

Elektrotechniek

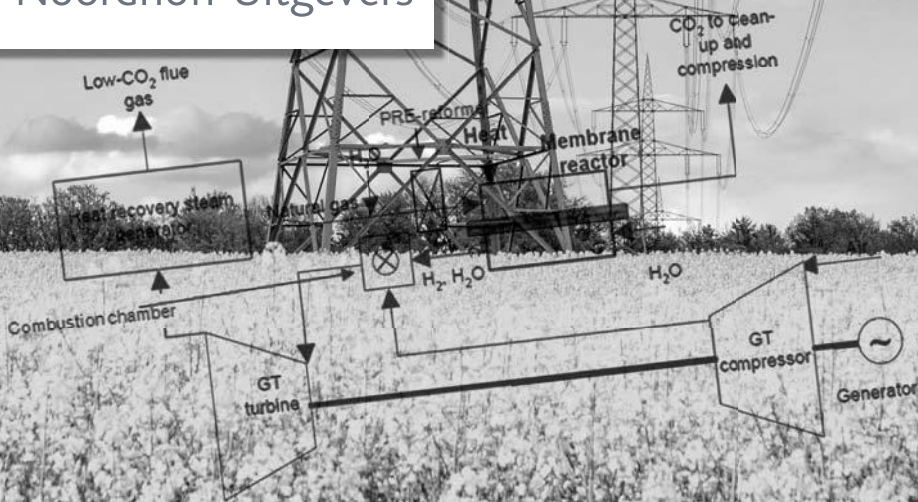
voor werktuigbouwkundigen en andere technici

Reuwke van Hoek, Leo Scheltinga

Vijfde druk



Noordhoff Uitgevers



Elektrotechniek

voor werktuigbouwkundigen
en andere technici

Reuwke van Hoek

Leo Scheltinga

Vijfde druk

Noordhoff Uitgevers Groningen/Houten

Ontwerp omslag: Getty Images, Amsterdam

Omslagillustratie: Rocket Industries

Eventuele op- en aanmerkingen over deze of andere uitgaven kunt u richten aan:
Noordhoff Uitgevers bv, Afdeling Hoger Onderwijs, Antwoordnummer 13,
9700 VB Groningen, e-mail: info@noordhoff.nl

Met betrekking tot sommige teksten en/of illustratiemateriaal is het de uitgever, ondanks zorgvuldige inspanningen daartoe, niet gelukt eventuele rechthebbende(n) te achterhalen. Mocht u van mening zijn (auteurs)rechten te kunnen doen gelden op teksten en/of illustratiemateriaal in deze uitgave dan verzoeken wij u contact op te nemen met de uitgever.



0 / 15

© 2015 Noordhoff Uitgevers bv Groningen/Houten, The Netherlands.

Behoudens de in of krachtens de Auteurswet van 1912 gestelde uitzonderingen mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever. Voor zover het maken van reprografische verveelvoudigingen uit deze uitgave is toegestaan op grond van artikel 16h Auteurswet 1912 dient men de daarvoor verschuldigde vergoedingen te voldoen aan Stichting Reprorecht (postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.reprorecht.nl). Voor het overnemen van gedeelte(n) uit deze uitgave in bloemlezingen, readers en andere compilatiewerken (artikel 16 Auteurswet 1912) kan men zich wenden tot Stichting PRO (Stichting Publicatie- en Reproductierechten Organisatie, postbus 3060, 2130 KB Hoofddorp, www.stichting-pro.nl).

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

ISBN (ebook) 978 90 01 85662 5

ISBN 978 90 01 83676 4

NUR 123

Woord vooraf bij de herziene vijfde 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. De leerstof elektrotechniek van de afdeling werktuigbouwkunde van de mts is hierbij het uitgangspunt geweest. In de hoofdstukken 1 tot en met 8 is overwegend aandacht besteed aan een elektrokundige basis. De hoofdstukken 9 tot en met 19 zijn gericht op een aantal toepassingen en situaties waarmee werktuigbouwkundigen regelmatig geconfronteerd worden. Om de belangstelling voor de elektrotechniek van de zijde van de niet-elektrotechnici te stimuleren, is getracht een afschrik-effect als gevolg van een veelheid van formules te voorkomen. 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 vijfde 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 onderbouw van het hoger beroepsonderwijs, avondopleidingen en bedrijfs cursussen. Bij deze herziening, tevens upgrading, is het oorspronkelijke karakter van *Elektrotechniek voor werktuigbouwkundigen* voor aansluiting bij het leerplan van het mbo, dus voor het gebruik in het middelbaar beroepsonderwijs, ofwel de mts, zeker niet verloren gegaan.

