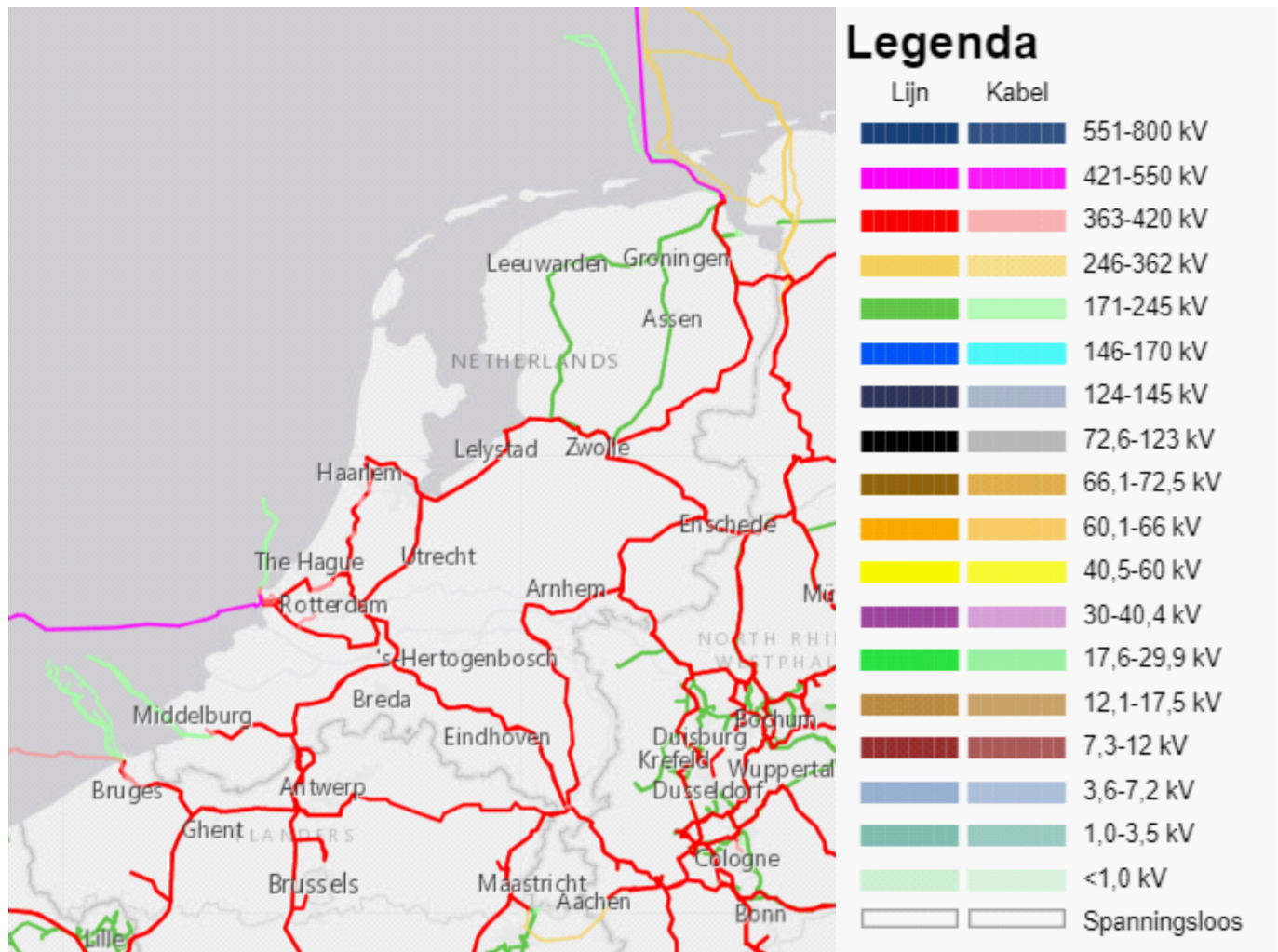


Hoogspannende hoogspanning (1)

In het nieuws wordt tegenwoordig vaak gesproken over het elektriciteitsnet. Zo zijn er waarschuwingen dat het stroomnet in sommige delen van het land zo zwaar belast is, dat er geen ruimte is voor extra stroomvraag in die gebieden. Deze problemen gaan in het algemeen over het lokale stroomnet dat door netbeheerders als Liander wordt gebouwd en beheerd, maar er zijn ook zeker problemen voor het nationale hoogspanningsnet. Al deze problemen komen naar voren omdat de vraag naar stroom in huishoudens en bedrijven extreem groeit. Dat wordt voor een groot deel veroorzaakt door de energietransitie die nu aan het plaatsvinden is, waarbij veelal fossiele brandstoffen worden uitgefaseerd ten behoeve van elektriciteit. Het voor elkaar krijgen van deze elektrificatie zal een grote opgave zijn voor de wereld, zowel financieel als technisch gezien. Uiteraard zijn we op deze website vooral geïnteresseerd in de technische kant van het verhaal. Het leek mij dus een interessante opgave om na te gaan hoe het stroomnet nu eigenlijk werkt.

