

Michael Herrmann

# Elektriciteit aan boord

*Vertaald en bewerkt door Olav Cox*



HOLLANDIA

# INHOUD

Hollandia, vierde, herziene druk 2022

© 2008 Palstek Verlag, Hamburg

Oorspronkelijke titel: *Elektrik auf Yachten*

Oorspronkelijk uitgegeven door: Palstek Verlag GmbH, Hamburg

Voor het Nederlandse taalgebied:

© 2010, 2022 Uitgeverij Hollandia, Haarlem

(e-mail: [info@gottmer.nl](mailto:info@gottmer.nl))

Uitgeverij Hollandia maakt deel uit van de Gottmer Uitgevers Groep BV

Vertaling en bewerking: Olav Cox

Adviezen: Edwin de Ridder

Omslagontwerp en vormgeving: Studio Nico Swanink

Omslagillustratie voorplat: Peter Schermer

Omslagbeeld voorplat: Bertel Kolhof (linksboven)

en Marinus van Sijdenborgh de Jong/*Zeilen Magazine* (midden- en rechtsboven)

ISBN 978 90 641 0751 1

NUR 484

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 een andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Dit boek is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Ondanks de betrachte zorgvuldigheid kan het voorkomen dat de informatie in dit boek onjuistheden bevat. In geen enkel geval zijn de samensteller of de uitgeverij aansprakelijk voor enige directe of vervolgschade, van welke aard dan ook, als gevolg van, voortkomend uit of in verband met het gebruik van dit boek.

[hollandia-boeken.nl](http://hollandia-boeken.nl)

<b>Inleiding en toelichting bij gebruik</b>	9
<b>1 Wat is stroom?</b>	14
Gelijk- en wisselstroom	15
Spanning	16
Stroomsterkte	16
Vermogen	17
Weerstand	17
De wet van Ohm	18
Energie, verbruik en capaciteit	19
<b>2 Onderdelen, symbolen en elektrische schema's</b>	21
Eenvoudige of samenhangende weergave?	22
Kabels, stroomdraden en geleiders	22
Massa	23
Schakelaars, drukknoppen en relais	24
Weerstanden	27
Diodes	28
Lampen	29
Elektromotoren en generatoren	29
Zekeringen en zekeringsautomaten	29
Spoelen en transformatoren	30
<b>3 Basisschakelingen</b>	32
Parallelschakeling	32
Serieschakeling	34
<b>4 Testen en meten</b>	37
Spanningsmeting	38
Weerstandsmeting	39
Stroommeting	40
Meettips	41
<b>5 Energieopslag</b>	43
Laden en ontladen – het chemische proces	43
Opbouw	45
Soorten accu's	46
Accu-toepassing	52
Accugegevens	52

Koudstartstroom	55	Twee-aderige systemen met de min aan de massa	136
Accukeuze	55	Volledig geïsoleerd twee-aderig gelijkstroomstelsel	136
Accu laden	58	Kabels en stroomdraden	136
Veroudering van accu's	58	Kleuren en codering	140
Acculaders en laadmethodes	60	Beveiliging tegen te hoge stroomsterktes en kortsluiting	145
Laden van verschillende accu's met één stroombron	72	Zekeringen en gezeekerde schakelaars	146
Accukeuzeschakelaar	73	Plaatsing en dimensionering van zekeringselementen tegen te hoge stroomsterktes	150
Scheidingsrelais	74	Zekeren van generatoren en acculaders	151
Diodebrug	75	Aansluitingen en verbindingen	152
Veroudering door verkeerd opladen	77	Schakelpanelen	154
Diep ontladen	77	Accu's	154
Laden met een hoge stroomsterkte	77	Stopcontacten	156
Onvolledig laden	78	Bescherming tegen vonken	156
Overladen	79		
Opslaan van onvolledig geladen accu's	81	<b>9 Het wisselstroomboordnet (AC)</b>	157
Accubewaking	81	De basis	157
Desulfateren	85	Aarding	160
Optimaal omgaan met accu's	86	Potentiaalverschillen opheffen	164
		Aardlekschakelaars	167
<b>6 Stroom aan boord: gelijkstroom</b>	88	Walstroomstelsel	169
Gelijkstroomdynamo's	88	Transformatoren	170
Storingen bij gelijkstroomdynamo's	92	Polarisatietransformatoren	175
Wisselstroomdynamo's	93	Generatoren	175
Storingen bij wisselstroomdynamo's	99	Omvormers en lader/omvormercombinaties	177
Storingzoeken	99	Bedrading	178
Opladen met hernieuwbare energie	101	Schakelpanelen	179
Zonnepanelen	103	Samenvatting	179
Montage	105		
Regelaars van zonnepanelen	106	<b>10 Boordnet van de toekomst: bussystemen</b>	180
Windgeneratoren	106	De systemen	189
Sleepgeneratoren	108	Knopen en modules	190
Inbouwen in het boordnet	108	Aansturing en programmering	190
Brandstofcellen	109	Comfort en zekerheid	191
Marktsituatie	111	Samenvatting	192
<b>7 Stroom aan boord: wisselstroom</b>	112	<b>11 Bliksembeveiliging</b>	193
Synchroon en asynchroon	113	Bliksem in cijfers	193
Mobiele generatoren	118	Schade door blikseminslag	195
Dieselgeneratoren	120	Externe bliksembeveiliging	198
1500 of 3000 toeren per minuut?	120	Interne bliksembeveiliging	200
Invertergeneratoren	123	Bliksemstroom- en overspanningsafleiders	202
Gelijkstroomgeneratoren	123	Zendapparatuur	203
Stirling-generator	124	Provisorische bliksembeveiliging	205
Mogelijkheden voor generatorgebruik	124		
Hybride systemen	125	<b>12 Elektriciteit rondom de motor</b>	206
Het gelijkstroomconcept	127	Systemen	206
Inverters en acculaders	128	Contactslot	206
Inbouwen in het boordnet	129	Waarschuwingsslampjes	209
Dynamo's als 230V-generatoren	129	Meetinstrumenten	211
Samenvatting	130	Grootte en controle	212
Gebruik van 'landgeneratoren'	132	Gloeisystemen	213
		Startmotor	215
<b>8 Het gelijkstroomboordnet (DC)</b>	133	Startmotorproblemen	216
De basis	133	Dynamo's	219
Eén- en twee-aderige systemen	134	Stoppen	219

Onderhoud	220
Losnemen van de minkabel	221
Storingen zoeken	221
Motor-bussystemen	223
<b>13 Elektrische aandrijving</b>	226
Schijflopers	230
Buitenlopers	231
Ringlopers	232
Energievoorziening	232
Verwachting	234
<b>14 Verlichting</b>	235
Belichtingssterkte	237
Lichtkleuren	238
Stroomverbruik	238
Lampen	239
Spaarlamp of led?	240
Toepassingsmogelijkheden	242
Mogelijke besparingen	242
Navigatieverlichting	243
Samenvatting	243
<b>15 Elektrochemische corrosie</b>	244
Galvanische en elektrolytische corrosie	247
Grootte van de elektroden	249
Materialen	250
Beschermingsmaatregelen tegen galvanische corrosie	254
Beschermingsmaatregelen tegen elektrolytische corrosie	257
Samenvatting	258
<b>16 Vakmanschap</b>	259
Probleemorzaken	259
Eisen aan de verbindingen	265
Vlakstekkers	266
Ringkabelschoenen	267
Kabeleindhulzen	267
Schroeven en schroevendraaiers	267
Kabels aanleggen	268
Gereedschap	269
Verbruiksmateriaal	270
<b>17 Documentatie</b>	271
<b>Bijlagen</b>	275
Stroom, spanning, weerstand en vermogen – het formulewiel	275
De vermogensdriehoek	275
IP-classificatie	275
Weerstand van leidingen	276
Lostrekkrachten van verbindingen	276
Waarschuwingen en aanwijzingen in ‘het eigenaarshandboek’	276
Vormen van het net	277
Benaming van de netvormen	278
Normen en richtlijnen	279
<b>Register</b>	280

## INLEIDING EN TOELICHTING BIJ GEBRUIK

Nog niet zo lang geleden zeilden jachten rond de wereld, waarbij het ‘boordnet’ bestond uit wat losse batterijen voor de kortegolfradio en een zaklamp. Tegenwoordig is dit bijna ondenkbaar geworden: vrijwel niemand gooit in het weekend de lijnen los zonder elektrische verlichting, een koelbox en uitgebreide navigatieapparatuur aan boord. Elektra aan boord heeft het varen veel gemakkelijker gemaakt: navigeren is een fluitje van een cent, bij het manoeuvreren helpt de boegschroef, het anker komt omhoog met een druk op de knop en zelfs de kleinste scheepsdiesel hoeft niet meer met een slinger te worden gestart, maar komt tot leven met behulp van een elektrische startmotor.

Elektra aan boord levert ook een wezenlijke bijdrage aan de veiligheid op het water. Navigatieapparatuur zoals dieptemeter, kaartplotter en radar verminderen de kans op strandingen en aanvaringen aanzienlijk doordat ook de minder ervaren watersporters precies weten waar ze zich bevinden, op voorwaarde natuurlijk dat ze de apparatuur op de juiste manier bedienen. Automatische lenspompen slaan alarm wanneer er water binnenkomt, ruim voordat de toestand kritiek is geworden.

Maar zoals altijd heeft elk voordeel ook een nadeel. Zo zijn jachten in brand gevlogen door fouten in het elektrisch systeem, denk bijvoorbeeld aan ontbrekende zekeringen, te dunne bekabeling of kortsluiting die kan ontstaan wanneer verbindingen niet vakkundig zijn gemaakt. Ook minder spectaculaire gevolgen door problemen met het boordnet kunnen uiteindelijk zeer ver-

velend of kostbaar blijken te zijn. Denk daarbij aan accu's die snel kapotgaan, slecht werkende verwarming door te dunne bedrading of elektrolyse door verkeerd aangelegde walstroomaansluitingen.

Gelukkig zijn vrijwel al deze problemen vermeden. Echter, in tegenstelling tot de rest van de zaken aan boord waarbij een gezond verstand vaak voldoende is om problemen te doorzien en op te lossen, is voor elektra aan boord naast gezond verstand ook specifieke kennis nodig. Je zal je vertrouwd moeten maken met de grondbeginselen van spanning, stroom en de eisen waaraan moet zijn voldaan om de stroombronnen, accu's en verbruikers aan boord goed te laten functioneren.

Ondanks dat het boordnet tegenwoordig zeer complex kan zijn, is het niet zo moeilijk te doorgronden als het lijkt. Een van de doelstellingen van dit boek is om ook de watersporter die geen ervaring heeft met elektra aan boord van jachten voldoende basiskennis te bieden om in staat te zijn om het boordnet te overzien en te begrijpen, de zwakheden te herkennen en in het geval van storingen de oorzaken daarvan zelfstandig te vinden en op te lossen.

Daarnaast zal het boek ook als leidraad kunnen dienen voor vakmensen die zijdelings bezig zijn met jachtelektra, ook wanneer het gaat om de eisen die op nationaal en internationaal niveau worden gesteld aan jachtelektra. Want er zijn natuurlijk veel overeenkomsten tussen elektrische systemen in huizen, vrachtwagens en jachten, maar wil je een bedrijfszeker elektrisch systeem

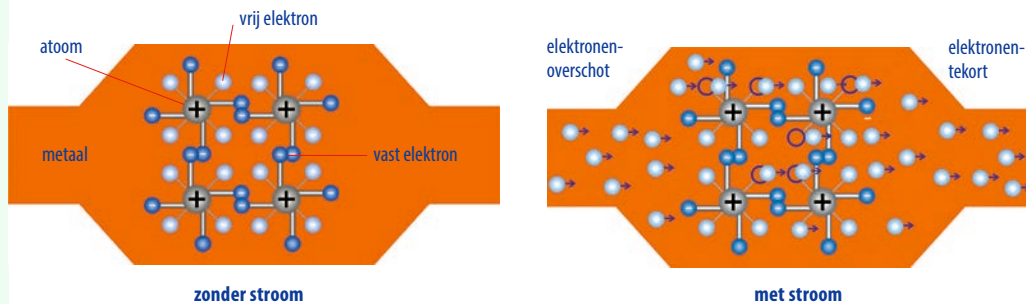
1

# WAT IS STROOM?

Fysisch gezien is elektrische stroom de beweging van ladingsdragers. Deze ladingsdragers kunnen zowel negatief (elektronen) als positief (ionen)

geladen zijn. In vaste geleiders, zoals metalen, kunnen alleen de elektronen zich verplaatsen. In geleidende vloeistoffen (elektrolyten) kunnen

## GELEIDING VAN METALEN

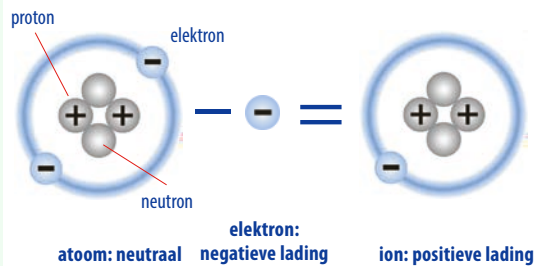


In metalen geleiders beschikken de atomen over meer elektronen dan nodig. Zonder stroom bevinden deze vrije elektronen zich wel in de buurt van de atoomkern, maar ze zijn door elektrische krachten, bijvoorbeeld door andere elektronen, gemakkelijk te verschuiven.

