

Naomi Nooteboom:

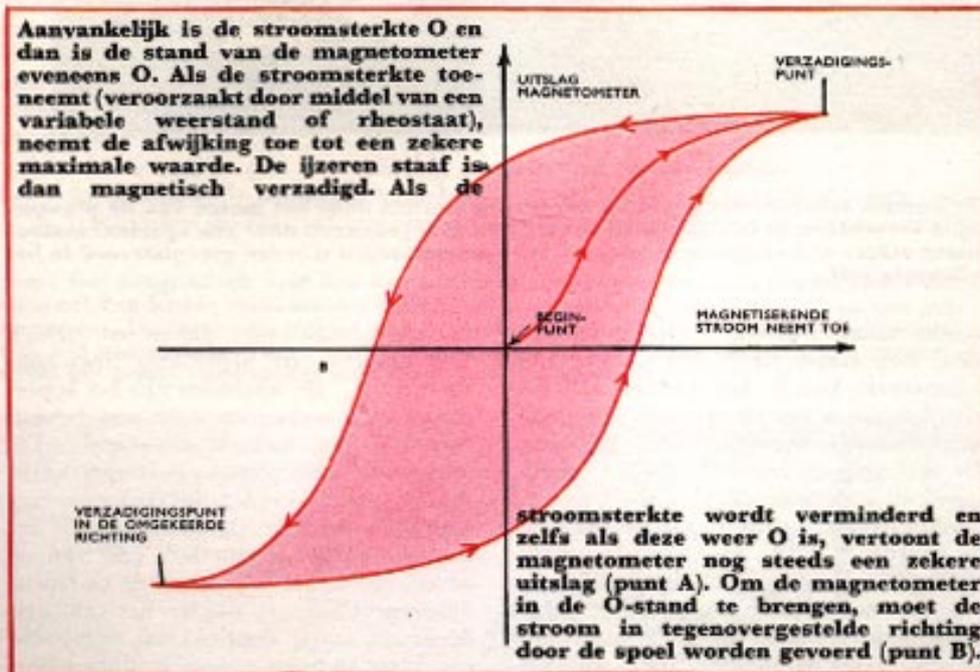
The Hysterese as presented below must be the principle that permits teleportation to Mars by the High Reality Machine.

HOOFDSTUK VEERTIEN

Hysterese

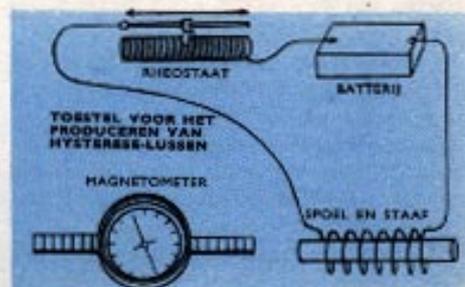
ALS EEN ELEKTRISCHE stroom door een aantal draadwindingen ofwel een spoel wordt geleid, werkt die spoel als een staafmagneet, met een noordpool aan het ene uiteinde en een zuidpool aan het andere uiteinde. Met andere woorden: de spoel wordt een *elektromagneet*. Indien een staaf weekijzer binnen de spoel wordt gebracht,

trische stroom geleid door een draadwinding. Een instrument, dat de sterkte van magnetische velden kan meten, een *deflexie-magnetometer* wordt aangebracht op enige afstand van de spoel, langs de as van de spoel. Als de sterkte van de stroom die door de spoel gaat wordt vergroot, slaat de wijzer van de magnetometer



neemt de sterkte van de elektromagneet toe. Dit komt omdat het stukje weekijzer dan tevens wordt omgezet in een magneet, onder invloed van de stroom in de spoel; de sterkte van deze magneet wordt dan toegevoegd aan die van de 'spoel'-magneet.

Dit kan worden aangetoond met enkele eenvoudige proeven. Er wordt een elek-



verder uit, waaruit blijkt dat het magnetische veld om de spoel heen sterker is geworden.

Als een staafje weekijzer in de spoel wordt geschoven, slaat de wijzer van de magnetometer nog véél verder uit. Hieruit blijkt, dat de gecombineerde magnetische velden van spoel en weekijzeren staaf véél groter zijn dan het magnetische veld van alleen de spoel.