In dit artikel zal ik voornamelijk focussen op het *hoogspanningsnet*, en dan met name de werking van de stroom en sommige eigenschappen ervan. Over het dagelijkse reilen en zeilen zijn ook veel leuke dingen te vertellen, en dat zal ik ook zeker doen in een vervolgartikel. In Nederland (en andere landen) is het stroomnet gelaagd opgebouwd. Om deze gelaagde opbouw te illustreren is een veelgebruikte analogie die van een wegennet. Kleine lokale weggetjes zorgen ervoor dat alle huizen en bedrijven op elkaar aangesloten zijn, terwijl provinciale wegen zorgen dat men snel kan reizen binnen een regio. Voor het grote lange-afstandsverkeer hebben we vervolgens snelwegen waar veel transport plaats kan vinden. Het stroomnet werkt op vergelijkbare wijze. Lokale netbeheerders zorgen ervoor dat huizen en bedrijven voorzien zijn van stroom, terwijl het hoogspanningsnet (de provinciale

wegen en snelwegen) ervoor zorgt dat veel stroom zich kan verplaatsen over het hele land. De term ‘hoogspanning’ is in Nederland een verzamelnaam voor alle stroomnetten met een minimum spanning van 35000 volt (of 35 kilovolt) tot 380 000 volt (of 380 kilovolt). Hogere voltages zijn ook zeker mogelijk, maar die worden in Nederland niet toegepast.



Afbeelding 1. Een kaart van de hoogspanningslijnen in Nederland. In de legenda staan veel meer kleuren dan op de kaart zijn aangegeven. Dit komt doordat er veel meer opties zijn; deze kaart is een deel van een kaart die het hoogspanningsnet voor heel Europa weergeeft. Zoals te zien is gaan er enkele hoogspanningskabels de zee in. Sommige van deze kabels zijn internationale verbindingen met, bijvoorbeeld, Noorwegen en Engeland. Andere kabels (de groene lijn die de zee in gaat bij den Haag, bijvoorbeeld) gaan naar een windmolenpark op zee. Voor wie geïnteresseerd is: de kaart is [op dit web-adres](#) te vinden.

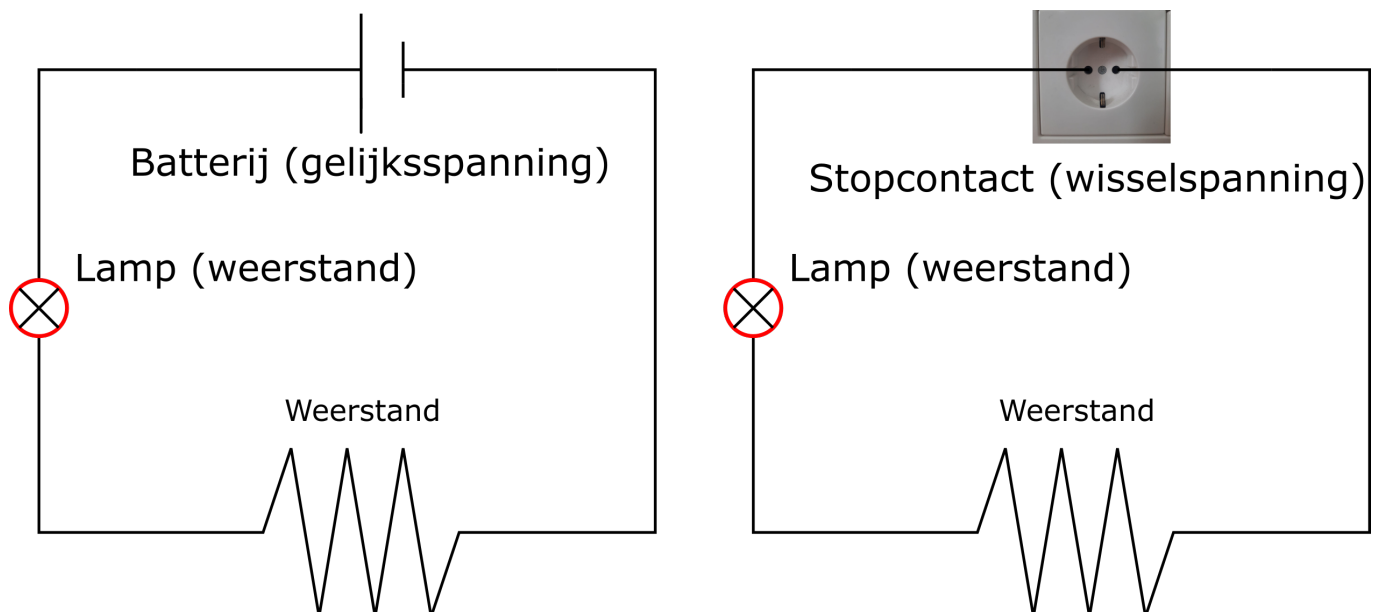
De basics van stroom

Voordat we ingaan op de elektriciteit die we zien op het hoogspanningsnet, is het de moeite

waard om het kort te hebben over hoe elektriciteit ook alweer werkt. Elektriciteit wordt beschreven aan de hand van drie eigenschappen: de spanning, het aantal ampères, en de weerstand in het circuit. Ampère is de naam van de eenheid die zegt hoeveel lading zich per seconde verplaatst, ofwel de natuurkundige grootheid 'stroom'. De spanning is verantwoordelijk voor het 'aanduwen' van de lading waardoor die zich verplaatst: de spanning veroorzaakt de stroom. De weerstand is juist het vermogen van een materiaal om verplaatsende lading tegen te houden, oftewel de 'remmende kracht'. De onderlinge relatie tussen deze drie eigenschappen is de welbekende wet van Ohm:

$$(U = I \times R) .$$

Een groot aantal ampères (I) betekent dus dat er ofwel een hoge spanning moet zijn, ofwel (en het liefst) zo weinig mogelijk weerstand. Nu is het zo dat de weerstand inherent is aan het materiaal waar de stroom doorheen geleid wordt. De stroom zelf komt pas op gang als er een spanning aangebracht wordt. De vraag is dus; hoe creëert men een spanning in een elektrisch circuit? In de eerste lessen van de middelbare school wordt dit vaak gedaan door simpelweg een batterij te nemen. Een batterij heeft altijd twee polen: een minpool, en een pluspool. Tussen deze twee polen zit een spanningsverschil. Sluit je de twee polen op elkaar aan met een geleider (en eventueel een weerstand), dan gaat er een stroom lopen. Dit is een voorbeeld van *gelijksspanning*. Daartegenover kan men ook gebruik maken van zogenaamde *wisselspanning*. Dit is stroom die wordt aangedreven door een spanning waarbij de min- en pluspolen continu wisselen.