Wordt er nu spanning gezet op een metalen geleider – dus aan de ene kant ontstaat een elektronenoverschot en aan de andere kant een elektronentekort – dan verschuiven de elektronen die het elektronenoverschot vormen de vrije elektronen in de geleider in de richting van het elektronentekort doordat, zoals bekend, gelijksoortige ladingen elkaar afstoten. Deze verschuiving zet zich door de hele geleider voort, totdat er aan het uiteinde van de draad net zoveel elektronen wegstromen als er aan de andere kant zijn

bijgekomen – er loopt een stroom.

Het aantal protonen en elektronen in een atoom is gelijk, naar buiten toe is het atoom neutraal. Wordt er een elektron aan een atoom onttrokken en niet direct vervangen door een ander elektron, dan is de lading niet meer neutraal – het wordt een ion met een positieve lading.



ook ionen zich verplaatsen, zoals bij elektrochemische processen waarbij metaalionen zich door het zeewater bewegen. Bij een metalen geleider kun je je voorstellen dat zich rondom de atomen een heleboel elektronen bewegen, die niets te doen hebben. Wordt één kant van de metalen geleider met nog meer elektronen geconfronteerd – doordat de geleider onder spanning wordt gezet – dan bewegen de elektronen in de geleider zich de andere kant op, waarbij ze ruimte maken voor de nieuwe elektronen. De nieuwe elektronen schuiven op de plaats van de oude elektronen en duwen de oude elektronen als het ware voor zich uit. Dit proces is vergelijkbaar met het voortbewegen van een golf in het water: hier voeren de waterdeeltjes ook maar kleine bewegingen uit, terwijl ze hun impuls doorgeven aan

andere waterdeeltjes. De beweging van een enkel elektron in een geleider gaat verhoudingsgewijs maar langzaam, bij spanningen die aan boord worden gehanteerd gaat het over enige tienden van millimeters per seconde. De druk – of beter de spanning – op de elektronen plant zich echter veel sneller voort. De snelheid hiervan in een koperdraad bedraagt ongeveer twee derde van de lichtsnelheid, dus ongeveer 200.000 km per seconde.

## GELIJK- EN WISSELSTROOM

Om bij het voorbeeld te blijven: wanneer de elektronen zich in de leiding altijd dezelfde kant op bewegen, dan betreft het gelijkstroom. Hier zijn een plus- en een minpool aan te wijzen, iets wat helaas ook is gebeurd voordat men wist welke

## HET WATERMODEL

De fysische gedragingen van elektriciteit worden vaak met behulp van een watermodel verhelderd – en met deze traditie wordt in dit boek niet gebroken. In het model is de accu door twee waterreservoirs vervangen, die een plus- en een minpool voorstellen. De accu is geladen wanneer in de pluspool meer water (elektronen) aanwezig is dan in de minpool. Wanneer nu de afsluiter (schakelaar) wordt geopend (gesloten), kan water (elektronen) van de plus- naar de minpool stromen. Onderweg drijft het een turbine (verbruiker) aan, die een weerstand geeft aan het stromen van het water (elektronen).

De spanning wordt door het verschil in hoogte en dus het verschil in druk in de reservoirs voorgesteld; hoe groter dit is, hoe meer water (stroom) stroomt er door de buizen (stroomdraden). Hoe groter de weerstand in de turbine wordt, hoe groter het drukverschil (spanning) moet zijn, om de draaisnelheid (vermogen) gelijk te houden. Worden de buizen (stroomdraden) dunner, dan kan er minder water (stroom) stromen, tenzij de druk (spanning) wordt verhoogd.



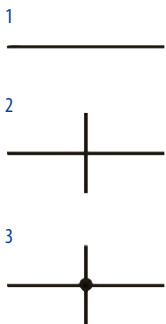
lading de elektronen hebben. Wat mis kan gaan, gaat mis, en zo is ooit besloten de pluspool daar te plaatsen waar de elektronen naartoe stromen, en de minpool is de pool waarvandaan de elektronen komen. Om niet nog meer verwarring te zaaien is de benaming van de plus- en minpool niet meer gewijzigd.

Wisselen de plus- en minpool van de 'elektronenbron' elkaar af, dan bewegen de elektronen in de geleider zich heen en weer en ontstaat er wisselstroom. Hier is geen vaste plus- of minpool aan te wijzen, omdat deze met de frequentie van de spanning wisselt. Met frequentie wordt het aantal complete wisselingen per seconde aangegeven en de eenheid van frequentie is Hertz (Hz) of  $s^{-1}$ . Walstroom in Nederland heeft een frequentie van 50 Hertz, terwijl bijvoorbeeld in de Verenigde Staten wordt gewerkt met 60 Hertz. Onder bepaalde omstandigheden kan dit problemen opleveren, bijvoorbeeld met elektromotoren die het toerental laten aansturen door de frequentie van het net of bij de spanningsverhoudingen in transformatoren.

**SPANNING**

De spanning wordt in volt (V) uitgedrukt. Met spanning wordt het verschil tussen de lading van de plus- en de minpool aangegeven. Spanning is goed te vergelijken met het watermodel met het drukverschil tussen de beide waterreservoirs. Hoe hoger de spanning (dus hoe groter het aantal ladingsdragers), hoe hoger is de druk (de spanning) en hoe meer elektronen zich bij verder ge-

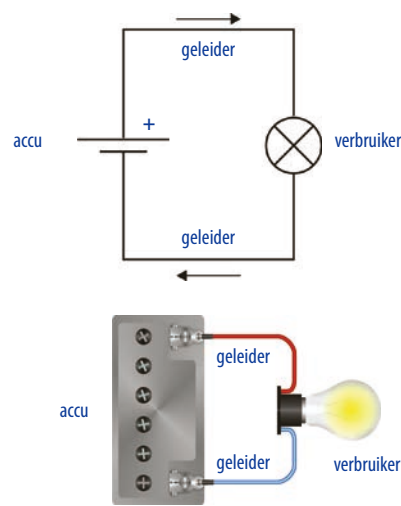
**SYMBOOL**



In elektrische schema's worden geleiders (zoals bedrading) door rechte lijnen (1) aangegeven. Kruisende geleiders zonder elektrische verbinding worden als een soort plus-teken (2) afgebeeld. Is er een elektrische verbinding aanwezig, dan wordt er een punt op het midden van het plus-teken gezet (3).

**STROOMKRING**

Tot een stroomkring behoren minstens een stroombron, twee geleiders en een verbruiker. Daarnaast kunnen ook schakelaars, zekeringen, relais en nog een heleboel andere elementen aanwezig zijn waarmee de stroom onderbroken, geregeld of verdeeld kan worden. Vanuit de stroombron, bijvoorbeeld een accu, stroomt de stroom via de toevoerleiding naar een verbruiker, zoals een lamp. In de verbruiker doet de stroom zijn werk en stroomt dan via de retourleiding terug naar de stroombron. Alle stroomkringen zijn op dit principe terug te voeren, en ook zeer gecompliceerde elektrische schema's bestaan in de basis uit een hele verzameling van dit soort stroomkringen.



lijke omstandigheden door de geleider bewegen. Spanning wordt in formules aangegeven met het symbool  $U$ .

**STROOMSTERKTE**

Stroomsterkte, of ook wel gewoon stroom genoemd, wordt in ampère (A) aangegeven. In formules wordt het symbool  $I$  gebruikt. De stroom drukt de hoeveelheid ladingsdragers (elektronen of ionen) uit die binnen een bepaalde tijd door een geleider stromen. In het watermodel gaat het over de hoeveelheid water die binnen

een bepaalde tijd door de buizen stroomt. In een stroomkring is er een directe relatie tussen spanning en stroomsterkte: hoe groter de spanning, hoe hoger de stroomsterkte.

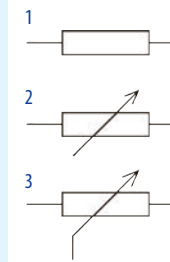
**VERMOGEN**

Vermogen is het product van stroom en spanning ( $I \cdot U$ ) en wordt in watt (W) of veelvouden zoals milliwatt (mW) of kilowatt (kW) uitgedrukt. Bijvoorbeeld: door een gloeilamp loopt bij een spanning van 12 V een stroom van 2,1 ampère. Daaruit volgt een vermogen van  $12 \cdot 2,1 = 25,2$  watt, afgerond 25 watt. Een elektrische kachel gebruikt bij een netspanning van 230 V een stroom van 25 ampère, het vermogen bedraagt dan dus  $230 \cdot 25 = 5.750$  watt, of 5,75 kilowatt. Het symbool dat voor vermogen in formules wordt gebruikt is  $P$ .

**WEERSTAND**

Een zeer belangrijk begrip in de elektrotechniek is weerstand. De eenheid van weerstand is ohm ( $\Omega$ ), het symbool dat in formules wordt gebruikt is  $R$ . Weerstand heeft twee betekenissen in de elektrotechniek. Ten eerste is een weerstand een onderdeel dat in de stroomkring wordt geplaatst om de spanning te verlagen – bijvoorbeeld om een 12V-lamp op een 24V-net te kunnen aansluiten – of om een spanningsval op te wekken

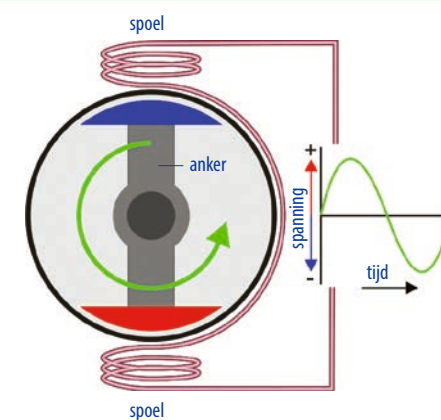
**SYMBOOL**



In elektrische schema's worden weerstanden als rechthoekjes (1) getekend. Variabele weerstanden zijn herkenbaar aan een pijl (2), en is er ook een aansluiting aanwezig (potentiaalmeter), dan is de pijl van een aansluitlijntje voorzien (3).

om bijvoorbeeld stroom te kunnen meten. Ten tweede is weerstand een fysische eigenschap van elke geleider en verbruiker. Dit laat zich als volgt verklaren: tijdens het verplaatsen door de geleider stuiten de elektronen op allerlei hindernissen zoals atoomkernen en worden daardoor afgeremd. Dit verlaagt de hele elektronenstroom, het levert een weerstand op. Deze weerstand is materiaalafhankelijk. Bij koper bedraagt de weerstand bijvoorbeeld  $0,0164 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , wat inhoudt dat een koperdraad met een doorsnede van  $1 \text{ mm}^2$  en een lengte van een meter een weerstand heeft van 0,0164 ohm. Hoe dikker de geleider, hoe kleiner de weerstand, en hoe langer de geleider, hoe groter de weerstand. Dit is ook

**WISSELSTROOM**



Wisselstroom is goed uit te leggen wanneer je je bedenkt hoe deze wordt opgewekt. Het werkt ongeveer zo: in een behuizing draait een as met daaraan het zogenaamde anker, waarvan de uiteinden magnetisch zijn. Aan de buitenzijde van de behuizing zijn twee spoelen geplaatst, precies tegenover elkaar. Draait nu het anker, dan wekken de magneten in de spoelen een inductiespanning op die gerelateerd is aan de polen van de magneten en die spanning neemt als gevolg van de draaibeweging van het anker in sterkte toe en af. De spanning in de spoelen is dus gekoppeld aan de draaiing van het anker en verloopt daardoor sinusvormig. In werkelijkheid ziet het er een stuk ingewikkelder uit – zo heeft het anker meer polen,

zijn er meer spoelen aanwezig en is er vaak nog een wikkeling om het anker aangebracht, maar het principe blijft hetzelfde!