De vele voorbeelden met uitwerkingen en een antwoordenlijst maken het boek ook geschikt voor zelfstudie.

De gewijzigde volgorde van de hoofdstukken en de vele aanvullingen van de tekst maken het vrijwel onmogelijk deze druk samen met een vorige druk klassikaal te gebruiken.

Voorjaar 2015

Assen, R.W. van Hoek

Zutphen, L. Scheltinga

Inhoud

1 Elektrische energie 11

- 1.1 Energietechniek 12
- 1.2 Energievormen 13
- 1.3 Energieoverdracht 14
- 1.4 Energietransport 15
- 1.5 Energieverliezen 21
- 1.6 Om te onthouden 26
- Vragen en opdrachten 27

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 70
- 3.4 Om te onthouden 72
- Vragen en opdrachten 73

4 Weerstand 75

- 4.1 Weerstand en soortelijke weerstand 76
- 4.2 Weerstand en materialen 76
- 4.3 Temperatuurcoëfficiënt 79
- 4.4 Belastbaarheid van weerstanden 80
- 4.5 Speciale weerstanden 81
- 4.6 Om te onthouden 83
- Vragen en opdrachten 84

5 Schakelingen 87

- 5.1 Stroomkringen 88
- 5.2 Serieschakeling van weerstanden 88
- 5.3 Parallelschakeling van weerstanden 91
- 5.4 Gemengde schakeling van weerstanden 94
- 5.5 Serie- en parallelschakeling van spanningsbronnen 94
- 5.6 De wetten van Kirchhoff 95
- 5.7 Spanningsbronnen en stroombronnen 98
- 5.8 Om te onthouden 105
- [Vragen en opdrachten 107](#)

6 Magnetisme en inductie 113

- 6.1 Magnetisme en magnetische inductie 114
- 6.2 Elektromagnetisme en elektrische inductie 117
- 6.3 Wervelstromen 124
- 6.4 Elektromagnetische en elektrodynamische krachtwerking 125
- 6.5 Om te onthouden 126
- [Vragen en opdrachten 127](#)

7 Transformatoren 131

- 7.1 Het transformatorprincipe 132
- 7.2 Draaistroomtransformator 136
- 7.3 Lastransformatoren 139
- 7.4 Beschermingstransformator en veiligheidstransformator 142
- 7.5 Om te onthouden 143
- [Vragen en opdrachten 144](#)

8 Spoel en condensator 147

- 8.1 Spoel op wisselspanning 148
- 8.2 Condensator op gelijkspanning 153
- 8.3 Condensator op wisselspanning 158
- 8.4 Weerstand en zelfinductie 160
- 8.5 Weerstand en capaciteit 161
- 8.6 Draaistroomschakelingen 163
- 8.7 Om te onthouden 166
- [Vragen en opdrachten 168](#)

9 De elektrische installatie 173

- 9.1 Energievoorziening 174
- 9.2 Aarding 178
- 9.3 Verdeelsystemen, schakelkasten en panelen 181
- 9.4 Beveiliging 184
- 9.5 Verlichting 186
- 9.6 Toepassing ledverlichting 187
- 9.7 Om te onthouden 188
- [Vragen en opdrachten 189](#)

10 **Halfgeleiders en hun toepassingen** 193

- 10.1 Diode 194
- 10.2 Transistor 197
- 10.3 Thyristor 198
- 10.4 Triac 199
- 10.5 Diac 202
- 10.6 Om te onthouden 205
Vragen en opdrachten 206

11 **Sensoren** 209

- 11.1 Sensortechniek 210
- 11.2 Inductieve afstandssensor 211
- 11.3 Magneto-inductieve verplaatsingssensor 215
- 11.4 Capacitieve sensor 217
- 11.5 Schakelafstand 219
- 11.6 Foto-elektrische afstandssensor 220
- 11.7 Magnetostrictieve verplaatsingssensor 224
- 11.8 Monteren en inbouwen 228
- 11.9 Basisschakelingen 228
- 11.10 Logische schakelingen 230
- 11.11 Om te onthouden 231
Vragen en opdrachten 233

12 **Meettechniek** 235

- 12.1 Analoge en digitale meetinstrumenten 236
- 12.2 Gebruik van meetinstrumenten 241
- 12.3 Toepassingen van meetinstrumenten 244
- 12.4 Om te onthouden 250
Vragen en opdrachten 251