Afbeelding 2. Typische voorbeelden van een schakeldiagram. Links wordt de stroom ‘aangeduwd’ door een batterij (gelijksspanning). De stroom verliest zijn energie als die door de lamp en de weerstand heen gaat. Hierdoor gaat de lamp licht geven, en de weerstand warmte. Rechts is de spanningsbron het stopcontact, waar wisselspanning uitkomt. Voor dit circuit maakt het in principe niet uit wat de spanningsbron is, tenzij de weerstand of de lamp ‘diodes’ zijn (bijvoorbeeld LED-lampjes). Diodes laten stroom maar in één richting door, dus een constant wisselende stroomrichting zoals die bij een wisselspanning ontstaat, werkt dan niet goed. Voor LED-lampen in huis is dan ook altijd extra elektronica nodig om de lamp aan te sluiten.

Hoewel gelijkspanning intuïtief logischer lijkt om te gebruiken in het dagelijks leven, blijkt het dat wisselspanning veel voordelen heeft waardoor het uiteindelijk de standaard is geworden. Overigens is het wel zo dat, ten tijde van de eerste ontwikkeling van elektriciteit als een product, door de uitvinders Thomas Edison en Nikola Tesla, er een hevige strijd was tussen de twee over welke vorm van elektriciteit de beste was. Edison was van mening dat gelijkspanning de standaard moest worden, terwijl Tesla (of eigenlijk: het bedrijf dat de uitvindingen van Tesla omzette in producten) juist inzette op wisselspanning. Voor beide vormen van elektriciteit valt dan ook veel te zeggen. Elektronica gebruikt bijvoorbeeld altijd gelijkspanning, terwijl wisselspanning het handigst is voor industriële toepassingen in de vorm van elektromotoren. Voor het hoogspanningsnet, echter, is wisselspanning zoals we zullen zien ook verreweg de interessantste vorm van stroom – hoewel er uitzonderingen zijn! Ook kan wisselspanning effectiever gebruikt worden om veel vermogen te verspreiden met minder materiaal. Dat was in naoorlogs Europa een zeer overtuigende reden om wisselspanning te gebruiken. De aanleg van een hoogspanningsnet kost immers vele miljarden euro’s (in huidige bedragen omgerekend) aan mankracht en materiaal.