3

## BASISSCHAKELINGEN

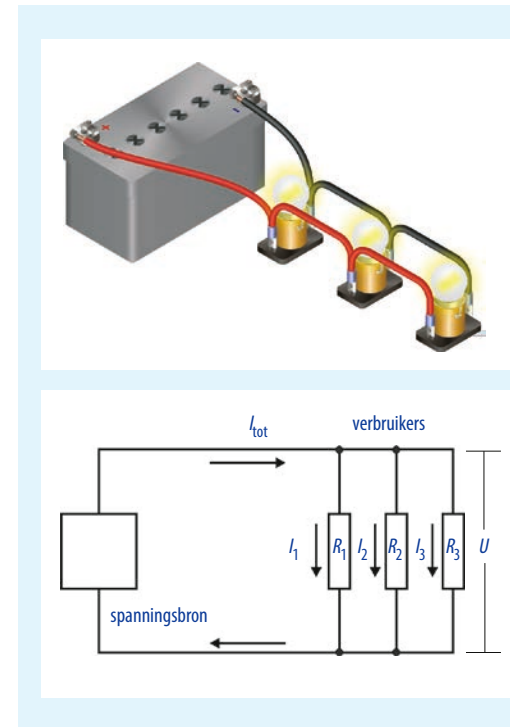
Met een schakeling wordt een verbinding van onderdelen bedoeld die samen een stroomkring vormen. In de meest eenvoudige vorm bestaat een stroomkring uit een stroombron, twee geleiders en een verbruiker, in de afbeelding een accu die met twee draden is verbonden met een lamp. De stroom- en spanningsverhoudingen zijn met behulp van de wet van Ohm eenvoudig te bepalen: de totale stroom  $I$  in de schakeling is gelijk aan de stroom door de verbruiker, die bepaald

wordt door de accuspanning  $U$  en de weerstand  $R$ . Voorbeeld: bij een accuspanning van 12 volt en een weerstand van de verbruiker van 8 ohm loopt er een stroom van  $12 : 8 = 1,5$  ampère. Hiermee is meteen het stroomverbruik of het vermogen van de verbruiker te berekenen:  $12 \text{ V} \cdot 1,5 \text{ A} = 18$  watt. In de praktijk zal het echter vaker zo zijn dat het vermogen bekend is en dat de stroomsterkte, bijvoorbeeld voor het dimensioneren van de bedrading, berekend moet worden. Je kunt de vergelijking dan anders opschrijven:  $18 \text{ W} : 12 \text{ V} = 1,5$  ampère (kijk voor het omrekenen maar naar het sommetje  $2 \cdot 5 = 10$ , dus  $5 = 10 : 2$  en  $2 = 10 : 5$ )

### PARALLELSCHAKELING

Boordnetten zijn zodanig gemaakt dat er meerdere verbruikers op een accu zijn aangesloten. Zo worden navigatieverlichting, pompen, binnenverlichting en koelkast op één accu, de serviceaccu (ook wel de boordnet- of lichtaccu genoemd) aangesloten. Dit kan worden omschreven als een parallelschakeling, omdat alle verbruikers parallel aan de accu zijn geschakeld. Typisch voor deze schakeling is dat alle verbruikers werken met dezelfde spanning, meestal 12 of 24 volt. Ga je nu aan de slag met de wet van Ohm, dan krijg je in het voorbeeld voor de drie verschillende stroomsterktes het volgende:

$$I_1 = U : R_1, I_2 = U : R_2 \text{ en } I_3 = U : R_3.$$



Parallel geschakelde verbruikers

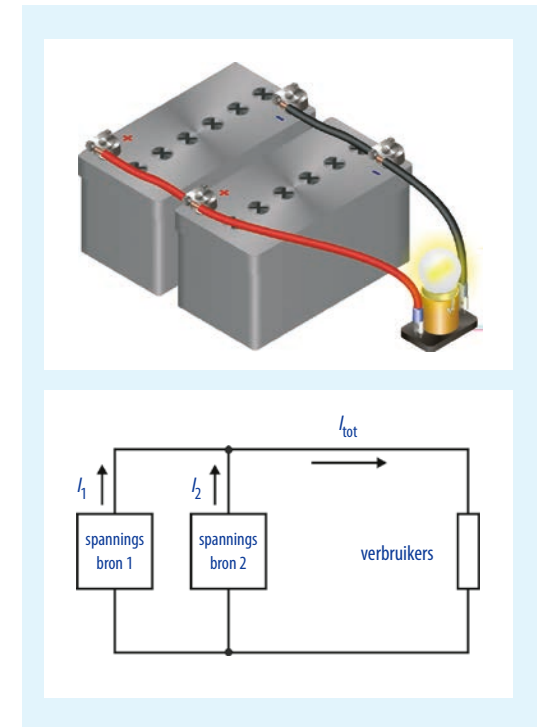
Voor de totale stroom die door de spanningsbron wordt geleverd geldt:

$$I_{\text{tot}} = U(1 : R_1 + 1 : R_2 + 1 : R_3).$$

Hieruit kan door het omschrijven en invullen van de formule ook de totale weerstand van de verbruikers worden berekend:

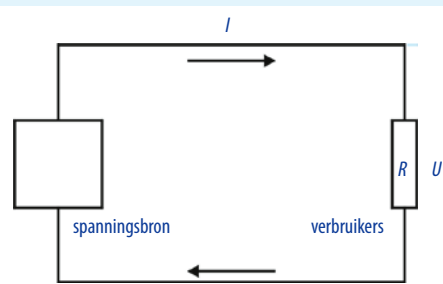
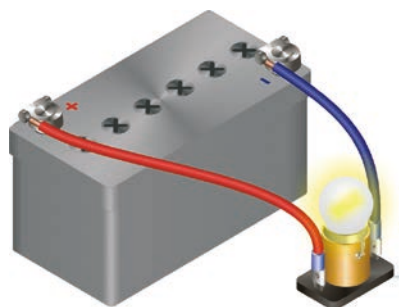
$$1 : R_{\text{tot}} = 1 : R_1 + 1 : R_2 + 1 : R_3.$$

Voorbeeld:  $R_1 = 100$  ohm,  $R_2 = 25$  ohm en  $R_3 = 20$  ohm.  $1 : R_{\text{tot}}$  wordt dan  $0,01 + 0,04 + 0,05 = 0,1$ , dus de totale weerstand bedraagt 10 ohm. Weerstanden worden in de praktijk echter maar zelden berekend of gevraagd. Veel vaker wordt naar de totale stroomsterkte of het totale vermogen gevraagd. Bij parallelschakelingen geldt daarbij dat de totale stroomsterkte gelijk is aan de som van alle aparte stroomsterktes door de verschillende gebruikers, en dat het totale vermogen kan worden bepaald door de spanning met de totale stroomsterkte te vermenigvuldigen.



Parallel geschakelde spanningsbronnen

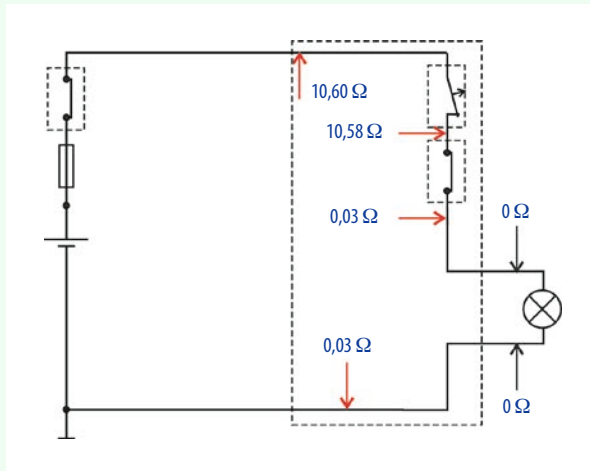
Ook spanningsbronnen kunnen parallel worden geschakeld. Bij serviceaccu's kom je dit vaak tegen, waarbij de accubank wordt opgebouwd uit meerdere parallel geschakelde loodaccu's. De reden voor deze schakeling is te vinden in de grootte en het gewicht van de accu's. Wanneer je bijvoorbeeld een accucapaciteit van 330 Ah nodig hebt, dan ben je gedwongen dit middels een parallelschakeling van die accu's met elk een capaciteit van 100 Ah op te bouwen. Want naast het feit dat er geen 12V-accu's bestaan met een capaciteit van 300 Ah voor gebruik aan boord van jachten, zou je als een dergelijke accu al bestond een hijskraan nodig hebben om deze aan boord te tillen. Een dergelijke accu zou immers meer dan honderd kilo wegen. Aangezien ook hier de totale stroomsterkte volgt uit de som van de aparte stroomsterktes, en stroomsterkte vermenigvuldigd met tijd de capaciteit oplevert, is bij het parallel schakelen van accu's de totale capaciteit gelijk aan de som van de capaciteiten van de parallel geschakelde accu's. Samenvattend: bij het parallel schakelen is de spanning overal gelijk. De stroomsterktes door



Eenvoudige stroomkring

## STORINGEN ZOEKEN DOOR WEERSTAND TE METEN

Begin met meten bij de verbruiker. De meetpen aan de COM-aansluiting van de multimeter zet je bij de lampfitting. Met de meetpen aan de plusdraad ga je naar de uitgang van de schakelaar en je meet daarbij met een goede multimeter een weerstand van 0,03 ohm, niets bijzonders dus. Met de meetpen aan de plusdraad meet je aan de accuzijde van de schakelaar echter een weerstand van 10,58 ohm, een veel te hoge waarde. Voor de zekerheid neem je ook nog de zekeringsautomaat mee in de meting, maar die geeft slechts een extra weerstand van 0,02 ohm. De te hoge weerstand van de schakelaar is daarmee vastgesteld.



12,3 volt op de fitting staat, begint het geheel toch wat merkwaardig te worden. Tijd dus voor een weerstandsmeting. Uiteraard zet je eerst de hoofdschakelaar van de accu uit, zodat de multimeter niet beschadigd raakt, en vervolgens ga je ook hier vanaf het lampje terugmeten naar de accu.

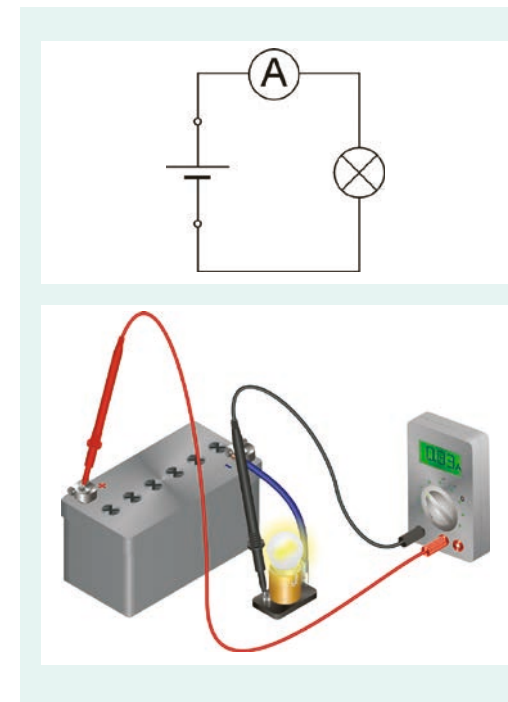
Er zijn hier twee mogelijkheden, die ook met elkaar gecombineerd kunnen worden. Of je meet vanaf het ene uiteinde van de draad (bijvoorbeeld de lampfitting) steeds een stukje verderop in de draad om de gezamenlijke weerstand van de draad te bepalen, en daar waar deze opeens sterk stijgt, bevindt zich het probleem. Een andere mogelijkheid is om de weerstand van alle verbindingen en schakelaars apart na te meten. In de praktijk is het meestal de lengte van de draad die bepaalt op welke manier je te werk gaat.

Zoals eerder beschreven laten de meeste storingen zich goed lokaliseren met behulp van spanningsmetingen, zodat in de praktijk de weerstandsmetingen voornamelijk als extra mogelijkheid worden gezien om een met een spanningsmeting gevonden storing te bevestigen. Er zijn echter ook enkele onderdelen in een elektrisch circuit waarvan de werking alleen met een weerstandsmeting kan worden gecontroleerd. Denk aan de oliedruk- en temperatuursensor op de motor, die in een bepaald weerstandsgebied

werken, bijvoorbeeld tussen de 20 en 180 ohm. Bij deze onderdelen kun je met een weerstandsmeting snel vaststellen of ze werken of niet. Een kapotte sensor is meestal goed te herkennen aan het feit dat de weerstand vrijwel 0 is of juist ter grootte van megaohms (1.000.000 ohm). Weerstandsmetingen zijn ook zeer bruikbaar om een kortsluiting te lokaliseren. Aan spannings- of stroommetingen heb je daarbij niets, omdat een stroomkring waarin kortsluiting aanwezig is niet op spanning kan worden gezet.

