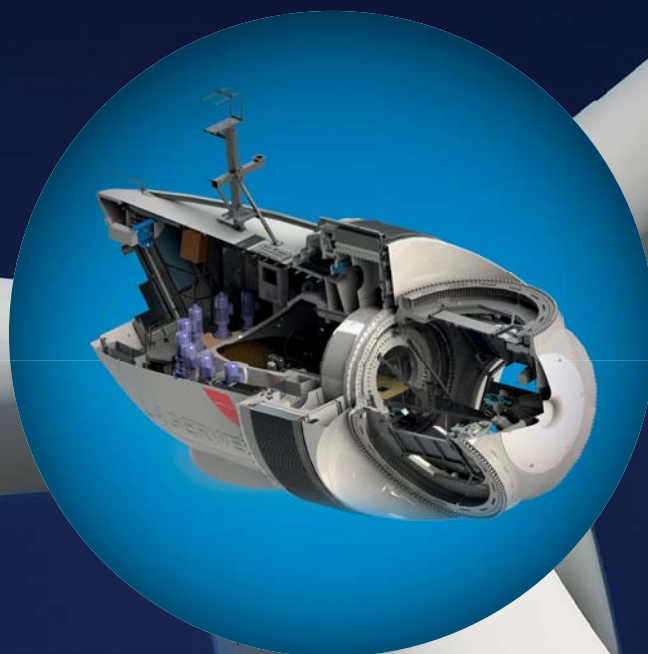


Elektrotechniek

Voor werktuigbouwkundigen
en andere technici



Noordhoff

Leo Scheltinga, Reuwke van Hoek

7^e editie

Elektrotechniek

voor werktuigbouwkundigen
en andere technici

Leo Scheltinga

Reuwke van Hoek †

Zevende druk

Noordhoff Groningen/Utrecht

Ontwerp omslag: Shootmedia
Omslagillustratie: Getty Images

Eventuele op- en aanmerkingen over deze of andere uitgaven kunt u richten aan:
Noordhoff Uitgevers bv, Afdeling Hoger Onderwijs, Antwoordnummer 13,
9700 VB Groningen of via het contactformulier op www.mijnnoordhoff.nl.

De informatie in deze uitgave is uitsluitend bedoeld als algemene informatie. Aan deze informatie kunt u geen rechten of aansprakelijkheid van de auteur(s), redactie of uitgever ontleen.



0 / 24

© 2024 Noordhoff Uitgevers bv, Groningen/Utrecht, Nederland.

Deze uitgave is beschermd op grond van het auteursrecht. Wanneer u (her)gebruik wilt maken van de informatie in deze uitgave, dient u vooraf schriftelijke toestemming te verkrijgen van Noordhoff Uitgevers bv. Meer informatie over collectieve regelingen voor het onderwijs is te vinden op www.onderwijsenauteursrecht.nl.

This publication is protected by copyright. Prior written permission of Noordhoff Uitgevers bv is required to (re)use the information in this publication.

ISBN(ebook) 978-90-01-03537-2
ISBN 978-90-01-03536-5
NUR 123

Woord vooraf bij de herziene zevende druk

Werktuigbouwkundigen en andere niet-elektrotechnici die een leidinggevende functie in het bedrijf (zullen gaan) vervullen, moeten een basiskennis van de elektrotechniek bezitten. Aansluitend op deze basis is het noodzakelijk enig inzicht te hebben in de mogelijkheden die de elektrotechniek biedt.

Dit boek *Elektrotechniek voor werktuigbouwkundigen* is voor hen, die aan deze voorwaarden willen voldoen. Een gedetailleerde kennis van diverse elektrotechnische begrippen is ons inziens overbodig.

De vragen en opdrachten zijn doelbewust eenvoudig gehouden, zodat ook zelfwerkzaamheid goed mogelijk is. Wij hopen dat dit boek een bijdrage zal leveren aan een goede oriëntatie op elektrotechnisch gebied en dat het de samenwerking tussen elektrotechnici en andere technici zal bevorderen.

Deze zevende druk van het boek is door de nieuwe lay-out aantrekkelijker en toegankelijker geworden voor een bescheiden kennismaking met de elektrotechniek.

De inhoud is aangevuld en aangepast aan de huidige stand van de techniek. De didactisch verantwoorde benadering van de elektriciteitsleer in de hoofdstukken 1 tot en met 8 en de toepassing daarvan, de elektrotechniek, maken het boek nu in het bijzonder geschikt voor de propedeuse van het hoger beroepsonderwijs.

Voorjaar 2024
Zutphen, L. Scheltinga

Inhoud

1 Elektrische energie 11

- 1.1 Energietechniek 12
- 1.2 Energievormen 13
- 1.3 Energieoverdracht 15
- 1.4 Energietransport 16
- 1.5 Energieverliezen 22
- 1.6 Om te onthouden 27
- Vragen en opdrachten 28

2 Spanningsbronnen 33

- 2.1 Natuurlijke ontladingen 34
- 2.2 Het thermo-element 35
- 2.3 Batterijen en accu's 36
- 2.4 Brandstofcellen 44
- 2.5 Zonnecellen 45
- 2.6 Generatoren 49
- 2.7 Om te onthouden 56
- Vragen en opdrachten 57

3 Stroomsoorten 61

- 3.1 Gelijkstroom 62
- 3.2 Wisselstroom 63
- 3.3 Vermogen bij wisselstroom en draaistroom 72
- 3.4 Om te onthouden 74
- Vragen en opdrachten 75

4 Weerstand 77

- 4.1 Weerstand en soortelijke weerstand 78
- 4.2 Weerstand en materialen 78
- 4.3 Temperatuurcoëfficiënt 81
- 4.4 Belastbaarheid van weerstanden 82
- 4.5 Speciale weerstanden 83
- 4.6 Om te onthouden 85
- Vragen en opdrachten 86

5 Schakelingen 89

- 5.1 Stroomkringen 90
- 5.2 Serieschakeling van weerstanden 90
- 5.3 Parallelschakeling van weerstanden 93
- 5.4 Gemengde schakeling van weerstanden 96
- 5.5 Serie- en parallelschakeling van spanningsbronnen 96
- 5.6 De wetten van Kirchhoff 97
- 5.7 Spanningsbronnen en stroombronnen 100
- 5.8 Om te onthouden 107
- Vragen en opdrachten 109

6 Magnetisme en inductie 115

- 6.1 Magnetisme en magnetische inductie 116
- 6.2 Elektromagnetisme en elektrische inductie 119
- 6.3 Wervelstromen 126
- 6.4 Elektromagnetische en elektrodynamische krachtwerking 127
- 6.5 Om te onthouden 128
- Vragen en opdrachten 129