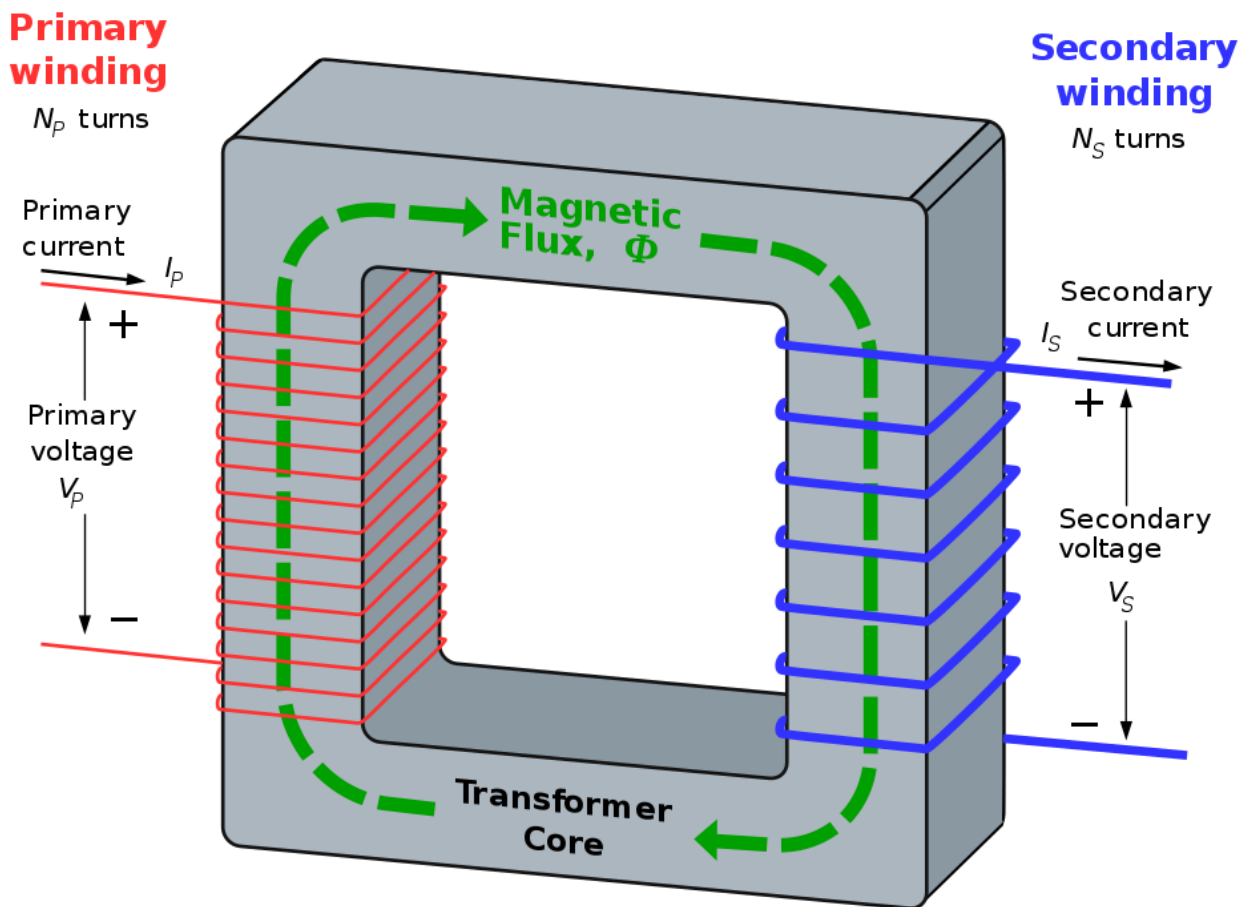
De wet van Lenz

De grootste reden dat wisselstroom in de praktijk heel gemakkelijk is, is dat het mogelijk is om naar believen de spanning te veranderen van hoog naar laag. Dit kan gedaan worden met transformatoren en de *wet van Lenz*. De wet van Lenz is een soort ‘actie = reactie’-wet voor elektriciteit:

$$\left(\frac{dB}{dt} = -V_{\text{inductie}} \right).$$

In woorden zegt deze formule: als een magneetveld verandert, ontstaat er een spanning. Als je een gesloten spoel (bijvoorbeeld een ring van koperkabel) hebt, en vervolgens met een magneetveld in de buurt komt, dan zal de geleider de magneet opmerken, en het magneetveld 'tegen willen werken'. De natuur houdt er in zekere zin niet van als dingen veranderen. De geleider (de ring van koperkabel) kan het magneetveld tegenwerken door zelf een magneetveld op te wekken dat tegengesteld is aan het magneetveld dat in de buurt komt van de kabel. Dit doet de geleider doordat er een stroom gaat lopen door de kabel; een stroom wekt immers een magneetveld op. De stroom in de kabel heet ook wel de *geïnduceerde stroom*.

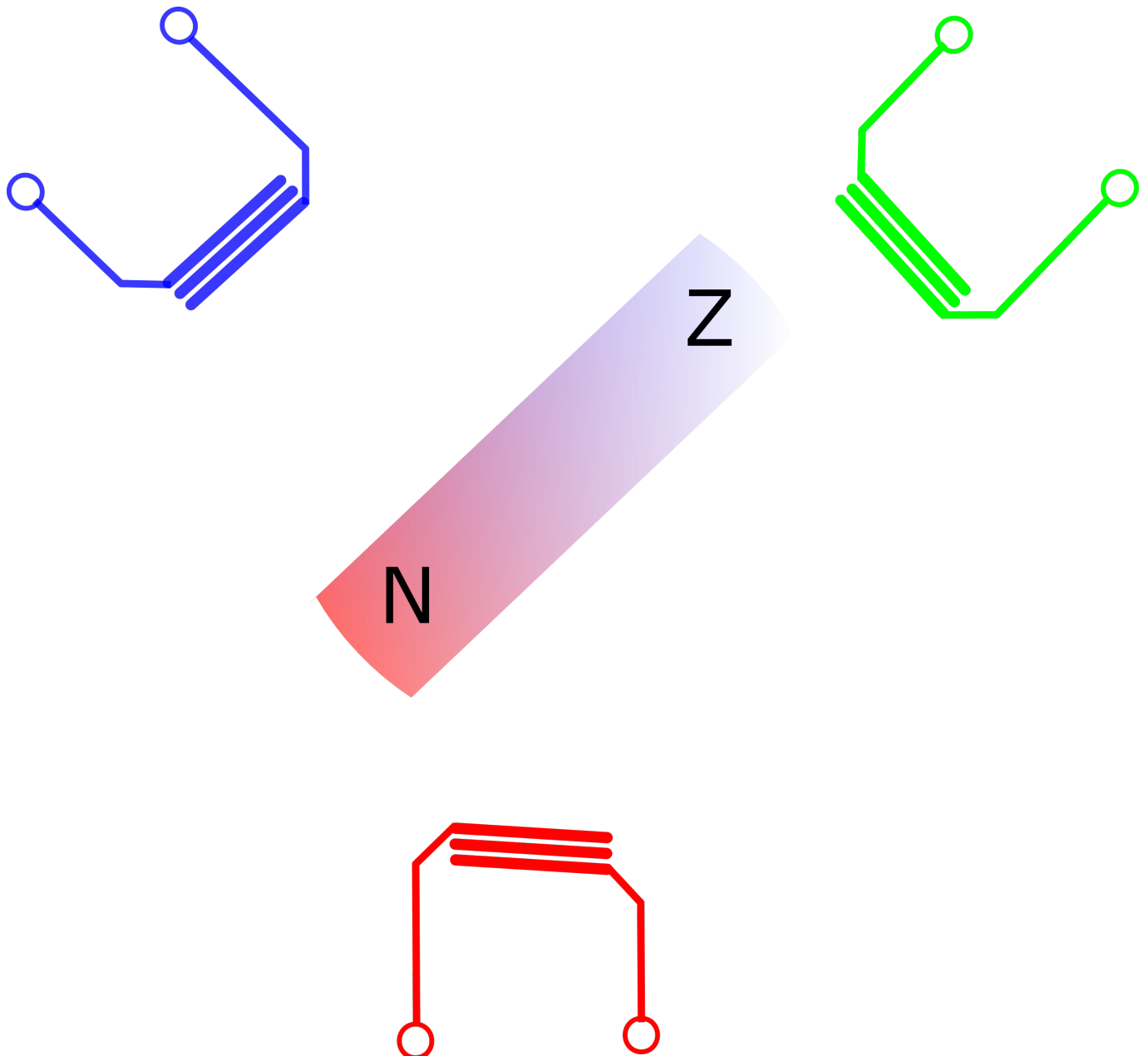
Het is dit fenomeen waarmee transformatoren spanning en stroom kunnen uitwisselen. Het opgewekte magneetveld in een koperen ring is namelijk afhankelijk van het aantal windingen van de ring, van de aangeleverde stroom en van de spanning. De wet van Lenz (en de manier waarop de transformatoren gebouwd zijn) zorgt ervoor dat de totale hoeveelheid energie aan beide kanten van de transformator even groot is. Door twee spoelen tegenover elkaar te zetten, elk met een verschillende aantal windingen, kan men eenvoudig stroom transformeren tussen hoog- en laagspanning, zodat het totale elektrische vermogen, gegeven door het product $(U \times I)$, behouden blijft – op verliezen door transformator-efficiëntie na, natuurlijk.