13 **Gelijkstroommachines** 253

- 13.1 Functioneren en indeling van gelijkstroommachines 254
- 13.2 Het generatorprincipe 254
- 13.3 Het motorprincipe 257
- 13.4 Shuntgenerator 260
- 13.5 Compoundgenerator 261
- 13.6 De motor met afzonderlijke (vreemde) bekrachtiging 262
- 13.7 Shuntmotor 264
- 13.8 Seriemotor 265
- 13.9 Compoundmotor 266
- 13.10 Toerenregeling 267
- 13.11 Om te onthouden 268
Vragen en opdrachten 270

14 **Wisselstroommotoren** 273

- 14.1 Synchrone draaistroommotor 274
- 14.2 Synchrone wisselstroommotor 278
- 14.3 Asynchrone draaistroommotor 279

- 14.4 Asynchrone wisselstroommotor 284
- 14.5 Enkele belangrijke punten van motoren 285
- 14.6 Type en uitvoering 287
- 14.7 Om te onthouden 288
- [Vragen en opdrachten 289](#)

15 Schakelen van draaistroommotoren 293

- 15.1 Inschakelen met de hand 294
- 15.2 Inschakelen met een magneetschakelaar 294
- 15.3 Inschakelen met een ster-driehoekschakelaar 296
- 15.4 Inschakelen met een transformator 299
- 15.5 Inschakelen met smoorspoelen 300
- 15.6 Omkeerschakeling 301
- 15.7 Draaistroommotor als eenfase-motor 303
- 15.8 Poolomschakelbare draaistroommotoren 305
- 15.9 Softstarters 307
- 15.10 Om te onthouden 311
- [Vragen en opdrachten 313](#)

16 Frequentieregelaars 317

- 16.1 Toerenregeling van draaistroommotoren 318
- 16.2 Spanningsregeling 318
- 16.3 Frequentieregeling 319
- 16.4 Directe frequentieregelaar 321
- 16.5 Indirecte frequentieregelaar 324
- 16.6 Pulsamplitude-modulatie (PAM) 325
- 16.7 Pulsbreedte-modulatie (PWM) 328
- 16.8 Elektronische apparaten en EMC 331
- 16.9 Om te onthouden 336
- [Vragen en opdrachten 338](#)

17 Kleine bijzondere motoren 341

- 17.1 Schijfankermotor 342
- 17.2 Stappenmotor 345
- 17.3 Wisselstroomcommutatormotor (universeelmotor) 349
- 17.4 Borstelloze gelijkstroommotor 352
- 17.5 Synchrone wisselstroommotor 355
- 17.6 Lineaire motor 356
- 17.7 Om te onthouden 358
- [Vragen en opdrachten 359](#)

18 Veiligheidsaspecten 363

- 18.1 Aanrakingsgevaar 364
- 18.2 Beschermingsmaatregelen bij aanrakingsgevaar 365
- 18.3 Brandgevaar 368
- 18.4 Meten van isolatieweerstanden 368
- 18.5 Om te onthouden 373
- [Vragen en opdrachten 374](#)

19 Kathodische bescherming 377

- 19.1 Inleiding 378
 - 19.2 Corrosie 379
 - 19.3 Galvanische anoden 380
 - 19.4 Externe gelijkspanningsbronnen 382
 - 19.5 Om te onthouden 383
- Vragen en opdrachten 384