7 Transformatoren 133

- 7.1 Het transformatorprincipe 134
- 7.2 Draaistroomtransformator 138
- 7.3 Lastransformatoren 141
- 7.4 Beschermingstransformator en veiligheidstransformator 144
- 7.5 Om te onthouden 145
- Vragen en opdrachten 146

8 Spoel en condensator 149

- 8.1 Spoel op wisselspanning 150
- 8.2 Condensator op gelijkspanning 155
- 8.3 Condensator op wisselspanning 160
- 8.4 Weerstand en zelfinductie 162
- 8.5 Weerstand en capaciteit 163
- 8.6 Draaistroomschakelingen 165
- 8.7 Om te onthouden 168
- Vragen en opdrachten 170

9 De elektrische installatie 175

- 9.1 Energievoorziening 176
- 9.2 Aarding 180
- 9.3 Verdeelsystemen, schakelkasten en panelen 183
- 9.4 Beveiliging 186
- 9.5 Verlichting 189
- 9.6 Toepassing ledverlichting 190
- 9.7 Om te onthouden 191
- Vragen en opdrachten 192

10 **Halfgeleiders en hun toepassingen** 197

- 10.1 Diode 198
- 10.2 Transistor 201
- 10.3 Thyristor 202
- 10.4 Triac 203
- 10.5 Diac 206
- 10.6 Om te onthouden 209
- Vragen en opdrachten 210

11 **Sensoren** 213

- 11.1 Sensortechniek 214
- 11.2 Inductieve afstandssensor 215
- 11.3 Magneto-inductieve verplaatsingssensor 219
- 11.4 Capacitieve sensor 221
- 11.5 Schakelafstand 223
- 11.6 Foto-elektrische afstandssensor 224
- 11.7 Magnetostrictieve verplaatsingssensor 228
- 11.8 Monteren en inbouwen 232
- 11.9 Basisschakelingen 232
- 11.10 Logische schakelingen 234
- 11.11 Om te onthouden 235
- Vragen en opdrachten 237

12 **Meettechniek** 239

- 12.1 Analoge en digitale meetinstrumenten 240
- 12.2 Gebruik van meetinstrumenten 244
- 12.3 Toepassingen van meetinstrumenten 247
- 12.4 Om te onthouden 253
- Vragen en opdrachten 254

13 **Gelijkstroommachines** 257

- 13.1 Functioneren en indeling van gelijkstroommachines 258
- 13.2 Het generatorprincipe 258
- 13.3 Het motorprincipe 261
- 13.4 Shuntgenerator 264
- 13.5 Compoundgenerator 265
- 13.6 Motor met permanente magneten (PM-motoren) 267
- 13.7 De motor met afzonderlijke (vreemde) bekrachtiging 268
- 13.8 Shuntmotor 269
- 13.9 Seriemotor 270
- 13.10 Compoundmotor 271
- 13.11 Toerenregeling 272
- 13.12 Om te onthouden 273
- Vragen en opdrachten 275

14 Wisselstroommotoren 279

- 14.1 Synchrone draaistroommotor 280
- 14.2 Synchrone wisselstroommotor 284
- 14.3 ACPM-motoren 285
- 14.4 Asynchrone draaistroommotor 286
- 14.5 Asynchrone wisselstroommotor 292
- 14.6 Reluctantiemotor 293
- 14.7 Enkele belangrijke punten van motoren 296
- 14.8 Type en uitvoering 298
- 14.9 Om te onthouden 299
- Vragen en opdrachten 301

15 Schakelen van draaistroommotoren 305

- 15.1 Inschakelen met de hand 306
- 15.2 Inschakelen met een magneetschakelaar 306
- 15.3 Inschakelen met een ster-driehoekschakelaar 308
- 15.4 Inschakelen met een transformator 311
- 15.5 Inschakelen met smoorspoelen 312
- 15.6 Omkeerschakeling 313
- 15.7 Draaistroommotor als eenfase-motor 315
- 15.8 Poolomschakelbare draaistroommotoren 317
- 15.9 Softstarters 319
- 15.10 Om te onthouden 323
- Vragen en opdrachten 325

16 Frequentieregelaars 329

- 16.1 Toerenregeling van draaistroommotoren 330
- 16.2 Spanningsregeling 330
- 16.3 Frequentieregeling 331
- 16.4 Directe frequentieregelaar 333
- 16.5 Indirecte frequentieregelaar 336
- 16.6 Pulsamplitude-modulatie (PAM) 337
- 16.7 Pulsbreedte-modulatie (PWM) 340
- 16.8 Elektronische apparaten en EMC 343
- 16.9 Om te onthouden 348
- Vragen en opdrachten 350

17 Kleine bijzondere motoren 353

- 17.1 Schijfankermotor 354
- 17.2 Stappenmotor 357
- 17.3 Wisselstroomcommutatormotor (universeelmotor) 361
- 17.4 Borstelloze gelijkstroommotor 364
- 17.5 Synchrone wisselstroommotor 367
- 17.6 Lineaire motor 369
- 17.7 Om te onthouden 371
- Vragen en opdrachten 372

18 Veiligheidsaspecten 375

- 18.1 Aanrakingsgevaar 376
- 18.2 Beschermingsmaatregelen bij aanrakingsgevaar 377
- 18.3 Brandgevaar 380
- 18.4 Meten van isolatieweerstanden 381
- 18.5 Om te onthouden 386
- Vragen en opdrachten 387

19 Kathodische bescherming 391

- 19.1 Inleiding 392
- 19.2 Corrosie 393
- 19.3 Galvanische anoden 394
- 19.4 Externe gelijkspanningsbronnen 396
- 19.5 Om te onthouden 397
- Vragen en opdrachten 398

Bijlagen 400

Antwoorden 402

Geraadpleegde literatuur en illustratieverantwoording 406

Register 407

Over de auteurs 413



1

Elektrische energie

- 1.1** **Energietechniek**
- 1.2** **Energievormen**
- 1.3** **Energieoverdracht**
- 1.4** **Energietransport**
- 1.5** **Energieverliezen**
- 1.6** **Om te onthouden**

In dit hoofdstuk introduceren we het begrip elektrische energie. We gaan in op de verschillende aspecten van elektrische energie. We bespreken het toepassen van de mogelijkheden die de elektrische energie biedt (energietechniek). We laten zien welke verschillende energievormen er zijn. We maken duidelijk dat energie kan worden overgedragen en natuurlijk worden getransporteerd. Een transport dat gepaard gaat met energieverliezen.