## STROOMMETING

Bij een stroommeting komt meestal een hoop werk kijken, omdat de stroomkring moet worden onderbroken op de plaats waar je wilt meten, zodat je de multimeter een onderdeel kunt laten zijn van de stroomkring. Een goede reden om stroommetingen maar weinig uit te voeren. Een tweede reden om stroommetingen te vermijden is het feit dat het meetbereik van de meeste multimeters voor de stroomsterktes die in het boordnet optreden vaak te klein is. Slechts weinig multimeters kunnen stroomsterktes van 20 ampère aan (veel meters redden het maar tot 10 ampère), en zelfs bij 20 ampère is het vaak nog te weinig wanneer meerdere verbruikers tegelijkertijd worden aangesloten of wanneer het gaat om een kortsluiting. Stroommetingen worden daarom



Stroommeting

meestal vooral gebruikt wanneer een apparaat moet worden getest. Zo zegt het stroomverbruik bijvoorbeeld iets over de toestand van een koelcompressor, maar dan natuurlijk alleen wanneer je weet hoe hoog de stroomsterkte normaliter zou moeten zijn. Wanneer het stroomverbruik van de koelcompressor meer dan 20% hoger ligt dan het zou moeten zijn, dan kun je concluderen dat de compressor zijn beste tijd heeft gehad en vervangen moet worden.

Voor het meten van grotere stroomsterktes – meer dan 100 ampère – bestaan zogenaamde stroomtangens. Deze werken op basis van inductie en de stroomkring hoeft voor de meting niet te worden onderbroken. Dit soort tangens zijn echter behoorlijk prijzig en voor die enkele keer dat je zo'n tang aan boord zou kunnen gebruiken is het de investering niet waard.

## MEETTIPS

- ▶ Bij metingen aan het boordnet heb je meestal drie handen nodig: één hand om de multimeter vast te houden, een tweede voor de meetpen aan de plusdraad en een derde voor de meetpen aan de mindraad. Het wordt een

stuk gemakkelijker wanneer je een meetpen aan de mindraad hebt zitten die zichzelf kan vastklemmen, vooral wanneer de meetpunten niet zo dicht bij elkaar zitten.

- ▶ Schakel het meetbereik van een multimeter op de juiste waarde voordat je gaat meten, om te voorkomen dat je tijdens het meten per ongeluk een verkeerd meetbereik inschakelt, waardoor de meter kan beschadigen. Voorbeeld: je wilt ongeveer 12 V meten. Draai je nu aan de draaiknop om het juiste meetbereik te kiezen terwijl je de meetpennen al op de meetpunten hebt zitten en je komt per ongeluk in het meetbereik van weerstandsmetingen terecht, dan zijn bij de meeste multimeters weerstandsmetingen vanaf dat moment niet meer mogelijk.
- ▶ Meet bij voorkeur bij ingeschakelde verbruikers. Zijn de verbruikers niet ingeschakeld, dan zijn overgangsweerstanden zoals bij de schakelaar uit het voorbeeld moeilijk te lokaliseren.
- ▶ Ga bij dicht naast elkaar gelegen meetpunten voorzichtig te werk om te voorkomen dat de meetpennen kortsluiting veroorzaken. Let bij stroommetingen goed op dat je niet per ongeluk met een van de meetpennen in con-



Meetpennen die zichzelf kunnen vastklemmen zorgen dat je geen handen te kort komt.



tact komt met de massa of de volle spanning buiten de stroomkring waarin je bezig bent. In dat geval veroorzaakt de multimeter een kortsluiting.

- ▶ Wanneer de spanning sterk verandert wanneer een gebruiker in- of uitgeschakeld wordt, dan duidt dat meestal op een te hoge overgangswaerstand in de stroomvoorziening.
- ▶ Apparaten die zijn voorzien van een bescherming tegen een te lage spanning (ze schakelen dan uit om de accu's niet leeg te trekken), zoals verwarmingen of koelcompressors, reage-

ren vaak ook op te kleine draaddoorsneden of te hoge overgangswaerstanden die in de loop der tijd zijn ontstaan, bijvoorbeeld door corrosie bij aansluitingen. Dan start het apparaat eerst netjes op, maar gaat na korte tijd weer uit. De spanning die op dat moment wordt gemeten kan dan toch gewoon correct zijn. Digitale meetinstrumenten zijn in dat geval te langzaam om het spanningsprobleem goed te kunnen herkennen – zorgvuldige weerstandsmetingen bieden in dit soort gevallen een uitkomst.

5

## ENERGIEOPSLAG

Verreweg het belangrijkste maar vaak ook minst begrepen onderdeel van het boordnet is de accu. Deze vormt de buffer tussen de gebruikers en de stroomleveranciers en zorgt ervoor dat er ook stroom ter beschikking is wanneer de motor niet loopt.

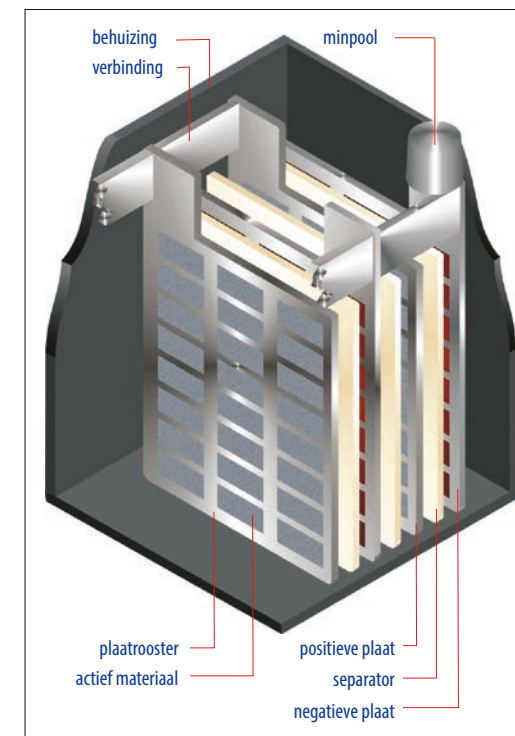
Wanneer de accu kapotgaat is meestal het hele boordnet niet meer bruikbaar, iets wat tegenwoordig al aanleiding kan zijn voor een groot-schalige reddingsoperatie.

Gelukkig gaan accu's maar zelden plotseling en onaangekondigd kapot; meestal kondigt het einde van de accu zich door een duidelijk merkbaar capaciteitsverlies aan – je moet dan een stuk langer laden om de accu vol genoeg te krijgen. Opvallend genoeg zijn er accu's die het eeuwig lijken vol te houden, en ook accu's van hetzelfde type die het slechts een paar jaar redden – er zijn zelfs gevallen van amper 24 uur bekend. Alvast voor de duidelijkheid: de levensduur van een accu wordt niet zozeer bepaald door het type accu, de fabrikant, de prijs of de gebruikte techniek, maar door de eigenaar. Net als voor de andere onderdelen van een jacht geldt dat de levensduur vooral afhankelijk is van hoe je ermee omgaat.

### LADEN EN ONTLADEN – HET CHEMISCHE PROCES

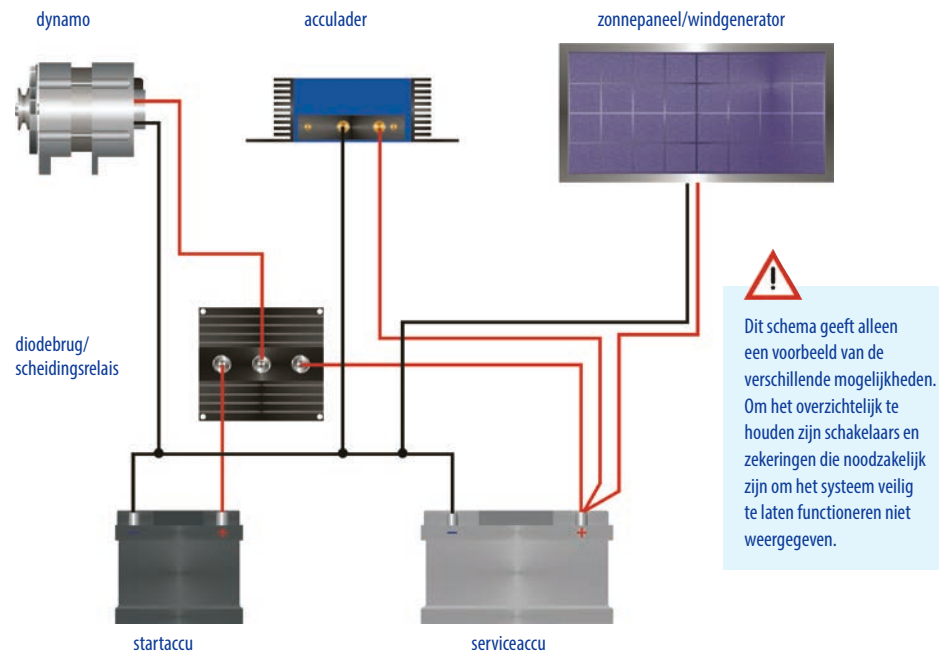
De hoofdbestanddelen van een loodaccu zijn al tientallen jaren niet gewijzigd: een actief materiaal (lood of loodoxide) is chemisch en mechanisch met een metalen plaatrooster of dunne buisjes verbonden. Positieve en negatieve platen zijn meestal van elkaar gescheiden door een niet-geleidend materiaal (de separator), zodat wordt voorkomen dat de platen bewegen of dat afzetting op de platen, de zogenaamde dendrieten, kortsluiting veroorzaakt. Dendrieten bestaan uit loodsulfaat en ontstaan na verloop van tijd met name in accu's die meestal worden gebruikt terwijl ze niet goed volgeladen zijn.

Platen met dezelfde polariteit zijn in de accucellen onderling en met de bijbehorende accupool verbonden middels metalen strips. Het geheel is ondergedompeld in verdund zwavelzuur of in



Opbouw van een accucel

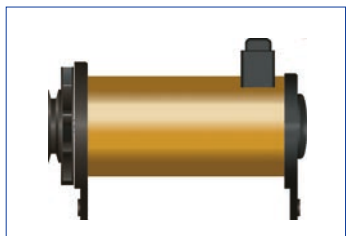
## ACCULADEN – EEN OVERZICHT



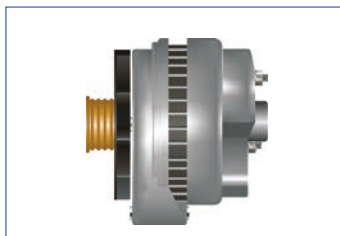
Bij het laden van de accu's aan boord is het vooral de uitdaging om de stroom die door meerdere stroomopwekkers wordt geleverd over meerdere accu's te verdelen, en wel zodanig dat ze niet te ver worden ontladen of opgeladen. De belangrijkste stroombron aan boord van kleine en middelgrote jachten is meestal de dynamo, die zowel de startaccu als de serviceaccu van stroom voorziet. Om te voorkomen dat de startaccu door het boordnet wordt leeggetrokken, worden start- en serviceaccu door een scheidingsrelais of een diodebrug tijdens het ontladen van elkaar geïsoleerd. Een acculader op walstroom zorgt in de haven vaak voor de stroomvoorziening.

Eenvoudige apparaten met slechts één uitgang zijn meestal alleen aan de serviceaccu gekoppeld, omdat de startaccu wanneer de motor draait al voldoende wordt opgeladen door de dynamo. Is er bij de acculader nog een tweede, meestal ongeregelde uitgang aanwezig, dan kan daarop de startaccu worden aangesloten. Ook zonnepanelen en windgeneratoren zijn vaak alleen aan de serviceaccu aangesloten.

Wanneer er nu ook een derde accu, bijvoorbeeld voor de ankerlier of de boegschroef, moet worden opgeladen, dan moet ook die accu tijdens het ontladen van alle andere accu's gescheiden zijn. Dit kun je echter niet doen met een normale diodebrug, omdat de spanningsval in combinatie met een eerdere diodebrug dan te groot wordt, waardoor de derde accu niet meer goed wordt opgeladen.