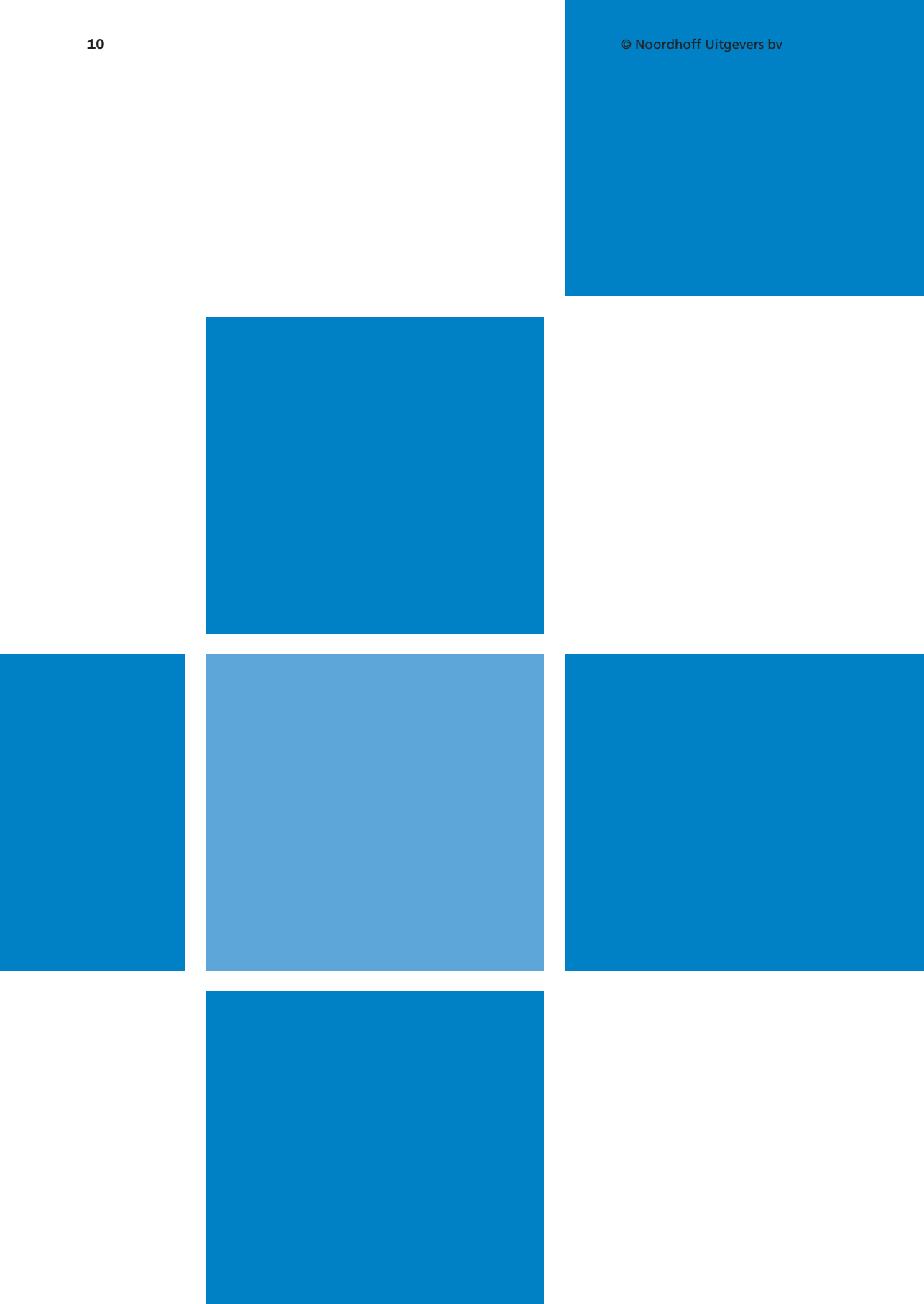
Bijlagen 386

Antwoorden 388

Geraadpleegde literatuur en illustratieverantwoording 392

Register 393

Over de auteurs 399



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

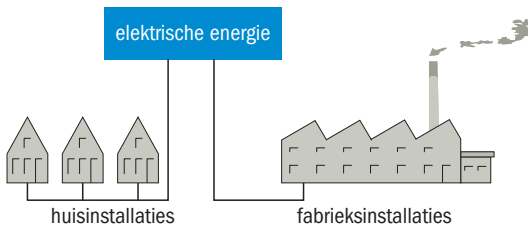
Vrijwel overal is elektriciteit aanwezig. Onze huizen zijn voorzien van elektrisch licht. De centrale verwarming kan niet werken zonder elektriciteit. De bromfiets en de auto hebben een elektrische installatie. Zonder elektriciteit zou het verkeer een chaos worden. Met andere woorden: elektriciteit heeft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

Elektrische energie

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

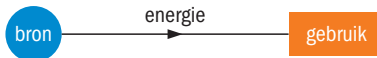
Elektrische energie is een begrip dat gekoppeld is aan het opwekken en gebruiken van elektriciteit.

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).

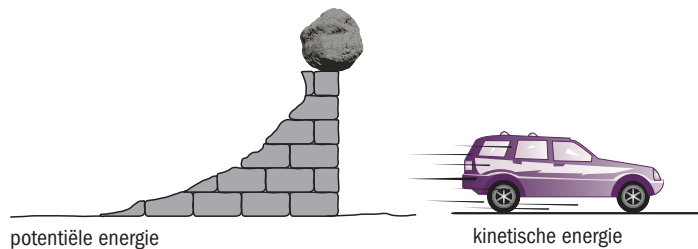
Kinetische energie is de energie die een voorwerp heeft doordat het beweegt. Deze energie is afhankelijk van hoe zwaar een voorwerp is en hoe snel het voorwerp beweegt.