1.1 Energietechniek

Elektriciteit

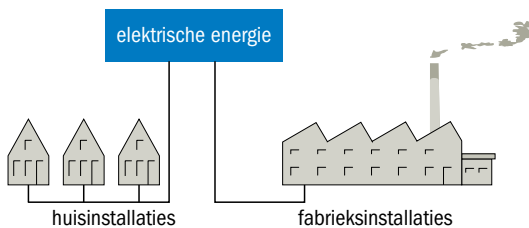
Vrijwel overal is elektriciteit aanwezig. Onze huizen zijn voorzien van elektrisch licht. De centrale verwarming kan niet werken zonder elektriciteit. De bromfiets en de auto hebben een elektrische installatie. Zonder elektriciteit zou het verkeer een chaos worden. Met andere woorden: elektriciteit heeft een onmisbare plaats ingenomen in de wereld van vandaag.

Elektrische energie

In de elektrotechniek gebruiken we elektrische energie (zie figuur 1.1).

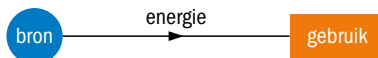
Elektrische energie is een begrip dat gekoppeld is aan het opwekken en gebruiken van elektriciteit.

FIGUUR 1.1 Het opwekken en gebruik van elektrische energie



Er is tegenwoordig een grote behoefte aan energie. Energie moet zo mogelijk overal beschikbaar zijn, op elk tijdstip en in elke hoeveelheid. Zie voor een schematische weergave figuur 1.2.

FIGUUR 1.2 Van bron naar gebruik



In het industriële proces van mechaniseren en automatiseren wordt de menselijke arbeid (energie) vervangen door andere vormen van energie, bijvoorbeeld door elektrische energie.

Elektrische energie is:

- gemakkelijk en snel te transporteren
- om te zetten in andere energievormen
- goed te regelen
- eenvoudig te meten
- schoon
- niet erg duur

Energietechniek

Het toepassen van de mogelijkheden die de elektrische energie biedt, noemen we elektrische energietechniek, of kortweg energietechniek. Deze mogelijkheden zijn talrijk, wat je alleen al ziet als je de verschillende energievormen bekijkt. Hierover gaat de volgende paragraaf.

1.2 Energievormen

De substantie waaruit alles bestaat noemen we materie. De gehele natuur van de wereld waarin we leven (alle vaste stoffen, vloeistoffen en gassen) is materie. Deze materie bevat energie. Steeds als er iets gebeurt, of het nu een natuurverschijnsel is of een technisch gebeuren, treedt er óf een omzetting van energie op óf is er een uitwisseling van energie.

We onderscheiden twee soorten energie (zie figuur 1.3):

- potentiële energie (energie van plaats)
- kinetische energie (energie van beweging)

Potentiële energie is de energie die in een voorwerp aanwezig is of opgeslagen is als gevolg van de plaats van dit voorwerp. Dat kan zijn een bijzondere situatie van een voorwerp of als er op een voorwerp kracht wordt uitgeoefend (denk hierbij aan een veer of een elastiek).

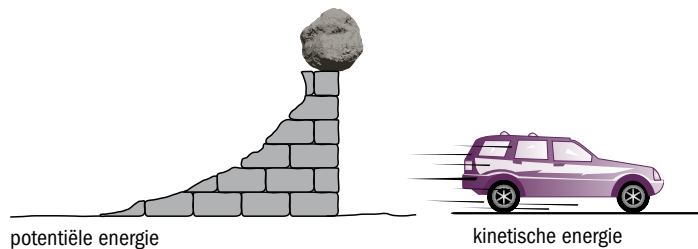
Kinetische energie is de energie die een voorwerp heeft doordat het beweegt. Deze energie is afhankelijk van hoe zwaar een voorwerp is en hoe snel het voorwerp beweegt.

Materie

Potentiële energie

Kinetische energie

FIGUUR 1.3 Potentiële en kinetische energie



Energie geeft ons de mogelijkheid iets te doen. Een bewegend voorwerp is ook in staat arbeid te verrichten. Steeds als we iets doen, of als er iets gebeurt, wordt er arbeid verricht en wordt er energie gebruikt. We kunnen dit ook omkeren: slechts dan kunnen we arbeid verrichten als er energie beschikbaar is.

Andere vormen van energie zijn:

- kernenergie
- chemische energie
- stralingsenergie
- thermische energie
- geluidsenergie
- zonne-energie
- windenergie
- waterkrachtenergie
- getijdenenergie
- mechanische energie

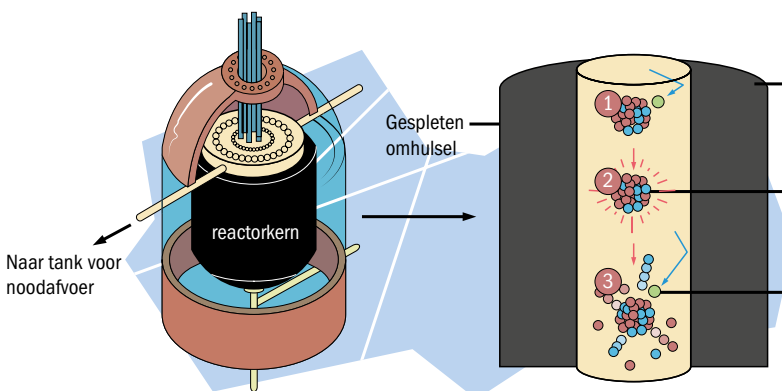
In de volgende paragrafen bekijken we de mogelijkheden om energie te gebruiken door het over te dragen van het ene materiaal naar het andere of om het te transporteren.

De belangrijkste energievormen voor de opwekking van elektrische energie in de lage landen zijn toch wel zonne-energie, windenergie en kernenergie. In Nederland wordt terecht heel veel waarde toegekend aan windenergie en begrijpelijk minder aan zonne-energie. In hoofdzaak voor kleine projecten is deze energie aantrekkelijk. De tijd en dus de ervaring zal naar verwachting uitwijzen dat men op den duur niet om kernenergie heen kan. Een eenvoudig rekensommetje laat zien dat alleen met windturbines niet aan alle energie-behoefte kan worden voldaan:

Eén gemiddelde conventionele kolencentrale heeft een vermogen van 600 MW. Een windturbine voor toepassing op land heeft een gemiddeld vermogen van 5 MW en dát dan nog bij een windsnelheid van ongeveer 12,5 m/s (45 km/u). Dit komt neer op een windkracht van 6 Beaufort. Om de genoemde kolencentrale te vervangen door windturbines betekent dat dus een windturbinepark met $600 : 5 = 120$ windturbines. Waarbij we dan voortdurend moeten kunnen rekenen op windkracht 6.