Gelijkstroomdynamo



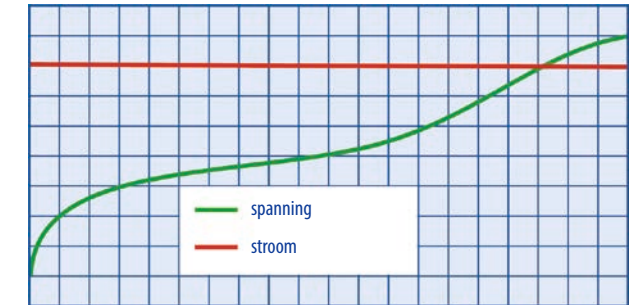
Wisselstroomdynamo met externe ventilator



Wisselstroomdynamo met interne ventilator

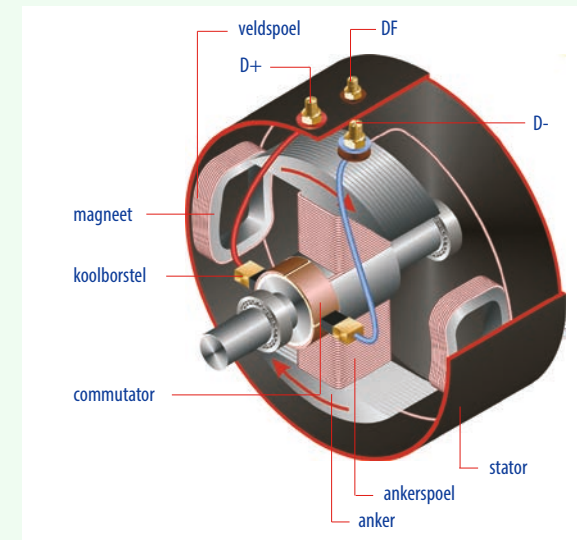
## I-LAADKARAKTERISTIEK

Bij laden met een constante stroom kan met geschikte laadapparatuur in korte tijd veel capaciteit worden opgeslagen. De laadstroom kan daarbij, afhankelijk van het type accu, tussen de 30 en maximaal 40% van de nominale capaciteit bedragen. Bij hoge laadstroomsterktes moet de temperatuur van de accu goed worden bewaakt, om schade aan de accu te voorkomen. Zodra de gasspanning wordt bereikt moet het laden worden gestaakt of worden omgeschakeld naar een constante spanningsfase, omdat anders de accu kapot kan gaan. Door over te schakelen naar laden met een constante spanning kan de accu volledig vol worden geladen.



## GELIJKSTROOMDYNAMO

Bij een gelijkstroomdynamo wordt de stroom in de roterende ankerspoel opgewekt. De veldspoelen met permanente magneten die het bekrachtigingsveld opwekken zitten vast aan de behuizing, de stator. Wanneer het anker nu draait, wordt door het magnetisch veld van de magneten een stroom in het anker opgewekt. Deze stroom loopt vervolgens weer door de veldspoelen, waardoor het magnetisch veld toeneemt en de stroom in de ankerspoel versterkt. De in de ankerspoel opgewekte stroom wordt bij de commutator gelijkgericht en middels de koolborstels afgenomen. Gelijkstroomdynamo's leveren pas bij wat hogere toerentallen goed stroom, maar mogen weer niet te hard draaien, omdat de koolborstels dan geen goed contact meer maken.



een aparte meetdraad wel degelijk de spanning direct bij de accu meet.

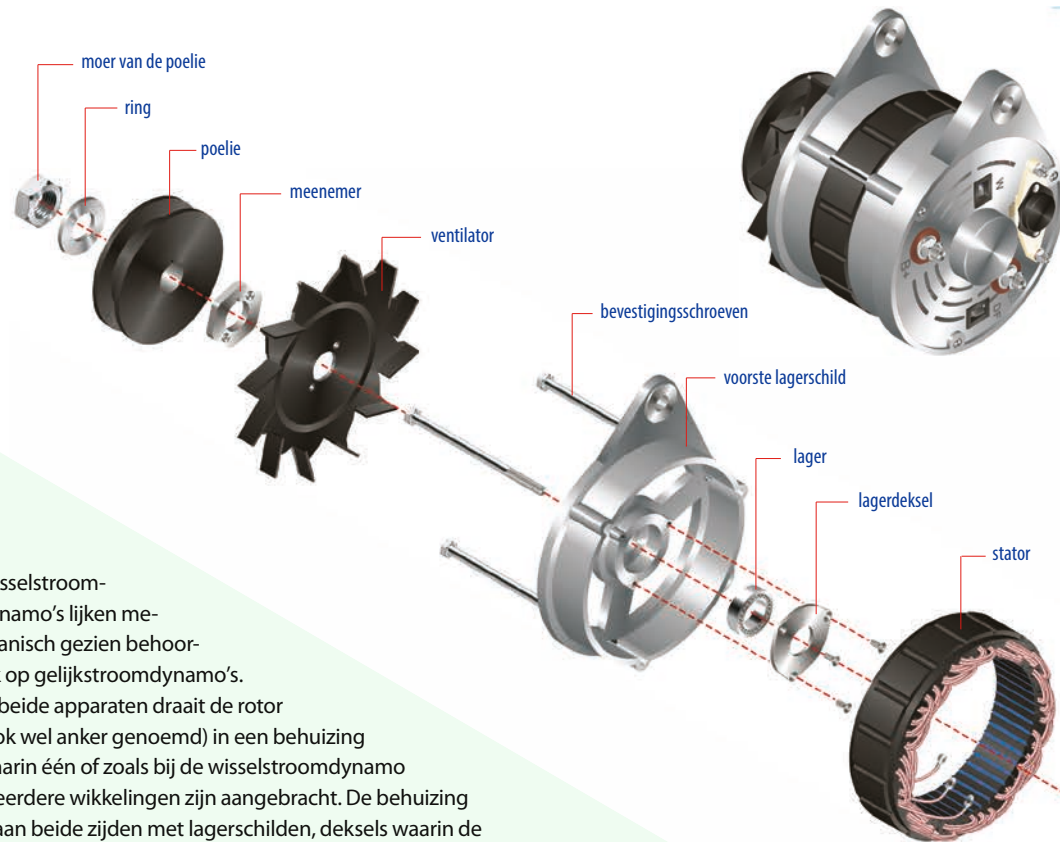
In tegenstelling tot accu's in auto's waarbij de temperatuur meestal gelijk is aan die van de dynamo en van de regelaar – alles is immers onder de motorkap geplaatst – is dat aan boord van jachten meestal niet het geval. Zelfs wanneer er een regelaar wordt gebruikt in de dynamo die re-

kening houdt met de omgevingstemperatuur van de regelaar, heb je hier aan boord weinig aan, omdat de accu's meestal niet in dezelfde ruimte als de dynamo (motorruimte) zijn geplaatst.

### SLIMME REGELAARS EN 'SMART CHARGERS'

De oplaadtijd kan behoorlijk verminderd worden wanneer de standaarddynamo met een slimme

## ONDERDELEN WISSELSTROOMDYNAMO



Wisselstroomdynamo's lijken mechanisch gezien behoorlijk op gelijkstroomdynamo's.

In beide apparaten draait de rotor (ook wel anker genoemd) in een behuizing waarin één of zoals bij de wisselstroomdynamo meerdere wikkelingen zijn aangebracht. De behuizing is aan beide zijden met lagerschilden, deksels waarin de lagers van de rotor zijn bevestigd, afgedicht.

Ondanks dat wisselstroomdynamo's beduidend robuuster zijn en je er gemakkelijker (en vaak ook goedkoper) een ruildynamo voor kunt vinden dan voor een gelijkstroomdynamo, is het soms toch nodig de dynamo uit elkaar te halen.

Hiervoor kunnen verschillende redenen zijn, zoals versleten of vastgelopen lagers of het willen verwisselen van de diodeplaat – ook hier zijn de onderdelen nog altijd een stuk betaalbaarder dan een complete ruildynamo. Bij het kopen van onderdelen is het vaak een stuk voordeliger om zaken als lagers, koolborstels of dioden rechtstreeks bij de vakhandel aan te schaffen en niet bij de leverancier van de motor waarop de dynamo gemonteerd is.

Voor het demonteren moeten bij de meeste wisselstroomdynamo's eerst de poelie en de ventilator worden verwijderd voordat je bij de bevestigingsschroeven kunt. Enkele exemplaren zijn voorzien van een zes- of achtkantige meenemer tussen de poelie en de ventilator, zodat je de rotoras kunt tegenhouden bij het losdraaien van de moer bij de poelie. In andere uitvoeringen is de rotoras op de kop van een inbusgat voorzien om de as mee tegen te houden, en een enkele keer zijn de bevestigingsschroeven bereikbaar zonder eerste de poelie en de ventilator te hoeven demonteren. In elk geval is het zaak om de poelie of de ventilator niet op een lompe manier als aangrijppunt te gebruiken, want wanneer die vervormt wordt het een kostbare zaak.

Voordat je de bevestigingsschroeven losdraait moet je eerst de spanningsregelaar demonteren van het achterste lagerschild. Ga hierbij voorzichtig te werk, want kantel je de spanningsregelaar bij het demonteren, dan kunnen de koolborstels afbreken.

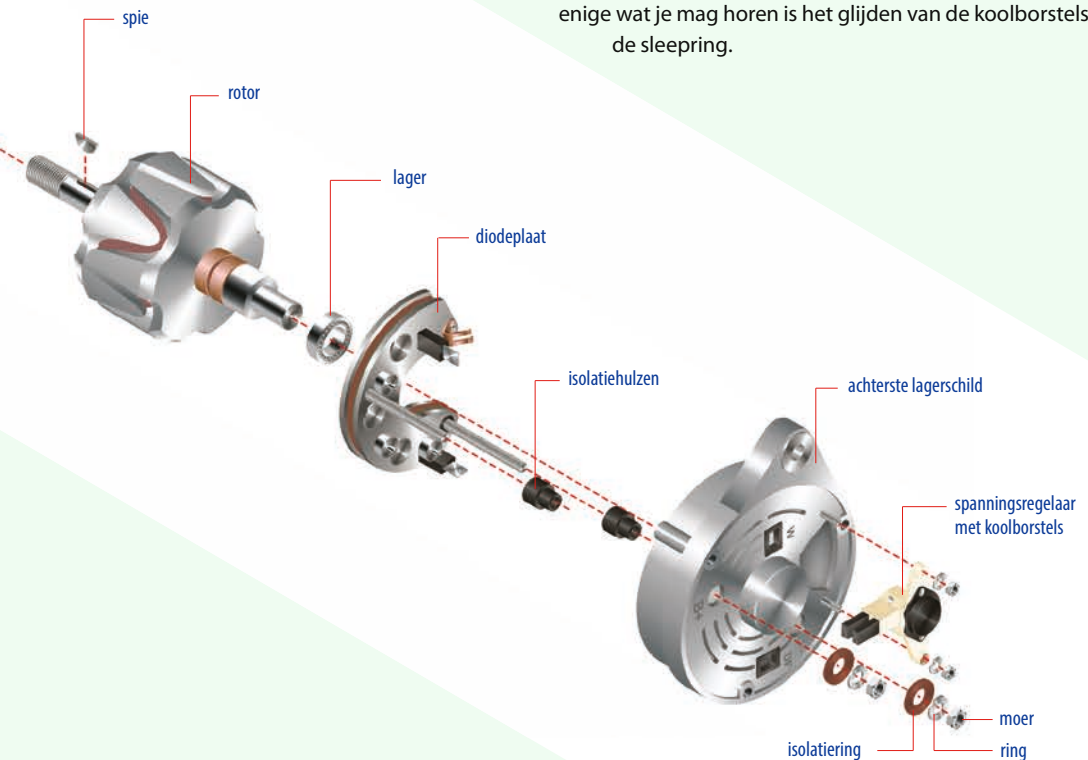
De bevestigingsschroeven zitten meestal muurvast – kruipolie die de tijd krijgt om in te werken kan hierbij nuttig

zijn. Heb je de bevestigingsschroeven eenmaal los, dan kan het voorste lagerschild samen met de rotor uit de stator (behuizing) worden geschoven. De stator is via de aansluitdraad met de diodeplaat verbonden, die op zijn beurt weer aan de B+ en B- aansluitingen op het achterste lagerschild vastzit. Een enkele keer kom je tegen dat de diodebrug met aparte schroeven aan het lagerschild is vastgemaakt.

Meestal gaat alleen het voorste lager kapot. Dit lager zit vaak met een lagerdeksel aan het voorste lagerschild vast en kan pas worden losgemaakt wanneer de rotoras – voorzichtig werkend met een hamer of een pers – uit het lager is gedreven. Wanneer je het voorste lager vervangt, vervang dan meteen ook het achterste lager, ook al is dit nog niet kapot – de kosten wegen niet op tegen de moeite wanneer je een tijdje later alles weer moet demonteren omdat het achterste lager gesneuveld is. Het achterste lager moet meestal met een lagertrekker van de as worden gehaald, waarbij je de lagertrekker op de binnenste ring van het lager laat aangrijpen. Bij het monteren van de lagers is het ook zaak om de benodigde kracht op de binnenring uit te oefenen – ga je drukken op de buitenring of de afscherming, dan kun je het lager vernielen. Wanneer de lengte van de koolborstels te klein begint te worden – meestal onder de 5 tot 6 millimeter – vervang ze dan. Nieuwe koolborstels steken zo'n 15 millimeter uit. Wanneer de koolborstels versleten zijn, geldt dat meestal ook voor de sleepringen van de rotoras, ook al staat dit in geen verhouding tot de slijtage die optreedt bij de collector van een gelijkstroomdynamo. Draai de sleepringen net zo ver af dat de groeven niet meer aanwezig zijn. Na het afdraaien kun je de sleepringen nog met metaalpoets bewerken, zodat ze nog gladder worden en de slijtage aan de koolborstels nog geringer zal zijn.