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

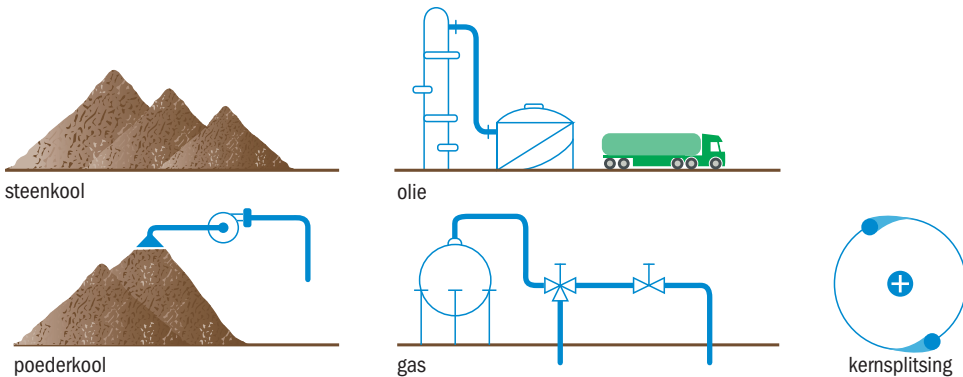
In de volgende paragrafen bekijken de mogelijkheden om energie te gebruiken door het over te dragen van het ene materiaal naar het andere of om het te transporteren.

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 1.4):

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

FIGUUR 1.4 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.

Bewegings-energie

Turbogenerator

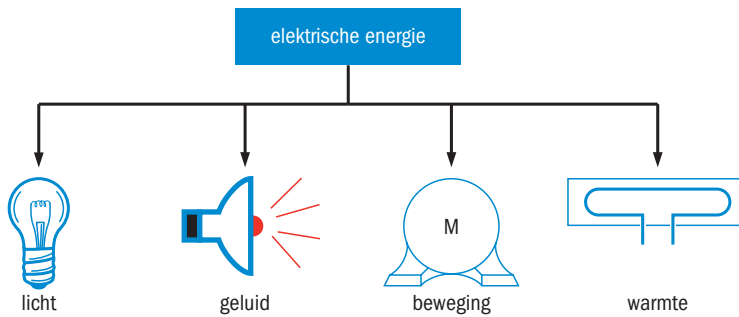
De generator is nodig voor het verkrijgen van elektrische energie. De bewegingsenergie wordt dus weer omgezet in elektrische energie. Zoals te zien is in figuur 1.5 zetten de gebruikers van elektrische energie deze weer om in onder andere:

- licht
- geluid
- beweging
- warmte

Energieoverdracht

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.

FIGUUR 1.5 Toepassingsvormen van energie



1.4 Energietransport

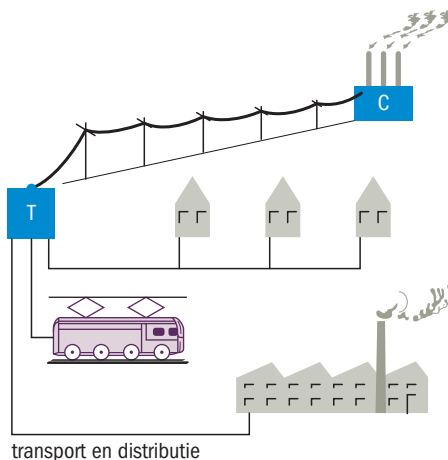
In de vorige paragrafen hebben we kunnen lezen hoe elektrische energie wordt gemaakt. De volgende stap is het transporteren van de energie naar de plek waar de energie nodig is. Dat gaat niet zomaar. In deze paragraaf gaan we hier nader op in. Termen als spanning, lading, stroom, energie en vermogen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

Spanning

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 1.6.

Generator

FIGUUR 1.6 Transport en distributie



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.

Elektronen

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.

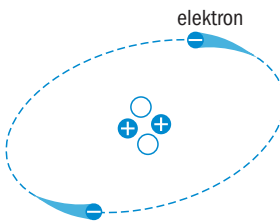
Volt

De eenheid van spanning is de volt.
 We zeggen: een spanning U van ... volt.
 We schrijven: $U = \dots \text{ V}$.
 Bijvoorbeeld: $U = 230 \text{ V}$.

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 1.7).