Door een verdere ontwikkeling van kernreactoren wordt het gebruik van kernenergie minder onaantrekkelijk en misschien zelfs noodzakelijk. Thorium als bron van nucleaire energie is schoner dan kolen en betrouwbaarder dan zon en wind. De thoriumreactor is in feite een kernreactor die werkt met een vloeibaar zoutmengsel en dus niet met solide staven. De belofte is zeker niet nieuw dat dit type reactor de toekomst heeft. De splijting van uraniumatomen vindt namelijk ook plaats in de thoriumreactor. Er wordt echter een ander soort, niet in de natuur aanwezig, uranium gebruikt dat betere eigenschappen heeft voor splijting, namelijk het isotoop U-233. Deze reactor produceert dit zelf als een thorium-atoomkern een losvliegend neutron opneemt. Het thorium verandert dan in uranium-233. Het uranium in de thoriumreactor moet per kern vijf neutronen opnemen voor de transmutatie naar plutonium, terwijl in de reeds jaren bestaande kernreactoren hiervoor slechts één neutron nodig is. Hierdoor ontstaat 1.000 tot 10.000 keer minder plutonium en dus veel minder langdurig radioactief kernafval. In de bestaande reactoren stroomt water langs de splijtstofstaven, waardoor het opwarmt. In een thoriumreactor stroomt het mengsel van koelvloeistof en splijtstof zelf via een blokgrafiet dat de neutronen goed weerkaatst en zo de reactie laat ontstaan. Zie figuur 1.4. Via een warmtewisselaar wordt de warmte doorgegeven naar de turbogenerator.

FIGUUR 1.4 Werking van een thoriumreactor

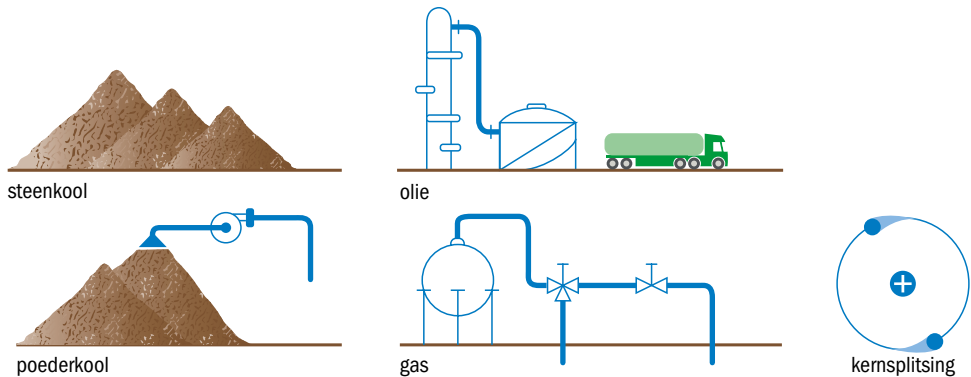


1.3 Energieoverdracht

In een elektriciteitscentrale wordt elektrische energie gemaakt. De grondstoffen die voor het opwekken van deze energie gebruikt kunnen worden zijn (zie figuur 1.5):

- steenkool
- poederkool
- olie
- gas
- splijtstof (uranium)

FIGUUR 1.5 Grondstoffen voor energie



De grondstof, bijvoorbeeld de olie, wordt verbrand. De gloeiende rookgasen die hierbij ontstaan, worden langs met water gevulde pijpen gevoerd. De gasen koelen af en de warmte wordt overgedragen aan het water. Het water verdampt en wordt stoom. Deze stoom wordt door nauwe straalpijpen geleid en spuit dan tegen een aantal schoepen van een turbineschijf. De turbine gaat draaien. De energie van de grondstof is omgezet in bewegingsenergie, met als tussenschakel de stoom. De turbine is verbonden met de as van een generator. Een combinatie van een turbine en een generator noemen we een turbogenerator.

De generator is nodig voor het verkrijgen van elektrische energie. De bewegingsenergie wordt dus weer omgezet in elektrische energie. Zoals te zien is in figuur 1.6 zetten de gebruikers van elektrische energie deze weer om in onder andere:

- licht
- geluid
- beweging
- warmte

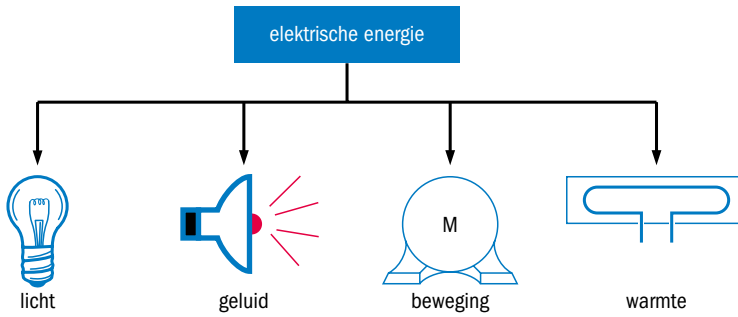
De volgorde van het proces is: grondstof – verbranding – beweging – elektriciteit. Tussen elke stap is er energieoverdracht. Naast overdracht moet de energie ook daadwerkelijk getransporteerd worden om bij de gebruiker te komen. Hierover gaat de volgende paragraaf.

Bewegings-
energie

Turbogenerator

Energieoverdracht

FIGUUR 1.6 Toepassingsvormen van energie



1.4 Energietransport

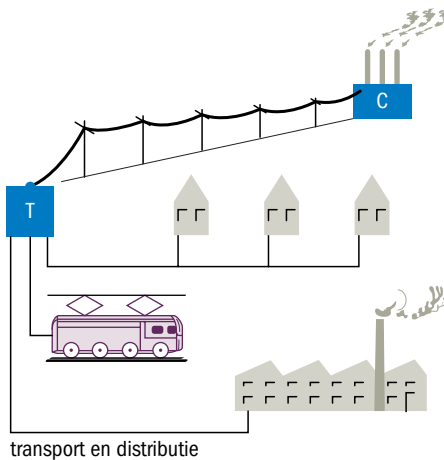
In de vorige paragrafen hebben we kunnen lezen hoe elektrische energie wordt gemaakt. De volgende stap is het transporteren van de energie naar de plek waar de energie nodig is. Dat gaat niet zomaar. In deze paragraaf gaan we hier nader op in. Termen als spanning, lading, stroom, energie en vermogen komen hierbij aan bod.