Let bij het in elkaar zetten van de gelijkstroomdynamo goed op de isolatie van de diodeplaat. Vergeet je hier een ringetje, dan kan dat meteen bij het aansluiten op de accu al tot een kortsluiting leiden, waardoor de dioden kapotgaan.

Na het in elkaar zetten is het zaak de dynamo even kort te testen. Wanneer je de rotor draait mag er niets aanlopen of rammelen – het enige wat je mag horen is het glijden van de koolborstels over de sleepring.



30 tot 40 decibel naar beneden te brengen. Met andere woorden, het kan misschien wel, maar zal uiteindelijk meer kosten dan een kant en klare generator voor aan boord. En wanneer je zo'n landgenerator gewoon luchtgekoeld aan boord

gaat gebruiken, dan is dat te vergelijken met een paar goede terrasverwarmers die in de hoogste stand in je boot staan te stralen – de warmte-opbrengst daarvan is ongeveer vergelijkbaar met die van een luchtgekoelde 6kW-generator.

8

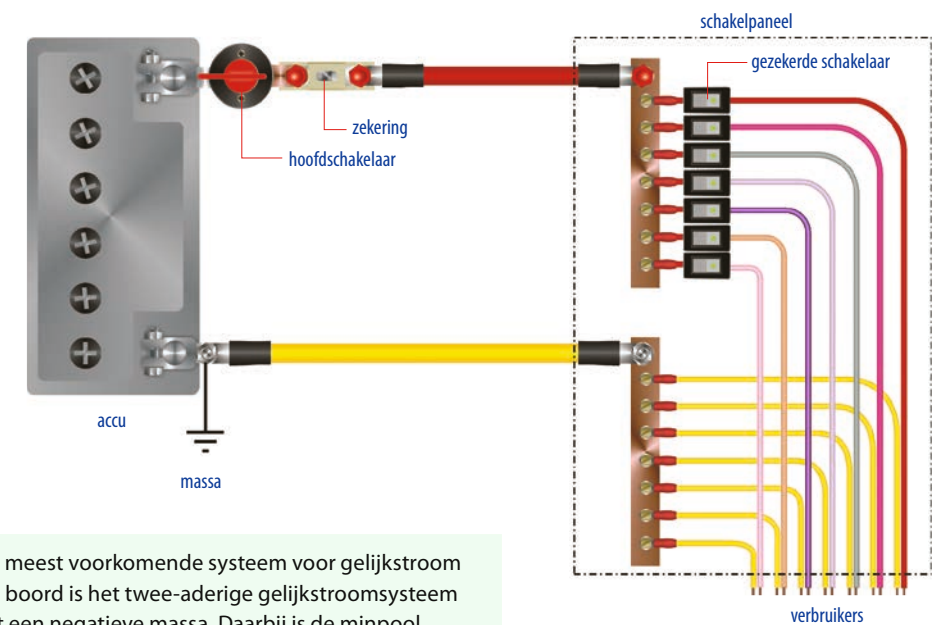
## HET GELIJKSTROOMBOORDNET (DC)

### DE BASIS

Tot het einde van de vorige eeuw bestonden er allerlei normen en richtlijnen waarin de uitvoering van gelijkstroomnetten aan boord van pleziervaartuigen werden voorgeschreven. Alle regels waren echter nogal verschillend van elkaar – zo was volgens de ene richtlijn een spanningsverlies in de bedrading van 10% toelaatbaar, terwijl volgens andere richtlijnen 5 of 2% spanningsverlies

het maximum was. Bij de start van het jaar 2000 kwam er echter een einde aan alle onduidelijkheid met het uitkomen van de internationale norm ISO 10133, die door alle instanties van deze organisatie werd overgenomen en wereldwijd als uitgangspunt gold. Hier kwam in 2020 echter weer verandering in: de ISO 10133 werd met 'wisselstroomnorm' 13297 samengevoegd. Het resultaat is een nieuwe ISO 13297, genaamd 'kleine

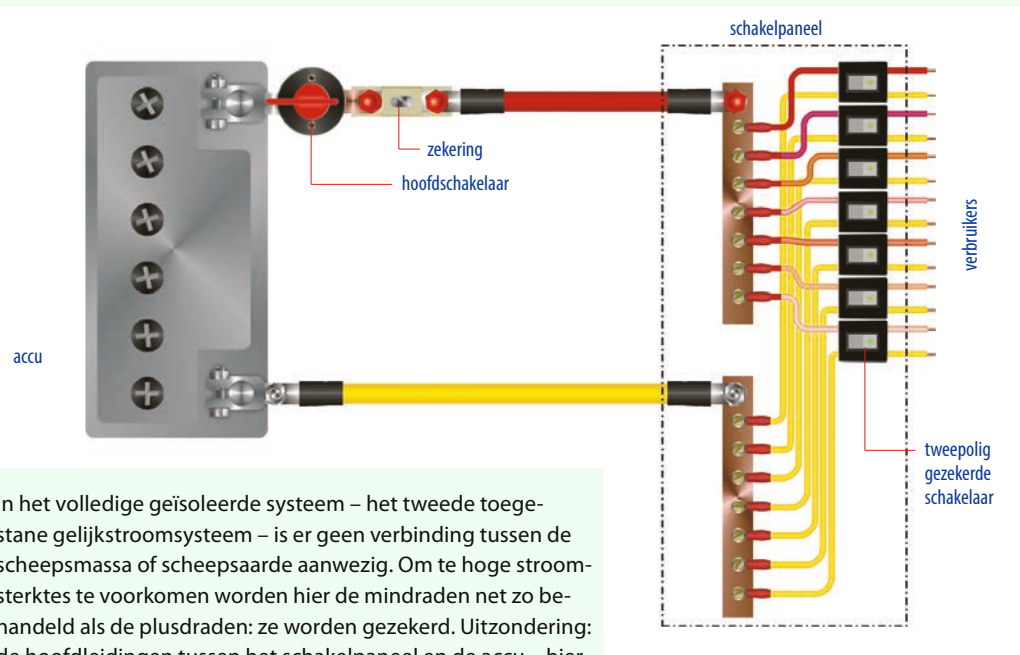
### TWEE-ADERIG SYSTEEM MET EEN NEGATIEVE MASSA



Het meest voorkomende systeem voor gelijkstroom aan boord is het twee-aderige gelijkstroomstelsel met een negatieve massa. Daarbij is de minpool

van het systeem met de massa of de aarde, dus de romp, de schroefinstallatie of de aarddraad van het wisselstroomstelsel verbonden. Metalen rompen mogen daarbij niet als geleider worden gebruikt. De zekering van de bedrading is alleen in de positieve draden aanwezig, zekeringen of gezeekerde schakelaars in de negatieve draden zijn niet aanwezig.

## VOLLEDIG GEÏSOLEERDE TWEE-ADERIGE SYSTEMEN



In het volledige geïsoleerde systeem – het tweede toegestane gelijkstroomstelsel – is er geen verbinding tussen de scheeps massa of scheepsaarde aanwezig. Om te hoge stroomsterktes te voorkomen worden hier de mindraden net zo behandeld als de plusdraden: ze worden gezekerd. Uitzondering: de hoofdleidingen tussen het schakelpaneel en de accu – hier wordt de negatieve leiding niet afgezekerd. De afzekering op het schakelpaneel wordt met tweepolig gezeekerde schakelaars uitgevoerd, zodat de beide polen in geval van een te hoge stroomsterkte tegelijkertijd worden afgeschakeld.

vaartuigen – elektrische systemen – wissel- en gelijkstroominstallaties'. Er bestaat echter al een norm voor wissel- en gelijkstroom, namelijk de Duitse DIN EN ISO 13297. De inhoud is grotendeels hetzelfde, maar er staan een paar 'nationale voetnoten' bij.

Sinds 2008 is er echter nog een aanvullende norm van het Internationale Elektrotechnische Comité, de IEC 60092-507, ook wel DIN EN 60092-507 of VDE 0129-507 genoemd, die op het eerste gezicht een grote overlap heeft met de DIN EN ISO 13297. Wanneer je er wat dieper induikt, blijkt dat deze IEC alleen geldt voor jachten van 24 tot 50 meter die zijn uitgerust met een drie fasen-wisselstroomstelsel. We beperken ons hier tot de DIN EN ISO 13297, ook al menen veel elektrotechnici die aan kleine jachten werken dat de VDE 0129-507 moet worden gehanteerd.

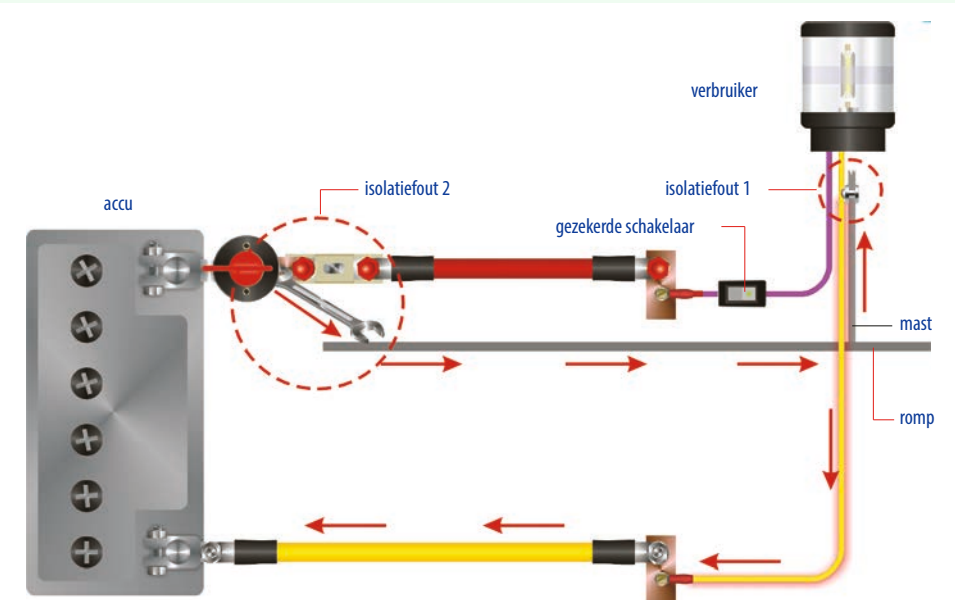
Terug naar het nu (2021). Kort en bondig staat in bijlage D van de DIN EN ISO 10133 vermeld: 'Deze internationale norm wordt gehanteerd om explo-

sies en brand te voorkomen.' Dit is, kort gezegd, een understatement. Minstens zoveel nadruk wordt er gelegd op de bedrijfszekerheid van het systeem. Beide doelen worden in de 'nieuwe' DIN EN ISO 13297 vastgelegd en in principe bereikt door het systeem uit te voeren met gezeekerde schakelaars die zijn afgestemd op de bedrading en de verbruikers. Maar het aanbrengen van zekeringen om te hoge stroomsterktes en kortsluiting te voorkomen alleen is niet genoeg om op de lange termijn ook een bedrijfszeker systeem te creëren. Zaak dus om eens wat dieper in te gaan op de inhoud van deze norm.

## EÉN- EN TWEE-ADERIGE SYSTEMEN

Eén-aderige systemen zijn aan boord van jachten niet toegestaan. Uitzondering hierop is de motor, waarvan het blok en de overige metalen onderdelen als geleider mogen worden gebruikt. Bij één-aderige systemen worden alleen de plusdraden als aparte draden uitgevoerd, de minleiding

## ISOLATIEFOUTEN IN GEÏSOLEERDE SYSTEMEN



In tegenstelling tot systemen waarbij de mindraad aan de massa is gekoppeld, moeten bij geïsoleerde systemen de plus- en de mindraad zijn gezekerd. Is alleen de positieve draad gezekerd, dan kan bij het optreden van twee isolatiefouten in het systeem een niet gezekerde kortsluiting ontstaan. In het voorbeeld is de isolatie van de negatieve draad van het ankerlicht in de mast beschadigd, er bestaat dus een kortsluiting die tot nu toe nog niet is opgemerkt. Ontstaat er nu echter een tweede isolatiefout, zoals in het voorbeeld een kortsluiting tussen de positieve accukabel en de romp, dan loopt de kortsluitstroom door de romp naar de beschadigde bedrading van het ankerlicht en van daaruit terug naar de minpool van de accu – zonder dat er iets gezekerd is. Wanneer de mindraad nu ook gezekerd was geweest door een gezeekerde tweepolige schakelaar te gebruiken – zoals aanbevolen – dan zou dit niet kunnen gebeuren.

wordt gevormd door de romp van het jacht. Dit werkt alleen bij jachten met een metalen romp en bij metalen jachten werd dit systeem tot de jaren zestig van de vorige eeuw wel eens toegepast. Aan de wal werd dit systeem tot enkele jaren geleden bij vrijwel alle auto's toegepast – dit bespaarde bedrading en dus kosten en gewicht, terwijl elektrochemische corrosie bij voertuigen vrijwel geen rol speelt, omdat de normale roest meestal veel sneller de kop op stak.