FIGUUR 1.7 Elektrische lading



Coulomb

De eenheid van lading is de coulomb.
 We zeggen: een lading Q van ... coulomb.
 We schrijven: $Q = \dots \text{ C}$.
 Bijvoorbeeld: $Q = 124 \text{ C}$.

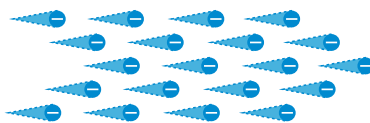
Stroom

Elektrische stroom

Een elektrische stroom is een verplaatsing van veel negatief geladen elektronen (zie figuur 1.8).

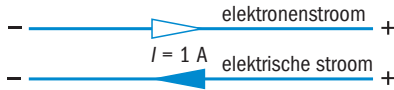
Elke *elektrische stroom* is een verplaatsing van lading onder invloed van het verschil in elektrische potentiële energie.

FIGUUR 1.8 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 1.9).

FIGUUR 1.9 De richting van elektrische stroom



De eenheid van elektrische stroom is de ampère.

Ampère

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

We schrijven: $I = \dots \text{ A}$.

Bijvoorbeeld: $I = 10 \text{ A}$.

Een stroom is 1 A als er door de doorsnede van een geleider per seconde een lading van 1 C passeert (zie figuur 1.9).

Geleider

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

In formulevorm:

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

Of:

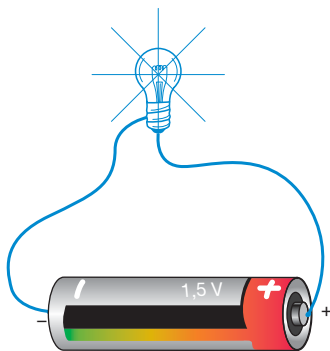
$$Q = It$$

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 1.10). Hoeveel lading is er verplaatst?

FIGUUR 1.10 Elektrische stroom in een batterij



Gegeven: $I = 0,5 \text{ A}$

$t = 30 \text{ s}$

Gevraagd: Q

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

Ampère-uur

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

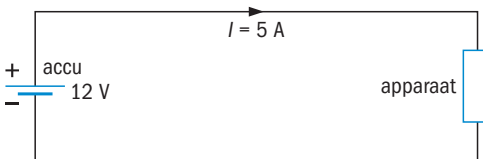
VOORBEELD 1.2

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 1.11.

FIGUUR 1.11 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.

Joule

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

We zeggen: de energie is ... joule.

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

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

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 1.11.
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: $1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J} = 1000 \text{ J}$.

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

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

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

Newtonmeter
Watt-seconden

Calorie

Kilocalorie

VOORBEELD 1.4

Een generator in een centrale (zie figuur 1.12) 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 1.12 Hal met turbogeneratoren



Gegeven: $U = 10\,000\text{ V}$
 $I = 10\,000\text{ A}$
 $t = 24\text{ uur}$

Gevraagd: W

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

Vermogen

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

Watt

$$W = UIt$$

$$P = UI$$

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 1.13) 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 1.13 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 1.14). 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 1.14 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.

De eenheid van weerstand is de ohm.

We zeggen: een weerstand R van ... ohm.

We schrijven: $R = \dots \Omega$.

Bijvoorbeeld: $R = 12 \Omega$.

Ohm

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

Geleidbaarheid

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 .

$$R \cdot G = 1$$

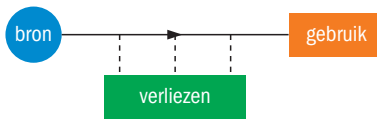
Siemens

De eenheid van geleidbaarheid is de siemens.
We zeggen: een geleidbaarheid G van ... siemens.
We schrijven: $G = \dots \text{ S}$.
Bijvoorbeeld: $G = 0,002 \text{ S}$.

Energieverliezen

Een deel van de energie gaat tijdens het energietransport 'verloren' in de geleiders. We noemen dat de energieverliezen van het transport (zie figuur 1.15).

FIGUUR 1.15 Schematische weergave van energietransport



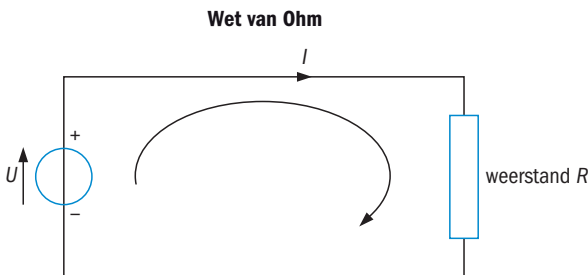
De energieverliezen moeten zo klein mogelijk zijn en daarom wordt de spanning vóór het transport omhoog getransformeerd naar 10 kV, 150 kV, 230 kV of 400 kV en ná het transport omlaag getransformeerd, eerst naar 10 kV en dicht bij de gebruikers naar 400/230 V.