Spanning

Generator

In een generator wordt een elektrische spanning opgewekt. Deze spanning maakt het mogelijk de elektrische energie via een netwerk van bovengrondse leidingen en ondergrondse kabels te transporteren van de centrale (de generator) naar de gebruikers, zie ook figuur 1.7.

FIGUUR 1.7 Transport en distributie



Elektronen

Zeer kleine deeltjes (ook wel elementaire deeltjes), de elektronen, zorgen voor dit transport. Een elektron kan een onderdeel van een materiaal zijn (bijvoorbeeld in een atoom) of zich vrij in de ruimte bewegen. Bij het transport van elektrische energie is spanning de stuwende kracht.

Spanning is het verschil in elektrische potentiële energie tussen twee punten.

Een elektrische spanning kan veroorzaakt worden door een (combinatie van een) aantal factoren: een elektrisch veld, elektrische stroom door een magnetisch veld en door een magnetisch veld. De spanning is de voorwaarde voor een eventuele elektronenbeweging.

De eenheid van spanning is de volt.

We zeggen: een spanning U van ... volt.

We schrijven: $U = \dots \text{ V}$.

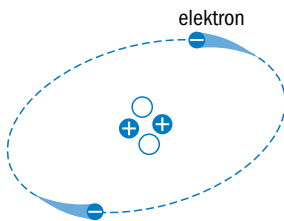
Bijvoorbeeld: $U = 230 \text{ V}$.

Volt

Lading

Elk elektron bevat eenzelfde hoeveelheid elektriciteit. Het is de kleinste hoeveelheid elektriciteit die bestaat. We zeggen: het elektron heeft een elektrische lading (zie figuur 1.8).

FIGUUR 1.8 Elektrische lading



De eenheid van lading is de coulomb.

We zeggen: een lading Q van ... coulomb.

We schrijven: $Q = \dots \text{ C}$.

Bijvoorbeeld: $Q = 124 \text{ C}$.

Coulomb

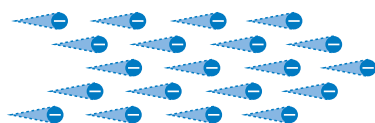
Stroom

Een elektrische stroom is een verplaatsing van veel negatief geladen elektro- nen (zie figuur 1.9).

Elektrische stroom

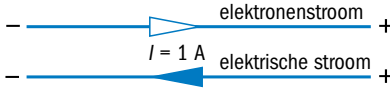
Elke *elektrische stroom* is een verplaatsing van lading onder invloed van het verschil in elektrische potentiële energie.

FIGUUR 1.9 Elektrische stroom



De richting van de elektrische stroom is per definitie van + naar -, en dus tegengesteld aan de bewegingsrichting van de elektronen, die negatief geladen zijn (zie figuur 1.10).

FIGUUR 1.10 De richting van elektrische stroom



Ampère

De eenheid van elektrische stroom is de ampère.

We zeggen: een stroom I van ... ampère.

We schrijven: $I = \dots$ A.

Bijvoorbeeld: $I = 10$ A.

Geleider

Een stroom is 1 A als er door de doorsnede van een geleider per seconde een lading van 1 C passeert (zie figuur 1.10).

En *geleider* is een materiaal of een voorwerp met een lage weerstand dat elektrische stroom doorlaat.

In formulevorm:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Of:

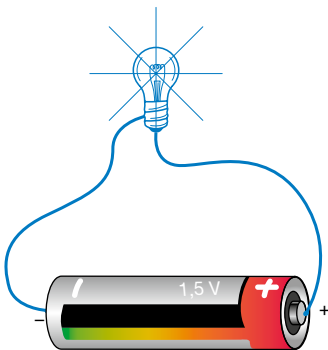
$$Q = It$$

Op de term 'weerstand' komen we terug in paragraaf 1.5 en in hoofdstuk 4.

VOORBEELD 1.1

Een batterij geeft 30 seconden een stroom van 0,5 A (zie figuur 1.11).
Hoeveel lading is er verplaatst?

FIGUUR 1.11 Elektrische stroom in een batterij



Gegeven: $I = 0,5$ A

$t = 30$ s

Gevraagd: Q

Oplossing: $Q = It = 0,5 \times 30$
 $= 15$ C

In de formule $Q = It$ kunnen we voor de tijd ook wel uren invullen.

We zeggen dan: de capaciteit Q is ... ampère-uur.

We schrijven: $Q = It = \dots \text{ Ah}$.

Bijvoorbeeld: $Q = 60 \text{ Ah}$.

Ampère-uur

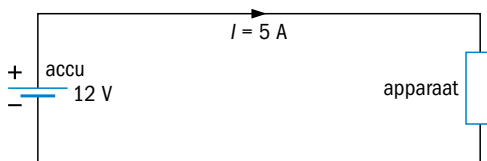
1

VOORBEELD 1.2

Een accu heeft een capaciteit van 40 Ah.

Hoe groot is de lading van de accu uitgedrukt in coulomb?

Hoelang kan de accu een stroom leveren van 5 A? Zie ook de schets in figuur 1.12.

FIGUUR 1.12 Energie van een accu

Gegeven: $Q = 40 \text{ Ah}$

$I = 5 \text{ A}$

Gevraagd: de lading in coulomb

de tijd

Oplossing: 1 uur is 3600 seconden

$40 \text{ Ah} = 40 \times 3600 = 144\,000 \text{ C}$

$$Q = It \text{ dus } t = \frac{Q}{I} = \frac{40}{5} = 8 \text{ uur}$$

Energie

De hoeveelheid elektrische energie die kan worden gebruikt of getransporteerd is recht evenredig met:

- de hoeveelheid lading (Q)
- de grootte van de spanning (U)

$$W = QU$$

Naarmate de lading groter is, wordt de energie groter. Maken we de spanning hoger, dan wordt de energie ook groter.

De eenheid van energie is de joule (spreek uit: 'zjoel').

We zeggen: de energie is ... joule.

We schrijven: $W = \dots \text{ J}$.

Bijvoorbeeld: $W = 3000 \text{ J}$.

Joule

We weten reeds dat: $Q = It$.

Dan geldt ook: $W = UI t$.

VOORBEELD 1.3

Een accu heeft een spanning van 12 V en geeft 8 uur lang een stroom van 5 A. Zie ook figuur 1.12.

Hoeveel energie geeft de accu af?

Gegeven: $U = 12 \text{ V}$

$f = 5 \text{ A}$

$t = 8 \text{ uur}$

Gevraagd: W

Oplossing: $W = UIt = 12 \times 5 \times 8 = 480 \text{ Wh} = 1\,728\,000 \text{ J}$

Is de hoeveelheid energie groot, dan gebruiken we vaak één van de volgende notaties:

kJ	(kilojoule)	kilo = k = 10^3
MJ	(megajoule)	mega = M = 10^6
kWh	(kilowattuur)	
MWh	(megawattuur)	

Als voorbeeld: $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J} = 1000 \text{ J}$.