In schepen voert het misbruiken van de romp als geleider echter niet alleen tot onverwachte, ongedefinieerde potentiaalverschillen (waar het massapunt zich bevindt kan afhankelijk zijn van het aantal aangesloten apparaten en de hoeveel-

heid stroom die ze verbruiken), maar als gevolg van de maritieme omstandigheden ook zeer snel tot elektrolytische corrosie die bij jachten die in het water liggen heel andere gevolgen kan hebben dan bij auto's die op het land rondrijden – zo zal een auto als gevolg van elektrolytische corrosie niet snel afzinken, een jacht wel. Samenvattend: in één-aderige systemen worden alleen de positieve leidingen apart aangelegd, de negatieve geleiding wordt – minstens gedeeltelijk – door de metalen romp verzorgd. Dus wanneer het elektrische systeem in gebruik is loopt er een stroom door de romp. Deze systemen zijn, zoals goed voor te stellen, niet toegestaan.

Het feit dat de romp niet als geleider mag wor-

den gebruikt, zorgt ervoor dat veel klussers en sommige elektrotechnici van mening zijn dat er geen verbinding tussen het gelijkstroomnet en de romp mag bestaan. Deze veronderstelling klopt niet, zoals later nog zal blijken.

### TWEE-ADERIGE SYSTEMEN MET DE MIN AAN DE MASSA

Eerst even opnieuw de definitie van het begrip 'massa' (die in de EN ISO 10133 inhoudelijk gelijk wordt gesteld aan 'aarde'): aarding – en dus volgens DIN de massaverbinding – is een bedoelde of onbedoelde geleidende verbinding van delen van een elektrisch systeem met de algemene aarde. Met 'aarde' wordt de potentiaal van het aardoppervlak bedoeld, waarmee dan elk geleidend deel van het oppervlak van de romp, waarop onderdelen van het stroomnet zijn aangesloten, is verbonden. Daarbij kan het om de romp zelf gaan – bij metalen rompen – of om delen van het voortstuwingssysteem, roerbladen, aardplaten, opofferingsanoden of andere metalen voorwerpen onder water.

Het woordje 'elk' speelt hier een belangrijke rol, zoals verderop in het boek bij de onderwerpen 'elektrochemische corrosie' en 'bliksembeveiliging' zal blijken. Als aarding geldt overigens ook een verbinding met de aarddraad van een wisselstroomstelsel. De motor neemt ook hier een uitzonderingspositie in: die heeft een eigen 'motormassa', die als geleidende verbinding mag worden gebruikt, maar die niet geaard mag zijn. In twee-aderige systemen, waarbij alleen de positieve leidingen met zekeringen of zekeringsautomaten zijn beschermd, moet de minpool van het systeem zijn geaard en dus zijn verbonden met de scheepsaarde. De aarding bestaat meestal uit een directe verbinding tussen de minpool van de serviceaccu en de scheepsaarde.

Met name aan boord van aluminiumjachten tref je vaak systemen aan waarbij het complete gelijkstroomstelsel uit angst voor elektrolytische corrosie van de romp is gescheiden, zonder dat de minkabels zijn gezeerd. Deze manier van werken vergroot de kans op het in brand vliegen van leidingen – iets wat in een goed aangelegd systeem vrijwel onmogelijk is. Twee gelijktijdig optredende isolatiefouten zijn voldoende voor

het ontstaan van brand, zoals te zien in het voorbeeld 'Isolatiefouten in geïsoleerde systemen'. Samenvattend: in een twee-aderig gelijkstroomstelsel met een negatieve massa is de minpool van het systeem met de massa (aarde) verbonden. De verbruikers zijn met positieve en negatieve leidingen aangesloten, waarvan echter alleen de positieve leidingen afgezekerd hoeven te worden. Onder normale omstandigheden loopt er geen stroom door de massa-(aard-)draad.

### VOLLEDIG GEÏSOLEERD TWEE-ADERIG GELIJKSTROOMSTELSEL

In dit tweede toegestane systeem bestaat er geen verbinding tussen het gelijkstroomnet en de aarde (massa). Voorwaarde daarvoor is dat ook de negatieve draden zijn afgezekerd middels gekoppelde tweepolige gezeerde schakelaars, waarmee de plus- en de minleiding in geval van een probleem gelijktijdig worden onderbroken – smeltzekeringen kunnen hier niet worden gebruikt. Uitzondering: de minleiding tussen de accu en het schakelpaneel hoeft niet te zijn afgezekerd. Dit principe kan niet worden gebruikt bij wisselstroomsystemen – deze moeten altijd geaard zijn.

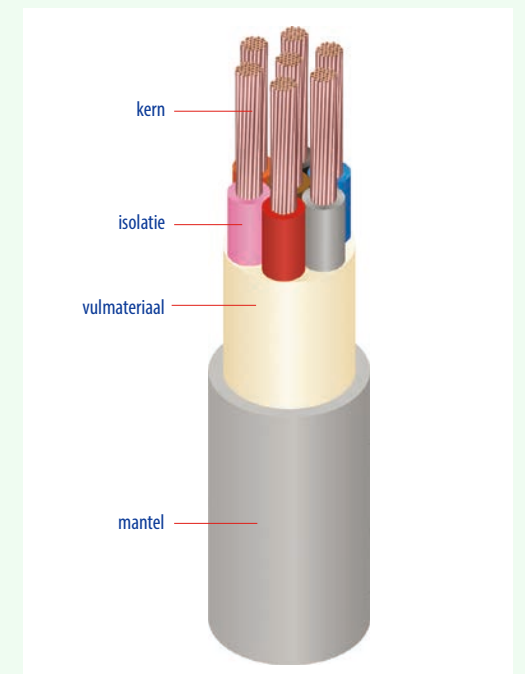
### KABELS EN STROOMDRADEN

Voor het kiezen van de juiste kabels en bedrading gelden in principe drie criteria: flexibiliteit, stroomsterkte en bedrijfstemperatuur. Leidingen met een niet-flexibele kern mogen aan boord van jachten niet worden toegepast: door trillingen kunnen de kernen – met name bij de verbindingen – binnen korte tijd breken. Het kleinste aantal benodigde kerndraden in een stroomdraad is gebaseerd op de draaddoorsnede en de belasting van de draad. Wanneer de draad veel moet kunnen bewegen moet de kern uit meerdere en dunne draden worden opgebouwd. De minimale aantallen benodigde kerndraden zijn weergegeven in het blokje 'Kabels en stroomdraden: flexibiliteit'.

De benodigde draaddoorsnede wordt vervolgens bepaald op basis van de maximaal te verwachten stroomsterkte. Dat lijkt eenvoudig, maar is het niet. Dat komt hierdoor: loopt er stroom door een geleider, dan wordt deze warm. Nu hebben

### KABELS EN STROOMDRADEN: OPBOUW

In gelijkstroomboordnetten mogen alleen geïsoleerde stroomgeleiders van koper worden gebruikt. De minimale draaddoorsnede is meestal 1 kwadraatmillimeter, in uitzonderingsgevallen – bijvoorbeeld bij schakelpanelen – zijn ook 0,75 kwadraatmillimeter draden toegestaan. Ook voor het aantal draden waaruit de kern is opgebouwd bestaan minimale waarden. Een kern met een doorsnede van 1,5 kwadraatmillimeter moet bijvoorbeeld uit minstens 19 aparte kerndraden zijn opgebouwd. Kernen bestaand uit één massieve draad zijn niet toegestaan. Het materiaal en de dikte van de isolatie bepalen de spanningsvastheid en de temperatuurbestendigheid van een kabel. De isolatie moet uit niet-ontvlambare materialen bestaan en minstens zelfdovend zijn. Voor het gebruik in de machinekamer moet de isolatie ook oliebestendig zijn en minstens tot 70 graden Celsius kunnen worden gebruikt. In meeraderige kabels zijn de aparte kernen omgeven door een vulmateriaal en voorzien van een mantel, die voornamelijk een mechanische bescherming biedt.

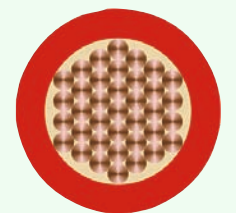


de verschillende isolatiematerialen verschillende maximale temperaturen die tijdens het gebruik mogen worden bereikt zonder dat er schade optreedt aan de draad (temperatuurklasse van de isolatie). Een draad met een doorsnede van 1,5 kwadraatmillimeter met een temperatuur-

klasse voor de isolatie van 60 graden Celsius mag worden gebruikt voor stroomsterktes tot 12 ampère, maar wanneer een maximale temperatuur van 125 graden is toegestaan, dan mag er een stroom van 30 ampère lopen. Deze waarden zijn gebaseerd op een omgevingstemperatuur

### KABELS EN STROOMDRADEN: FLEXIBILITEIT

De flexibiliteit van een kabel wordt bepaald door het aantal aparte kerndraden. Hoe meer aparte kerndraden, hoe flexibeler de kabel. Voor het bedraden van vaartuigen zijn in de EN ISO 10133 minimale aantallen voor het aantal aparte kerndraden aangegeven, die ten eerste afhankelijk zijn van de draaddoorsnede en ten tweede van de aard van de belasting. Type A geldt voor algemene bedrading, type B is bedoeld voor kabels die tijdens het gebruik ook regelmatig op buiging worden belast.



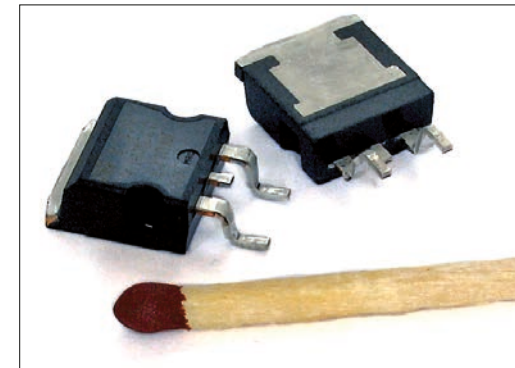
kabeltype	minimaal aantal aparte kerndraden bij een draaddoorsnede van															
	0,75	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150	
	mm <sup>2</sup>															
A	16				19				37	49	127	127	127	259	418	418
B	-	-	26	41	65	105	168	266	420	665	1064	1323	1666		2107	

10

## BOORDNET VAN DE TOEKOMST: BUSSYSTEMEN

Kijk eens naar de ontwikkelingen in de auto-industrie aan het eind van de vorige eeuw: wegens de toenemende (en nog steeds toenemende) comfort- en veiligheidsvoorzieningen

in de auto worden steeds meer elektrische verbruikers, meters en schakelaars ingebouwd. ABS, ESP, elektrisch bedienbare ramen en aircó's hebben niet alleen stroom nodig, maar ook be-



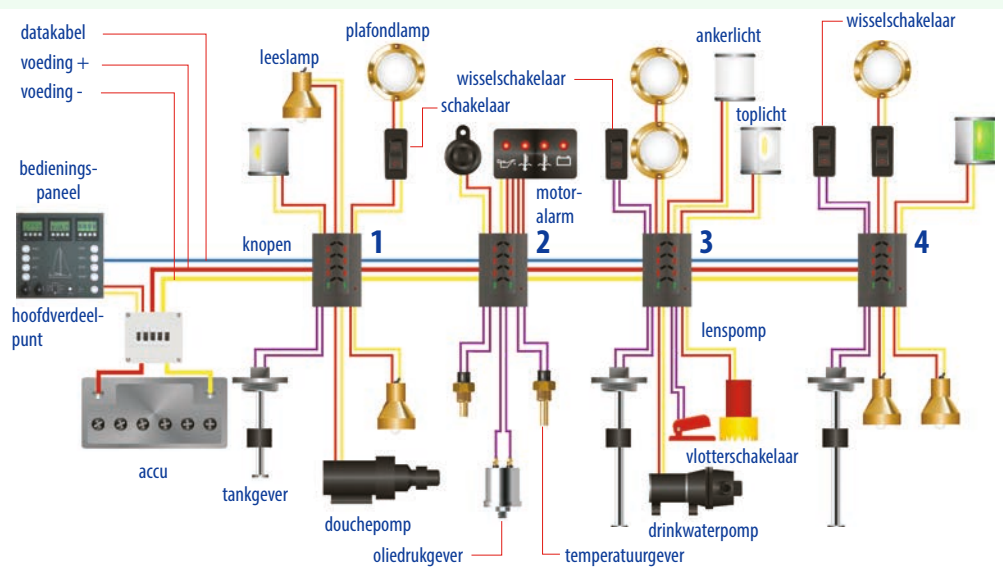
MOSFET met 120A-schakelvermogen

kabeling die de stroom transporteert. Daardoor ontstond er een situatie die door twee factoren belemmerd werd: enerzijds was er niet meer voldoende ruimte om de bedrading weg te werken, anderzijds moesten steeds meer bedieningsknoppen op multifunctionele bedieningselementen worden ondergebracht, waarin de ruimte om alle aansluitingen en de vaak dikke kabels onder te brengen gewoonweg niet aanwezig is. De oplossing voor dit probleem is door het bedrijf Infineon aangedragen in de vorm van de zogenaamde PROFET. Dit onderdeel – dat overi-

gens niets met Bijbelse profeten van doen heeft – bestaat uit een MOSFET (Metall Oxid Semiconductor Field Effect Transistor, metaaloxide-halfgeleider-veldeffecttransistor) met een besturingssysteem.