Afbeelding 3. Een schematische weergave van een transformator. Twee spoelen worden tegenover elkaar gezet. Een stroom die een spoel in gaat induceert een magnetisch veld. Omdat de stroom constant verandert (het is immers een wisselstroom) verandert het magneetveld ook. Door de wet van Lenz wordt er dus een spanning geïnduceerd in de andere spoel. In de praktijk worden de spoelen vaak met elkaar verbonden via een ijzeren kern. Die zorgt ervoor dat het opgewekte magneetveld niet verloren gaat naar de omgeving, maar rechtstreeks van spoel naar spoel wordt geleid. Bron: [Wikipedia](https://nl.wikipedia.org/wiki/Transformator).

Ook is wisselstroom heel eenvoudig op te wekken: dankzij de wet van Lenz weten we dat er een stroom geïnduceerd kan worden als het magneetveld verandert. Simpelweg een magneet rondjes laten draaien in de buurt van een spoel induceert dus al stroom in de spoel. Dit is wat er gebeurt bij grote elektriciteitsfabrikanten: door middel van het verbranden van kolen of gas produceert men stoom. Deze stoom wordt gebruikt om een gigantische turbine te laten draaien, die vervolgens magneten rondjes laten draaien, waarmee een stroom opgewekt wordt. In windmolens gebeurt ditzelfde iets directer: de wind laat de wieken

draaien, die vervolgens een turbine in de kop van de windmolen laten draaien. Zodoende wordt bewegingsenergie omgezet in elektrische energie. Overigens is het zo dat een dergelijke turbine met magneten twee kanten op werkt: net zoals men elektriciteit ermee kan opwekken, kan men er ook elektriciteit in stoppen, waarna de turbine door het omgekeerde proces begint te draaien. Het gevolg is dat je een elektromotor hebt!



Afbeelding 4. Een schematische weergave van een generator. Door de magneet rondjes te laten draaien, wordt in de spoelen (de rode, groene en blauwe icoontjes in de afbeelding) een stroom opgewekt. Doordat de spoelen exact gelijk zijn, en precies even ver van de magneet af staan, is de stroom in alle 3 de spoelen precies dezelfde, behalve dat ze iets op elkaar achterlopen doordat het magneetveld niet overal tegelijk langskomt. Met deze

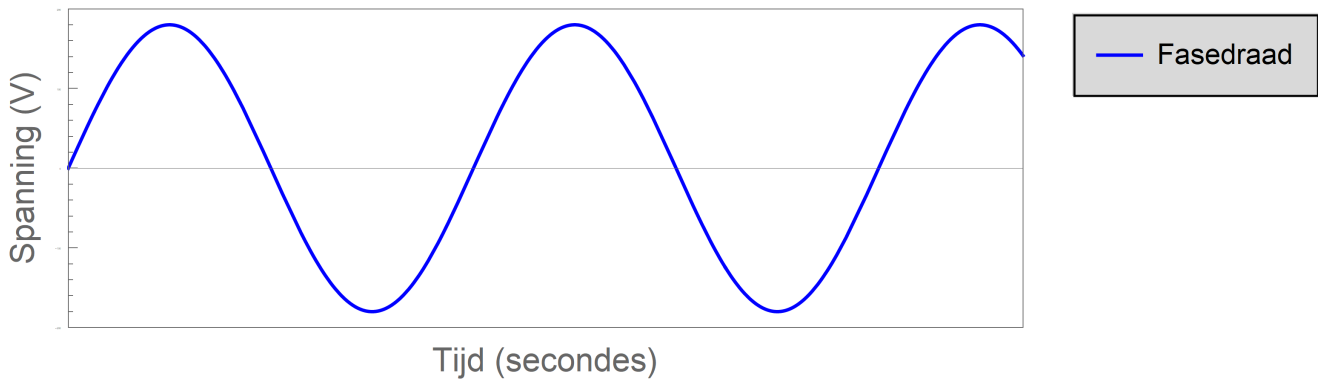
orientatie, waarbij de spoelen op gelijke afstand van elkaar staan, kan men daarom drie-fasestroom opwekken, zoals te zien in afbeelding 6 hieronder.