Newtonmeter
Watt-seconden

Er zijn verschillende notaties voor de eenheid van energie, energie wordt ook uitgedrukt in newtonmeter (Nm) of in watt-seconden (Ws):

$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$.

Calorie

Een andere, wat verouderde, eenheid van energie is de calorie, afgekort cal. Omdat die eenheid heel klein is, wordt meestal gewerkt met de eenheid

Kilocalorie

kilocalorie, afgekort kcal. Er geldt dan: $1 \text{ kcal} = 4,2 \times 10^3 \text{ J}$.

VOORBEELD 1.4

Een generator in een centrale (zie figuur 1.13) heeft een spanning van 10 kV en geeft 24 uur per dag een stroom van 10 kA.

Hoeveel energie levert de generator per dag?

FIGUUR 1.13 Hal met turbogeneratoren



Gegeven: $U = 10\,000\text{ V}$

$I = 10\,000\text{ A}$

$t = 24\text{ uur}$

Gevraagd: W

Oplossing: $W = UI t = 10\,000 \times 10\,000 \times 24 = 2400\text{ MWh}$
 $= 8\,640\,000\text{ MJ}$

Vermogen

De energie die per seconde beschikbaar is noemen we het vermogen.
 De eenheid van het vermogen is watt, (joule/seconde).

Watt

$$W = UI t$$

$$P = UI$$

We zeggen: een vermogen P van ... watt.

We schrijven: $P = \dots\text{ W}$.

Bijvoorbeeld: $P = 5000\text{ W}$.

VOORBEELD 1.5

Een elektromotor (zie figuur 1.14) is aangesloten op een spanning van 230 V en neemt een stroom op van 5 A.

Hoe groot is het aan de motor toegevoerde vermogen?

FIGUUR 1.14 Elektromotor



Gegeven: $U = 230\text{ V}$

$I = 5\text{ A}$

Gevraagd: P

Oplossing: $P = UI = 230 \times 5 = 1150\text{ W}$

1.5 Energieverliezen

Bij energie-overdracht en bij energietransport gaat er energie ‘verloren’. Echt verloren gaan kan natuurlijk niet volgens de wet van behoud van energie. We bedoelen met ‘verloren’: het komt niet beschikbaar voor het doel waarvoor het bestemd is. In deze paragraaf gaan we hier nader op in. Termen als weerstand, de Wet van Ohm, rendement en koppel komen aan de orde.

Weerstand

Bij het transport van elektrische energie, gaat er door de leidingen een stroom (zie figuur 1.15). Alle materialen bieden weerstand aan deze stroomdoorgang, het ene meer, het andere minder.

Weerstand

Weerstand is de eigenschap van bepaalde materialen die aangeeft hoe goed of hoe slecht een stroom door het materiaal kan gaan.

FIGUUR 1.15 Energietransport



Materialen die de stroom goed geleiden, zoals koper, hebben een lage weerstand. Isolatiematerialen hebben een zeer hoge weerstand. Elke geleider heeft weerstand, evenals elk toestel of apparaat en elke machine.

Ohm

De eenheid van weerstand is de ohm.
We zeggen: een weerstand R van ... ohm.
We schrijven: $R = \dots \Omega$.
Bijvoorbeeld: $R = 12 \Omega$.

Geleidbaarheid

Neemt de weerstand toe, dan wordt de stroom kleiner. De geleidbaarheid wordt dan minder.

Elektrische geleiding is het transport van elektrische energie.

Geleidbaarheid is het gemak waarmee de elektrische geleiding verloopt.

De geleidbaarheid G is omgekeerd evenredig met de weerstand R .

$$R \cdot G = 1$$

De eenheid van geleidbaarheid is de siemens.

We zeggen: een geleidbaarheid G van ... siemens.

We schrijven: $G = \dots \text{ S}$.

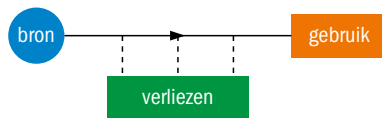
Bijvoorbeeld: $G = 0,002 \text{ S}$.

Siemens

Een deel van de energie gaat tijdens het energietransport 'verloren' in de geleiders. We noemen dat de energieverliezen van het transport (zie figuur 1.16).

Energieverliezen

FIGUUR 1.16 Schematische weergave van energietransport



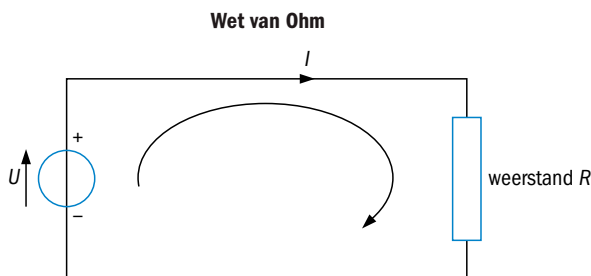
De energieverliezen moeten zo klein mogelijk zijn en daarom wordt de spanning vóór het transport omhoog getransformeerd naar 10 kV, 150 kV, 230 kV of 400 kV en ná het transport omlaag getransformeerd, eerst naar 10 kV en dicht bij de gebruikers naar 400/230 V.

Wet van Ohm

In een gesloten stroomkring neemt de stroom evenredig toe met de grootte van de aangelegde spanning (zie figuur 1.17).

Gesloten stroomkring

FIGUUR 1.17 Een gesloten stroomkring



De verhouding tussen die spanning en die stroom is de weerstand van de stroomkring.

In formulevorm:

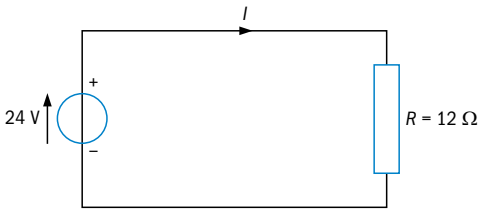
$$R = \frac{U}{I} \text{ Dit is de wet van Ohm.}$$

$$\text{Uit } R = \frac{U}{I} \text{ volgt: } U = IR \text{ en } I = \frac{U}{R}$$

VOORBEELD 1.6

Hoe groot is de stroom in figuur 1.18?