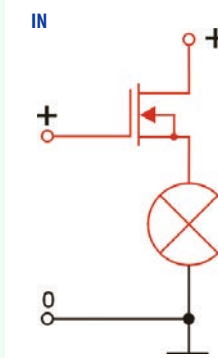
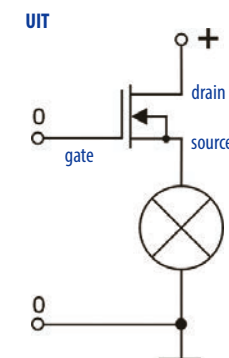
MOSFET's zijn ideale schakelaars die wel wat lijken op een relais. Met een zeer kleine stroom kunnen grote stromen van honderden ampères vrijwel verliesvrij en zeer snel afgeschakeld worden. De ontwikkeling van deze onderdelen heeft onder andere geleid tot elektronisch gecommuteerde borstelloze gelijkstroommotoren (zie 'elektrische voortstuwing') en omvormers waarvan het spanningsverloop op andere stroombronnen kan worden aangepast (zie 'Het wisselstroomboordnet – AC'). In de jachtbouw heeft het gebruik van de MOSFET als gevolg dat de bedieningselementen (schakelaar, regelaar) niet meer aan de stroom en draaddoorsnede van de verbruiker aangepast hoeven te worden, maar kunnen worden toegespitst op de benodigde stroomstromen. Deze bedragen meestal niet meer dan enkele milliampères. De eigenlijke schakelaar wordt dus van het schakelpaneel verplaatst naar het centrale besturingssysteem van het

### BUSPRINCIPE



In bussystemen wordt het gehele boordnet middels twee stroomdraden (plus en min) van stroom voorzien, die – uitgevoerd in de juiste (forse) draaddoorsnede – door het hele jacht lopen. Op deze hoofddraden zijn zogenoemde knopen aangesloten, vanwaar aftakkingen naar de verschillende verbruikers lopen. In de knopen zitten elektrische schakelaars, die door signalen uit de datakabel worden aangestuurd. Omgekeerd kunnen de knopen ook data, bijvoorbeeld van de temperatuurgever of van schakelaars, ontvangen, verwerken en onderling uitwisselen. Zo kan bijvoorbeeld het bedienen van de wisselschakelaar bij knoop 4 bewerkstelligen dat die aan knoop 3 gekoppelde kajuitverlichting aan- of uitgeschakeld wordt. De gehele installatie kan vanuit een centraal bedieningspaneel worden aangestuurd en gecontroleerd.

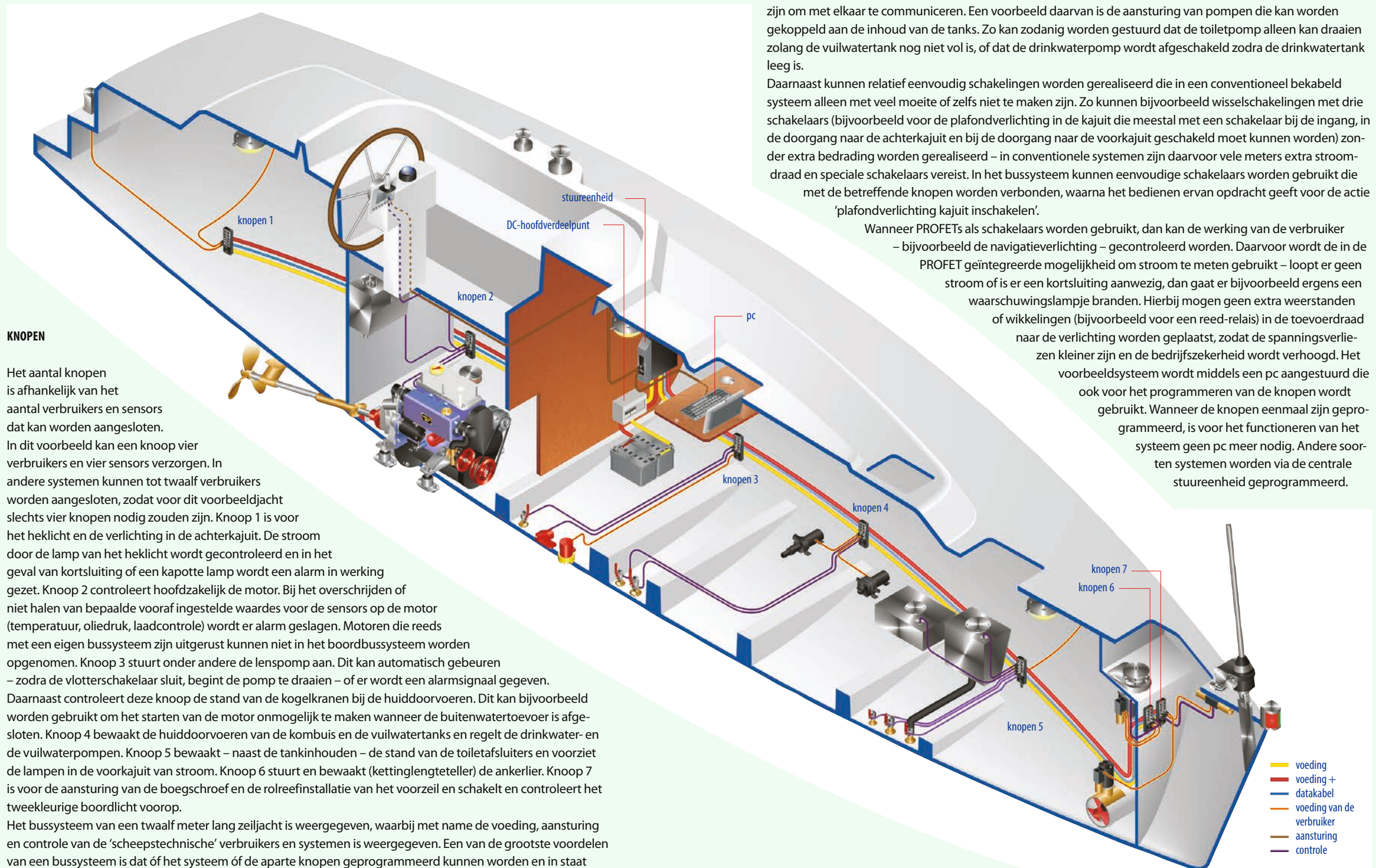
### MOSFET



MOSFET's nemen in de automobielbranche steeds meer de functie van schakelaars en relais over. De aansluitingen van deze onderdelen heten Gate (stuur-elektrode), Drain (afvoer) en Source (bron). De tussenruimte tussen Drain en Source is in rusttoestand niet-geleidend en komt overeen met een geopende schakelaar. Zodra op de Gate een positieve spanning wordt gezet, wordt de Drain-Source-route geleidend, de schakelaar is gesloten. De interne weerstand van de MOSFET tussen Drain en Source bedraagt

afhankelijk van de uitvoering ongeveer 2 milliohm. Dit levert maar een heel klein vermogensverlies op, wat enerzijds de spanningsval ten goede komt (2 milliohm bij 10 ampère geeft een spanningsverlies van 0,02 volt), anderzijds geeft dit de mogelijkheid om een klein onderdeel te maken, omdat er maar weinig warmte hoeft te worden afgevoerd. Omdat deze halfgeleiders in vergelijking tot mechanische schakelaars zeer snel zijn (schakeltijd deel minder dan 100 microseconden), kun je met vergelijkbare aansturingen zonder iets extra's dimmers of een motoraanstuuring op pulsduurmodulatiebasis creëren.

## BUSSYSTEMEN – OVERZICHT



## KNOPEN

Het aantal knopen is afhankelijk van het aantal verbruikers en sensors dat kan worden aangesloten.

In dit voorbeeld kan een knoop vier verbruikers en vier sensors verzorgen. In andere systemen kunnen tot twaalf verbruikers worden aangesloten, zodat voor dit voorbeeldjacht slechts vier knopen nodig zouden zijn. Knoop 1 is voor het heklicht en de verlichting in de achterkajuit. De stroom door de lamp van het heklicht wordt gecontroleerd en in het geval van kortsluiting of een kapotte lamp wordt een alarm in werking gezet. Knoop 2 controleert hoofdzakelijk de motor. Bij het overschrijden of niet halen van bepaalde vooraf ingestelde waarden voor de sensors op de motor (temperatuur, oliedruk, laadcontrole) wordt er alarm geslagen. Motoren die reeds met een eigen bussysteem zijn uitgerust kunnen niet in het boordbussysteem worden opgenomen. Knoop 3 stuurt onder andere de lenspomp aan. Dit kan automatisch gebeuren – zodra de vlotterchakelaar sluit, begint de pomp te draaien – of er wordt een alarmsignaal gegeven. Daarnaast controleert deze knoop de stand van de kogelkranen bij de huiddoorvoeren. Dit kan bijvoorbeeld worden gebruikt om het starten van de motor onmogelijk te maken wanneer de buitenwatertoevoer is afgesloten. Knoop 4 bewaakt de huiddoorvoeren van de kombuis en de vuilwatertanks en regelt de drinkwater- en de vuilwaterpompen. Knoop 5 bewaakt – naast de tankinhouden – de stand van de toiletafsluiters en voorziet de lampen in de voorkajuit van stroom. Knoop 6 stuurt en bewaakt (kettlinglengteteller) de ankerlier. Knoop 7 is voor de aansturing van de boegschroef en de rolreefinstallatie van het voorzeil en schakelt en controleert het tweekleurige boordlicht voorop.

Het bussysteem van een twaalf meter lang zeiljacht is weergegeven, waarbij met name de voeding, aansturing en controle van de 'scheepstechnische' verbruikers en systemen is weergegeven. Een van de grootste voordelen van een bussysteem is dat óf het systeem óf de aparte knopen geprogrammeerd kunnen worden en in staat

zijn om met elkaar te communiceren. Een voorbeeld daarvan is de aansturing van pompen die kan worden gekoppeld aan de inhoud van de tanks. Zo kan zodanig worden gestuurd dat de toilet pomp alleen kan draaien zolang de vuilwatertank nog niet vol is, of dat de drinkwaterpomp wordt afgeschakeld zodra de drinkwatertank leeg is.

Daarnaast kunnen relatief eenvoudig schakelingen worden gerealiseerd die in een conventioneel bekabeld systeem alleen met veel moeite of zelfs niet te maken zijn. Zo kunnen bijvoorbeeld wisselschakelingen met drie schakelaars (bijvoorbeeld voor de plafondverlichting in de kajuit die meestal met een schakelaar bij de ingang, in de doorgang naar de achterkajuit en bij de doorgang naar de voorkajuit geschakeld moet kunnen worden) zonder extra bedrading worden gerealiseerd – in conventionele systemen zijn daarvoor vele meters extra stroomdraad en speciale schakelaars vereist. In het bussysteem kunnen eenvoudige schakelaars worden gebruikt die met de betreffende knopen worden verbonden, waarna het bedienen ervan opdracht geeft voor de actie 'plafondverlichting kajuit inschakelen'.

Wanneer PROFETs als schakelaars worden gebruikt, dan kan de werking van de verbruiker – bijvoorbeeld de navigatieverlichting – gecontroleerd worden. Daarvoor wordt de in de PROFET geïntegreerde mogelijkheid om stroom te meten gebruikt – loopt er geen stroom of is er een kortsluiting aanwezig, dan gaat er bijvoorbeeld ergens een waarschuwingslampje branden. Hierbij mogen geen extra weerstanden of wikkelingen (bijvoorbeeld voor een reed-relais) in de toevoerdraad naar de verlichting worden geplaatst, zodat de spanningsverliezen kleiner zijn en de bedrijfszekerheid wordt verhoogd. Het voorbeeldsysteem wordt middels een pc aangestuurd die ook voor het programmeren van de knopen wordt gebruikt. Wanneer de knopen eenmaal zijn geprogrammeerd, is voor het functioneren van het systeem geen pc meer nodig. Andere soorten systemen worden via de centrale stuurseenheid geprogrammeerd.

voeding  
voeding +  
datakabel  
voeding van de verbruiker  
aansturing  
controle