Gesloten stroomkring

Wet van Ohm

In een gesloten stroomkring neemt de stroom evenredig toe met de grootte van de aangelegde spanning (zie figuur 1.16).

FIGUUR 1.16 Een gesloten stroomkring



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

In formulevorm:

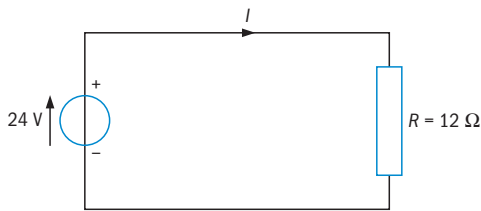
$$R = \frac{U}{I} \text{ Dit is de wet van Ohm.}$$

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

VOORBEELD 1.6

Hoe groot is de stroom in figuur 1.17?

FIGUUR 1.17a Gesloten stroomkring



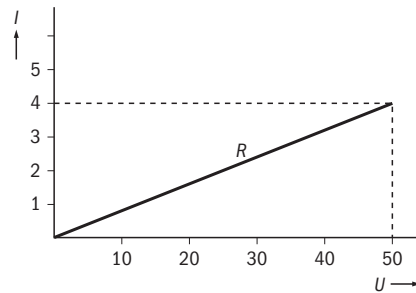
Gegeven: $U = 24 \text{ V}$

$R = 12 \Omega$

Gevraagd: I

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

FIGUUR 1.17b De afhankelijkheid tussen I , R en U



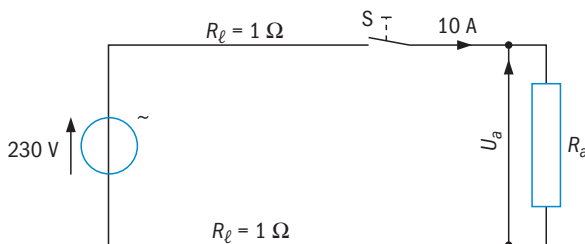
Nemen we een spanning van 12 V, dan is de stroom 1 A en bij een spanning van 48 V wordt de stroom 4 A.

VOORBEELD 1.7

Zie figuur 1.18.

- 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 1.18 Voorbeeld van een stroomkring



Opmerking: In figuur 1.18 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: $P = I^2 R$

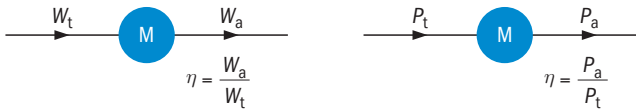
Uit: $U = IR$
 $W = UI t$ volgt: $W = I^2 R t$

Rendement

De verhouding tussen de energie na het transport en voor het transport noemen we het rendement van het energietransport (figuur 1.19).

Rendement

FIGUUR 1.19 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

Afgegeven vermogen

Het toegevoegde vermogen, het vermogen voor transport, noemen we P_t , het afgegeven vermogen, het vermogen na transport, P_a (zie figuur 1.19).

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

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.

In formulevorm:

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

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

Hoeksnelheid

Radialen

Rotatiesnelheid

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 leggen 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	

$$Q = It$$

$$U = IR$$

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

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

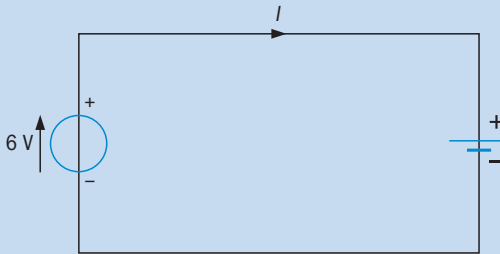
$$\eta = \frac{W_a}{W_t} = \frac{P_a}{P_t} \quad T_{\text{as}} = 9,55 \frac{P_a}{n}$$

Vragen en opdrachten

-
- 1.1** 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** Schrijf de eenheid op van:
- a** spanning
 - b** stroom
 - c** weerstand
 - d** lading
 - e** energie en vermogen.
- 1.5** Hoe luidt de Wet van Ohm?
- 1.6** Geef aan wat we verstaan onder:
- a** de capaciteit van een accu
 - b** het rendement van een motor
- 1.7** 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 kW | g ... kWh = 9 MJ |
| d ... Ah = 72 000 C | h ... MWh = 4320 MJ |
- 1.8** 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?