Wisselspanning

Het is de wet van Lenz die ons in staat stelt een grote stroom met een lage spanning om te zetten in een kleine stroom met een hoge spanning, waarbij de hoeveelheid energie die de stroom bij zich draagt behouden is. Waarom is dit handig? Welnu, de stroom in het hoogspanningsnet moet lange afstanden overbruggen. De kabels die hiervoor gebruikt worden hebben altijd een beetje weerstand, waardoor ze altijd een beetje energie verliezen in de vorm van uitgestraalde warmte. De energie die een kabel verliest aan warmte wordt gegeven door de formule

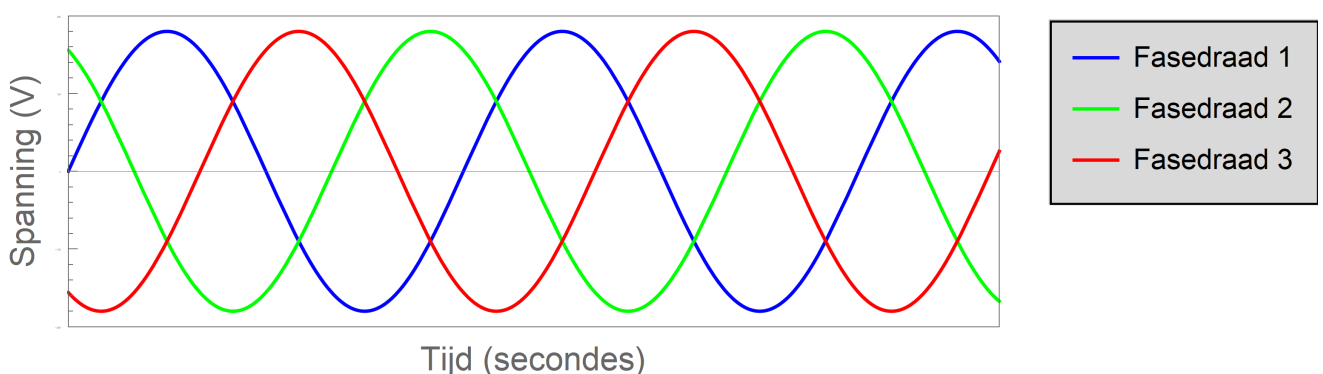
$$(P = I^2 \times R).$$

Oftwel: het verloren vermogen in een stuk kabel is kwadratisch evenredig met de stroom – bij bijvoorbeeld twee keer zoveel stroom is er vier zoveel vermogen, en wordt er dus ook vier keer zoveel warmte gegenereerd. Door de hoeveelheid stroom te verminderen (en dus de spanning op te schroeven) verliest men veel minder energie. Uiteraard kan men er ook voor kiezen om de weerstand te verlagen, maar dat kost meer moeite: het proces gaat lineair, niet kwadratisch, en het is bovendien heel duur omdat er meer materiaalkosten zijn voor dikkere kabels. Je zou nu overigens tegen kunnen weren dat dit probleem van energieverlies ook geldt voor gelijkstroom, en dat is helemaal waar. Dit argument van energieverlies is op zich dan ook geen reden om voor wisselspanning te kiezen boven gelijkspanning. Het is echter pas sinds relatief kort mogelijk om kostenefficiënt *gelijkstroom* te transformeren tussen hoge en lage spanning, zoals dat met wisselstroom al jaren kan. Voor het besparen van energie met de bovenstaande methode zijn zulke transformaties nodig, en daardoor was wisselspanning een natuurlijke keuze in vroegere tijden.



Afbeelding 5. Een diagram van een wisselspanning. De spanning staat hier uitgezet tegen de tijd. Als je de golfvorm van de stroom uit je stopcontact zou meten, zou je zoiets zien als in deze afbeelding.

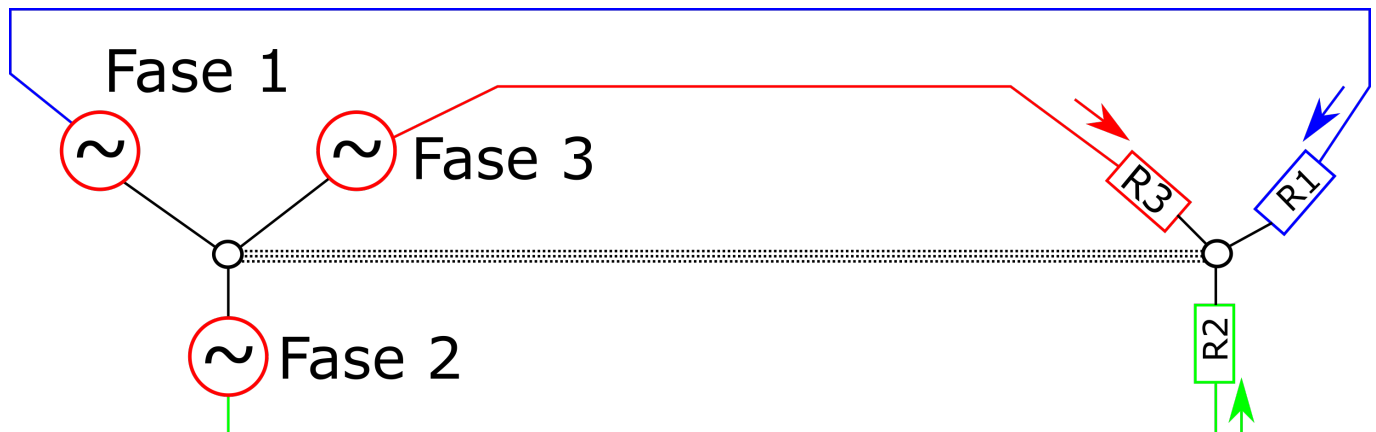
Er is echter ook een nadeel aan wisselstroom. Zoals te zien in de afbeelding hierboven, is de spanning, en dus de stroomsterkte, niet constant. Er zijn momenten waarop de stroom nul is (als de blauwe lijn door de x-as beweegt). Dit maakt voor het gebruik in huishoudens niet veel uit, maar voor de industrie kan het problematisch zijn vanwege de werking van elektromotoren, die dan niet heel gelijkmatig draaien. Dit probleem is vrij eenvoudig op te lossen: door verschillende stromen op te wekken met een onderling faseverschil, kun je garanderen dat er altijd stroom aanwezig is in het systeem. Dit faseverschil is te realiseren door de spoelen die de stroom opwekken in een generator bijvoorbeeld 120 graden ten opzichte van elkaar te plaatsen rondom de elektromotor of generator. (Zie afbeelding 4). Het resultaat is een stroom die door drie verschillende kabels loopt, waarbij de spanning in elke draad eruitziet als in de afbeelding hieronder.