FIGUUR 1.18a Gesloten stroomkring



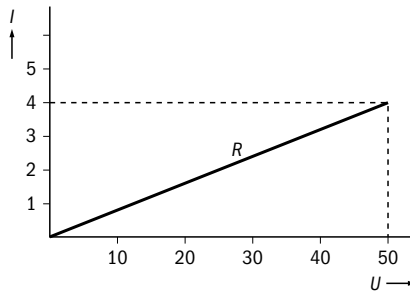
Gegeven: $U = 24 \text{ V}$

$R = 12 \Omega$

Gevraagd: I

Oplossing: $I = \frac{U}{R} = \frac{24}{12} = 2 \text{ A}$

FIGUUR 1.18b De afhankelijkheid tussen I , R en U



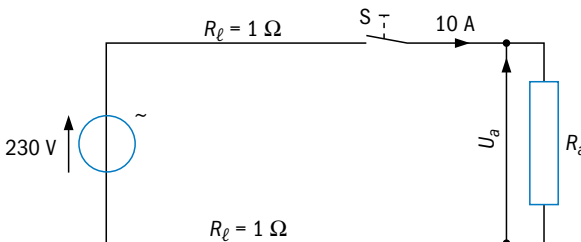
Nemen we een spanning van 12 V, dan is de stroom 1 A en bij een spanning van 48 V wordt de stroom 4 A.

VOORBEELD 1.7

Zie figuur 1.19.

- Hoe groot is het spanningsverlies U_v in de leidingen?
- Hoe groot is de spanning U_a ?
- Hoe groot is de weerstand R_a van het apparaat?

FIGUUR 1.19 Voorbeeld van een stroomkring



Opmerking: In figuur 1.19 staat de schakelaar 'open'. Dat kan bij 230 V gevaarlijk zijn, dus de contacten van S niet aanraken!

Gegeven: $U = 230 \text{ V}$

$$R_1 = 1 \Omega$$

$$I = 10 \text{ A}$$

Gevraagd: U_v ; U_a en R_a

Oplossing: Let op: $U_v = I \times 2R_1 = 10 \times 2 \times 1 = 20 \text{ V}$

Dan is: $U_a = 230 - 20 = 210 \text{ V}$

$$R_a = \frac{U_a}{I} = \frac{210}{10} = 21 \Omega$$

Het kan ook anders. Hoe? Probeer dat zelf eens te vinden!

In een gesloten stroomkring zijn steeds:

- energieverliezen (afhankelijk van de tijd)
- spanningsverliezen (niet afhankelijk van de tijd)

Uit: $U = IR$
 $P = UI$ volgt: $P = I^2 R$

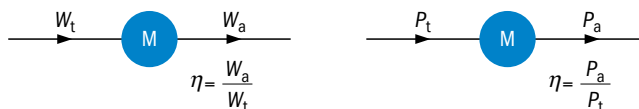
Uit: $U = IR$
 $W = UI t$ volgt: $W = I^2 R t$

Rendement

De verhouding tussen de energie na het transport en voor het transport noemen we het rendement van het energietransport (figuur 1.20).

Rendement

FIGUUR 1.20 Rendement



De eenheid van het rendement is onbepaald.

We zeggen: het rendement η is ...

We schrijven: $\eta = \dots$

Bijvoorbeeld: $\eta = 0,85$.

Het rendement is een onbenoemd getal dat altijd kleiner is dan één. We kunnen het rendement ook in procenten uitdrukken door het getal te vermenigvuldigen met 100%. Bijvoorbeeld: $\eta = 0,85 \times 100\% = 85\%$.

Toegevoegde
vermogen

Het toegevoegde vermogen, het vermogen voor transport, noemen we P_t , het afgegeven vermogen, het vermogen na transport, P_a (zie figuur 1.20).

Afgegeven
vermogen

VOORBEELD 1.8

Een motor heeft een rendement van 0,82. Het toegevoerde vermogen is 5.000 W.

Hoe groot is het afgegeven vermogen van de motor?

$$\text{Gegeven: } P_t = 5000 \text{ W} \\ \eta = 0,82$$

$$\text{Gevraagd: } P_a$$

$$\text{Oplossing: } \eta = \frac{P_a}{P_t} \text{ dus } P_a = \eta P_t = 0,82 \times 5000 = 4100 \text{ W}$$

(Op het kenplaatje van een motor staat altijd het afgegeven vermogen P_a .)

Koppel

Een elektromotor zet de toegevoerde elektrische energie om in een draaiende beweging van de as van de motor, dus in mechanische energie. Hoeveel energie de as kan afgeven, wordt bepaald door het askoppel T_{as} . De grootte van dit koppel is afhankelijk van:

- het afgegeven vermogen P_a
- de hoeksnelheid ω

Hoeksnelheid

Hierbij is de hoeksnelheid de verandering in de tijd van de hoek die doorlopen wordt bij het ronddraaien (de *rotatie*) van de as. De eenheid van de hoeksnelheid is radialen per seconde. De hoeksnelheid wordt ook wel rotatiesnelheid genoemd.

Radialen**Rotatiesnelheid**

In formulevorm:

$$T_{as} = \frac{P_a}{\omega} = \frac{P_a}{2\pi n/60} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_a}{n}$$

$$T_{as} = 9,55 \cdot \frac{P_{as}}{n} \text{ Nm}$$

VOORBEELD 1.9

Van een motor is bekend:

$$P_a = 4100 \text{ W}, \\ n = 3000 \text{ omw/min}$$

Het koppel is dan:

$$T_{as} = 9,55 \cdot \frac{4100}{3000}$$

$$T_{as} = 13 \text{ Nm.}$$

1.6 Om te onthouden

In dit hoofdstuk legden we uit wat elektrische energie is, hoe we het kunnen maken en transporteren, en wat er allemaal bij het transport komt kijken. Hierna volgt een overzicht van in dit hoofdstuk gebruikte symbolen en formules.