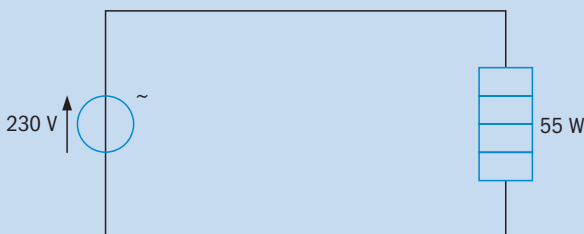
- 1.9** Een accu wordt geladen. Zie figuur 1.20.
De stroom is gedurende 1 uur 4 A, daarna gedurende 1 uur 3 A, 1 uur 2 A en 1 uur 1 A.
De accu is nu volgeladen.
- Hoeveel lading is aan de accu toegevoerd?
 - Hoe groot is de capaciteit van de accu?

FIGUUR 1.20 Laden van een accu



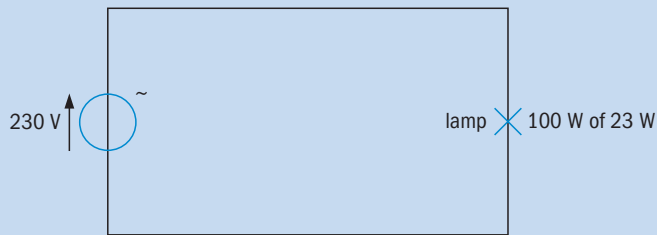
- 1.10** Een weerstand van 12 ohm wordt op een spanning van 6 V aangesloten.
- Hoe groot wordt de stroom door de weerstand?
 - Hoe groot is het vermogen dat de weerstand moet kunnen opnemen?
- 1.11**
- Hoe groot is de stroom door een weerstand van 10Ω , aangesloten op een batterij van 4,5 V?
 - Hoe groot is het vermogen dat de weerstand moet opnemen?
 - Hoeveel energie geeft de batterij af in 5 minuten?
- 1.12** Een soldeerbout voor 230 V heeft een vermogen van 55 W (zie figuur 1.21).
Bereken de weerstand van de soldeerbout.

FIGUUR 1.21 Soldeerbout 55 W



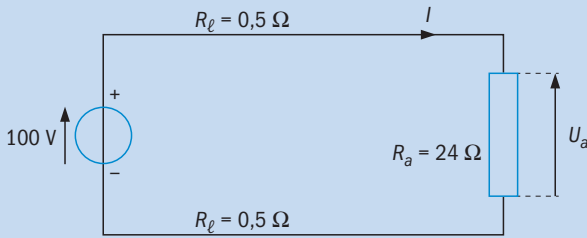
- 1.13**
- Hoe groot is de stroom door een gloeilamp van 115 W, 230 V?
 - Hoe groot is de stroom door een ledlamp van 23 W, 230 V?
 - Bereken ook de weerstand de gloeilamp van 115 W, 230 V (zie figuur 1.22).
 - Bereken ook de weerstand de ledlamp van 23 W, 230 V (zie figuur 1.22).

FIGUUR 1.22 Gloeilamp 100 W of LED-lamp 23 W



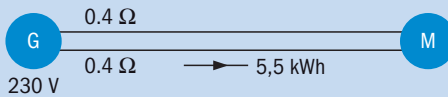
- 1.14** Een elektrische straalkachel, geschikt voor 230 V, heeft een vermogen van 1,1 kW.
Hoeveel stroom neemt deze kachel op?
- 1.15** Een apparaat met een weerstand van 46Ω is aangesloten op een spanning van 230 V.
a Hoeveel energie krijgt het apparaat in een uur toegevoerd?
b Hoe groot is het vermogen dat het apparaat moet kunnen opnemen?
- 1.16** 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.
- 1.17** 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?
- 1.18** 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?
- 1.19** 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.
- 1.20** De schakelaar in figuur 1.18 wordt 10 min gesloten.
Hoe groot is het energieverlies in de leidingen?
- 1.21** Bekijk figuur 1.23 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 1.23 Voorbeeld van een stroomkring



- 1.22** 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 1.24).
- Hoe groot is de spanning waarop de motor is aangesloten?
 - Hoe groot is het energierendement?

FIGUUR 1.24 Generator



- 1.23** 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.
- 1.24** 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?
- 1.25** Van een motor is het toegevoerde vermogen 3 kW. Het toerental is 955. Het rendement is 0,8. Bereken het askoppel.
- 1.26** 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.
- 1.27** 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.