Afbeelding 6. Een voorbeeld van driefasige stroom. Dit is typisch de stroom die door een hoogspanningsmast wordt voortgebracht. Elke kleur heeft zijn eigen stroomkabel in de hoogspanningsmast.

Naast het voorkomen van potentiële nulpunten heeft deze 3-faseconstructie nog een groot

voordeel: je hebt minder kabels nodig dan je zou denken. Om dit in te zien is het belangrijk om op te merken dat de som van alle drie de kabels op ieder tijdstip een spanning van nul volt heeft. Je zou dus de stroom kunnen opwekken, en de kabels vervolgens samen laten komen in één centraal punt, zonder dat er nog stroom afgevoerd moet worden - zie afbeelding 7. Op het punt van samenkomst heffen alle drie de stromen elkaar immers ook op.



Afbeelding 7. In deze afbeelding wordt duidelijk waarom wisselspanning zo kostenefficiënt kan zijn. Doordat de 3 fases opgeteld gelijk zijn aan een stroom van nul, kun je de kabels nadat ze hun werk gedaan hebben, in de weerstanden R1, R2 en R3 samen laten komen om elkaar op te heffen. Er is dan geen kabel nodig die teruggaat naar de bron (zoals in afbeelding 1 wel nodig is). De drie gestippelde kabels zijn dus niet nodig. In de praktijk wordt er alsnog wel één kabel terug getrokken, om potentiële lekstromen en dergelijk op te vangen, maar dit is alsnog veel goedkoper dan 3 kabels neerleggen. Dit is bijvoorbeeld hoe een wijkkast werkt: 3-fasestroom wordt aangeleverd in drie verschillende kabels. Vervolgens stuurt de kast één kabel naar elke straat, en van daar naar de huizen. Ieder afzonderlijk huis heeft dan één fase in huis. Vervolgens gaat de stroom terug naar de wijkkast, en heft daar de stroom uit de andere kabels op.

Deze drie-fase-energie is momenteel de meest gebruikte vorm van elektriciteit die het hoogspanningsnet gebruikt. Dat is ook te zien aan de elektriciteitsmasten: altijd is het aantal kabels dat aan een hoogspanningsmast hangt een veelvoud van drie. (Vaak is er wel een extra kabeltje op de top voor bliksemafleiding. Aparte teruggaande kabels voor lekstromen worden in hoogspanningsmasten in het algemeen niet gebruikt.)



Afbeelding 8: Een hoogspanningsmast. Zoals je kunt zien zijn er aan beide kanten van de mast drie keer vier kabels. De kabels in deze mast worden gegroepeerd, omdat het efficiënter is om meerdere kleine kabels naast elkaar te hebben dan één dikke kabel, een gevolg van het skin-effect (zie ook afbeelding 9). Afbeelding:

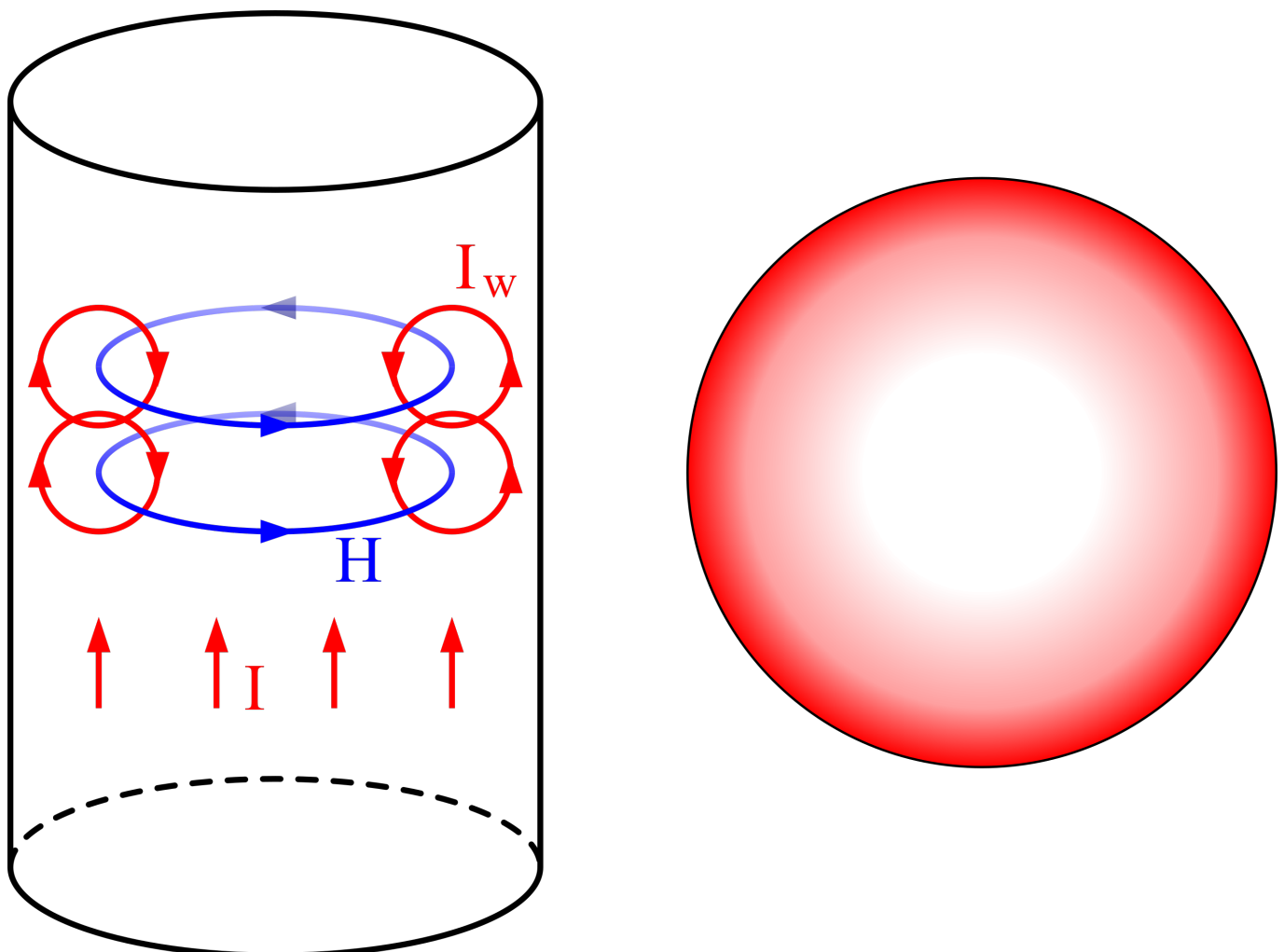
[Wikipedia.](#)

Wisselspanning is ook niet alles!

Wisselspanning heeft echter ook enkele nadelen. Het grootste nadeel van wisselspanning is dat er rondom de kabels altijd een variërend elektrisch veld is, wat energie uitstraalt op vergelijkbare manieren als we hierboven zagen bij de wet van Lenz. Een gelijkspanningskabel zou dit probleem niet (of minder) hebben. Het energieverlies is weliswaar klein over korte afstanden, maar voor lange afstanden kan het problematisch

worden.

Daarnaast heeft wisselspanning nog een groot probleem: het zogenaamde *skin-effect*. Zoals ik al eerder opmerkte, is het zo dat de natuur nooit zin heeft in verandering. Dit principe is de basis voor de wet van Lenz. Wisselspanning is echter, by design, continu aan het veranderen. Die verandering van het elektrische veld induceert weer magneetvelden *binnenin* de kabels. Deze magneetvelden wekken vervolgens weer stroom op om de wisselspanning tegen te werken. Deze opgewekte stromen binnenin de kabels heten ook wel *Eddy-stromen*. Ze hebben als gevolg dat de stroom aan de binnenkant van de kabel bijna volledig teniet wordt gedaan, en dat de geleiding bijna alleen maar aan de rand gebeurt. Dit probleem is enigszins tegen te gaan met speciale kabels, maar uiteindelijk blijft het zo dat de weerstand van de kabels bij wisselspanning altijd kunstmatig 'hoger' is, doordat niet het volledige volume van de kabel gebruikt kan worden.



Afbeelding 9. Het skin-effect. Een stroom induceert een magnetisch veld binnenin de kabel, wat vervolgens weer een nieuwe stroom induceert om de stroom in de kabel tegen te

werken. Bij gelijkspanning zou dit effect snel verdwijnen, omdat de stroom constant is (met uitzondering van het moment van 'omzetten van de schakelaar'), en er dus een constant magnetisch veld zou zijn, waarna de wet van Lenz ons vertelt dat er geen stroom geïnduceerd wordt. Bij wisselspanning blijft dit effect daarentegen volharden, waardoor de stroom in het centrum van de kabel bijna volledig tegengewerkt wordt. Effectief betekent dit dat de stroom vooral langs de randen van de kabel stroomt. Hierdoor is de effectieve weerstand in de kabel hoger dan bij gelijkspanning, waardoor de stroom meer energie verliest in de vorm van warmte.

Zoals ik al eerder schreef: gelijkspanningsnetten met een hoge spanning zijn in principe ook heel nuttig. Moderne innovaties maken het rendabel om gelijkspanningen te transformeren tot heel hoge voltages. Een ander groot voordeel is dat gelijkspanningskabels tussen stroomnetten met verschillende frequenties gebruikt kunnen worden. Dit soort gelijkspanningskabels voor hoogspanning worden dan ook vooral gebruikt voor internationale verbindingen. In Nederland hebben we bijvoorbeeld dit soort kabels vanuit de Eemshaven in Groningen naar Noorwegen en Denemarken lopen. Hoe dit precies werkt bespreek ik in een vervolgartikel.

En de conclusie?

In dit artikel heb ik het gehad over de praktische grenzen van stroom, en de reden dat wisselspanning en hoge voltages zo relevant zijn en dagelijks gebruikt worden. Uiteraard omvat alles wat ik hier kon schrijven slechts een fractie van alle feitjes en kneepjes die ons hoogspanningsnet mogelijk maken. Een vervolgartikel met meer informatie en verdere interessante voorbeelden is dan ook in de maak!

Foto voorpagina: Michael Coghlan.