgroep PLON (1974-heden)

H.P. Hooymayers (voorzitter), hoogleraar natuurkundedidactiek Rijks Universiteit Utrecht
W.P.J. Lignac (secr. tot 1978), secretaris Commissie Modernisering Leerplan Natuurkunde
A.A.M. Agterberg (secr. sedert 1978), secretaris Advies Commissie voor de Leerplan Ontwikkeling Natuurkunde in oprichting
P. Broekman (sedert 1980), hoofd afdeling Bèta en Gammavakken CITO
F. Dekkers (sedert 1979), hoofddocent natuurkunde Moller Instituut
H. Lengkeek (tot 1977), leraar natuurkunde mavo
D.A. Lockhorst (tot 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
J. Schipper (sedert 1980), medewerker A.P.S.
M. Sjamaar (sedert 1982), rector Niels Stensen College te Utrecht
A. Snater (tot 1980), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
F.J. Steenbrink (tot 1978), leraar natuurkunde vwo
J.M.F. Teunissen (tot 1975), onderwijskundige Rijks Universiteit Utrecht
W.C. Vink (tot 1979), directeur Christelijke Mavo te Putten
R. de Vries (sedert 1980), leraar natuurkunde havo/vwo, namens de NVON
E. Warries (tot 1975), hoogleraar onderwijskunde Technische Hogeschool Twente
S.A. Wouthuysen (tot 1976), hoogleraar natuurkunde Universiteit van Amsterdam

Kerngroep PLON havo-bovenbouw

G. Buisman (sedert 1978), leraar natuurkunde hts
P.G. Hogenbirk (1981-1982), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Holl (1982-1983), leraar natuurkunde havo/vwo
J. de Jong (sedert 1983), leraar natuurkunde havo/vwo
E. Maarschall (1978-1981), leraar natuurkunde hts
H. Poorthuis (1978-1981), leraar natuurkunde havo-top pedagogische academie
J. Scherrenburg (sedert 1978), hoofddocent natuurkunde Stichting Opleiding Leraren
W.J.G. Schraven (sedert 1978), leraar natuurkunde havo/vwo
M. van Woerkom (sedert 1982), leraar natuurkunde havo/vwo

PLON-team havo-bovenbouw

H.M.C. Eijkelhof (sedert 1981)
R. van Eyck (1981-1982)
A.C.L. van Gameren (sedert 1977)
D. van Genderen, Rijks Universiteit Utrecht
F.L. Gravenberch (1978-1983)
P.G. Hogenbirk (1981-1983)
E. Holl (sedert 1983)
T. Jörg (sedert 1982)
W.H. Kamphuis (sedert 1978)
P.T. Kloek (sedert 1983)
J. Kortland (sedert 1982)
P.L. Lijnse, Rijks Universiteit Utrecht
B. Pelupessy (sedert 1978)
T. Römgens (1979-1981)
P. Verhagen (sedert 1983)
H. Vermeulen (1981-1983)
R.F.A. Wierstra (sedert 1978)

PLON-administratie

E. van den Broek (1976-1979)
R. Lindeman (1977-1980)
M. Rolff van den Baumen (1974-1979)
N. Rotteveel (sedert 1982)
A.G. Schwering (1980-1982)
B. Schillert (sedert 1980)
H. Veurink (tot 1974)

Tekeningen

A. Lurvink (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)
H. de Waal (Onderwijs Media Instituut, Rijks Universiteit Utrecht)

Foto's

A.C.L. van Gameren (PLON)
W.H. Kamphuis (PLON)

PLON-CITO (namens CITO)

F. Boessenkool
P. Broekman
C. Hellingman
T. Heuvelmans
H. Vonken

Proefscholen 1983-1984

Ashram College te Alphen a/d Rijn
S.G. Nijmegen Oost te Nijmegen
Chr. S.G. Revius te Deventer
S.G. Oost Betuwe te Bemmel
Hertog Jan College te Valkenswaard
Marnix College te Ede
Niels Stensen College te Utrecht
Eemland College Noord te Amersfoort
Chr. S.G. Jan van Arkel te Hardenberg
S.G. Huizermaat te Huizen
Chr. Lyceum en Havo te Veenendaal

Overzicht van PLON-thema's voor havo-bovenbouw

VOOR DE 4e KLAS

- Vergelijken
- Weersveranderingen
- Muziek
- Verkeer
- Elektrische Machines
- Energie en Kwaliteit

VOOR DE 5e KLAS

- Lichtbronnen
- Ioniserende Straling
- Elektronica
- Materie
- Repeteerthema

Tevens zijn beschikbaar

- docentenhandleidingen (AVOL's) en apparatuurgidsen bij elke thema