U	= spanning	volt	V
I	= stroom	ampère	A
R	= weerstand	ohm	Ω
W	= energie	joule	J
P	= vermogen	watt	W
η	= rendement	–	–
n	= toerental	omw/min	
T_{as}	= as-koppel	Nm	

$$Q = It$$

$$U = IR$$

$$W = QU = UIt = I^2 Rt$$

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

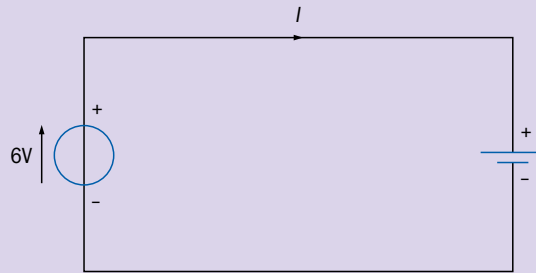
$$\eta = \frac{W_a}{W_t} = \frac{P_a}{P_t} \quad T_{\text{as}} = 9,55 \frac{P_a}{n}$$

Vragen en opdrachten

1

-
- 1.1** In welke twee hoofdgroepen splitst men energie?
- 1.2** Welke voordelen heeft elektrische energie?
- 1.3** Geef aan wat we verstaan onder:
- a** energie-overdracht
 - b** energietransport
 - c** energieverliezen
- 1.4** Hoe luidt de Wet van Ohm?
- 1.5** Geef aan wat we verstaan onder:
- a** de capaciteit van een accu
 - b** het rendement van een motor
- 1.6** Geef aan hoeveel we onder het volgende verstaan:
- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| a ... C = 40 Ah | e ... Nm = 0,02 MWh |
| b ... J = 16 kWh | f ... Nm = 1 kWh |
| c ... J = 25 kWh | g ... kWh = 9 MJ |
| d ... Ah = 72 000 C | h ... MWh = 4320 MJ |
- 1.7** Door een draad gaat een stroom van 10 A.
Hoeveel tijd is er nodig om 100 C door de doorsnede van de draad te verplaatsen?
- 1.8** Een accu wordt geladen. Zie figuur 1.21.
De stroom is gedurende 1 uur 4 A, daarna gedurende 1 uur 3 A, 1 uur 2 A en 1 uur 1 A.
De accu is nu volgeladen.
- a** Hoeveel lading is aan de accu toegevoerd?
 - b** Hoe groot is de capaciteit van de accu?

FIGUUR 1.21 Laden van een accu



- 1.9** Een weerstand van 12 ohm wordt op een spanning van 6 V aangesloten.
- Hoe groot wordt de stroom door de weerstand?
 - Hoe groot is het vermogen dat de weerstand moet kunnen opnemen?
- 1.10**
- Hoe groot is de stroom door een weerstand van 10Ω , aangesloten op een batterij van 4,5 V?
 - Hoe groot is het vermogen dat de weerstand moet opnemen?
 - Hoeveel energie geeft de batterij af in 5 minuten?
- 1.11** Een soldeerbout voor 230 V heeft een vermogen van 55 W (zie figuur 1.22). Bereken de weerstand van de soldeerbout.

FIGUUR 1.22 Soldeerbout 55 W



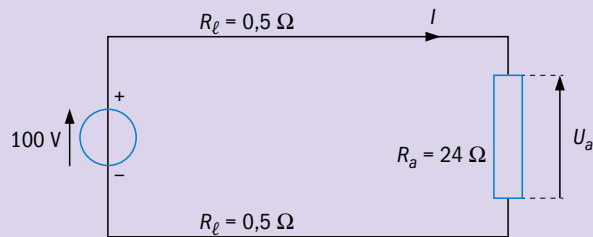
- 1.12**
- Hoe groot is de stroom door een gloeilamp van 115 W, 230 V?
 - Hoe groot is de stroom door een ledlamp van 23 W, 230 V?
 - Bereken ook de weerstand van de gloeilamp van 115 W, 230 V (zie figuur 1.23).
 - Bereken ook de weerstand van de ledlamp van 23 W, 230 V (zie figuur 1.23).

FIGUUR 1.23 Gloeilamp 100 W of LED-lamp 23 W



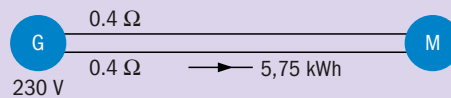
- 1.13** Een elektrische straalkachel, geschikt voor 230 V, heeft een vermogen van 1,1 kW.
Hoeveel stroom neemt deze kachel op?
- 1.14** Een apparaat met een weerstand van 46Ω is aangesloten op een spanning van 230 V.
a Hoeveel energie krijgt het apparaat in een uur toegevoerd?
b Hoe groot is het vermogen dat het apparaat moet kunnen opnemen?
- 1.15** Een elektrische oven voor 230 V neemt een stroom van 20 A op.
a Bereken het vermogen van de oven.
b Bereken de energie die de oven in 4 uur gebruikt.
- 1.16** Een waterkoker voor 230 V heeft een nuttig vermogen van 660 W en een rendement van 0,75.
Hoe groot is de stroom in de leidingen?
- 1.17** Van een generator is gegeven: $U = 230 \text{ V}$, $I = 120 \text{ A}$.
Hoelang moet de generator in bedrijf zijn om bij de gegeven spanning en stroom 86.400 MJ te leveren?
- 1.18** Op de motor van een kolomboormachine staat:
 $U = 230 \text{ V}$, $P = 3,3 \text{ kW}$, $\eta = 0,8$ en $n = 1500 \text{ omw/min}$.
Bereken de stroom door de motor en het askoppel.
- 1.19** De schakelaar in figuur 1.19 wordt 10 min gesloten.
Hoe groot is het energieverlies in de leidingen?
- 1.20** Bekijk figuur 1.24 en geef antwoord op de volgende vragen:
a Hoe groot is de stroom?
b Hoe groot is de spanning op het apparaat?
c Hoe groot is het spanningsverlies in de leidingen?
d Hoe groot is het energieverlies in de leidingen per uur?
e Hoe groot is het vermogen dat het apparaat moet opnemen?

FIGUUR 1.24 Voorbeeld van een stroomkring



- 1.21** Een generator met een spanning van 230 V levert via een lange twee-aderige kabel per uur 5,75 kWh aan een motor. De beide aders van de kabel hebben elk een weerstand van $0,4 \Omega$ (zie figuur 1.25).
- Hoe groot is de spanning waarop de motor is aangesloten?
 - Hoe groot is het energierendement?

FIGUUR 1.25 Generator



- 1.22** Een motor heeft een rendement van 0,85. Het afgegeven vermogen is 4488 W. De spanning is 230 V. Bereken de stroom door de motor.
- 1.23** Een motor, met een rendement van 80%, drijft een hijswerktuig aan. Het totale rendement is 0,48. Hoe groot is het rendement van het hijswerktuig?
- 1.24** Van een motor is het toegevoerde vermogen 3 kW. Het toerental is 955. Het rendement is 0,8. Bereken het askoppel.
- 1.25** Een motor voor 230 V heeft een askoppel van 13,5 Nm. Het toerental is 1500 en het rendement is 80%. Bereken de stroom door de motor.
- 1.26** Een verlengsnoer bestaat uit een haspel met daarop 50 m snoer, $R_{\text{snoer}} = 2,333 \Omega$. Hoe groot is het vermogensverlies in het snoer bij een stroom van 6 A en bij 10 A?
Conclusie: bij grotere stromen moet het snoer voor een betere koeling altijd van de haspel worden gerold.