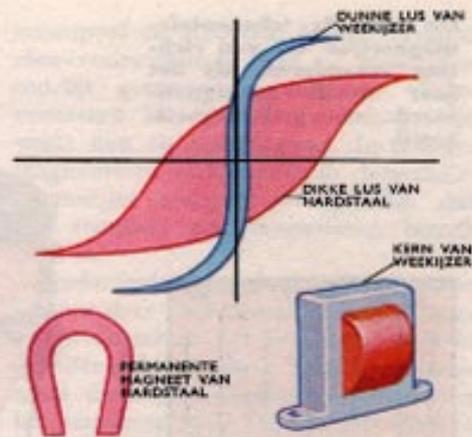
Elektromagneten, bestaande uit eenvoudige ijzeren staven met draadwindingen cromheen, worden veelvuldig toegepast in allerlei elektrische apparaten. Elektromagneten zijn zo goed bruikbaar, omdat ze zeer sterke magnetische velden kunnen produceren, die te regelen zijn door alleen maar de stroomtoevoer aan of uit te schakelen, te verhogen of te verlagen. In het algemeen geldt, dat hoe groter de stroomsterkte is, des te krachtiger ook de elektromagneet is.

Veel elektromagneten worden geproduceerd door middel van *wisselstroom*. De stroom neemt toe in de ene richting tot een maximum, daalt dan tot 0 en begint daarna toe te nemen in tegenovergestelde richting. Ook in die richting wordt een maximum bereikt, waarna de stroom weer terugvalt tot 0. Wisselstroom, zoals die wordt geleverd door het elektriciteitsnet, herhaalt deze heen-en-weer gaande beweging 50 (of 60) keer per seconde.

De stroom in de draadwinding gaat heen-en-weer, zodat de ijzeren staaf eerst wordt gemagnetiseerd in de ene richting en daarna in de andere richting. Elektromagneten zijn echter 'traag' wat betreft het veranderen van de richting waarin ze gemagnetiseerd worden. De richting verandert weliswaar, maar die verandering blijft achter bij de verandering in stroomrichting.

Er gaat energie verloren, als in een ijzeren staaf de richting waarin hij is gemagnetiseerd, moet veranderen. Dit energieverlies heet *hysterese*.

Verlies van energie is altijd belangrijk in de elektriciteit; het moet altijd zoveel mogelijk worden beperkt om de machine of het apparaat zo doelmatig mogelijk te laten werken. Daarom is ook hysterese zo belangrijk.



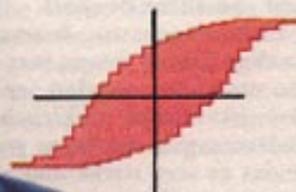
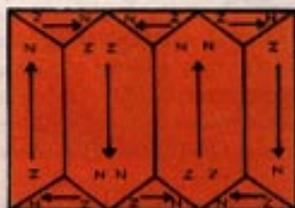
Staal heeft een 'dikke' hysterese-lus. Staal is moeilijk te demagnetiseren, wat de reden is dat staal wordt gebruikt voor het maken van permanente magneten. Materialen met een 'dunne' hysterese-lus, zoals weekijzer, worden gebruikt voor kernen van transformatoren.

Hysterese kan nader worden onderzocht door middel van een eenvoudig laboratorium-instrument: een gelijkstroombron, een deflexie-magnetometer en natuurlijk een spoel (van draadwindingen), gewonden om de ijzeren staaf die wordt onderzocht. De gelijkstroom wordt steeds iets verhoogd in één richting, dan verminderd tot 0 en daarna verhoogd in de andere richting. Dit lijkt op een volledige 'fase' van wisselstroom, maar de snelheid waarmee de stroom wordt verhoogd en verlaagd is zo gering, dat de gedragingen van de magneet kunnen worden onderzocht (met de magnetometer) in elk stadium. De resultaten hiervan worden weergegeven in een grafiek, waarin de toegevoerde stroom wordt 'afgezet' op de horizontale x-as en de afwijking van de magnetometer (waarmee de sterkte van de elektromagneet wordt aangegeven) langs de verticale y-as.

Bij deze proef blijkt, dat indien de stroomtoevoer toeneemt, de magnetometer meer uitslaat, maar slechts tot een

Dit zijn de 'elementairmagneetjes' die van richting veranderen, als het ijzer wordt gemagnetiseerd en gedemagnetiseerd.

Hystereselussen verlopen in werkelijkheid niet 'glad' aangezien het ijzer wordt gemagnetiseerd in kleine stappen, gevormd door de beweging van de elementairmagneetjes.



Het 'inluisteren' van de bewegingen van de elementairmagneetjes in een stukje ijzer. De kleine spoel die om de ijzeren staaf is gewonden, werkt als een soort antenne, die de elektromagnetische golven opvangt, die worden uitgezonden als een elementairmagneetje zich omkeert. Als de stroom, die de spoel magnetiseert van richting verandert, wordt een opeenvolging van klikken gehoord.

bepaalde waarde. Daarna blijft de magnetometer in dezelfde stand staan, onafhankelijk van het feit of er meer stroom wordt toegevoerd. De sterkte van de elektromagneet neemt toe tot een bepaald punt en dan noemt men de magneet *verzadigd*.

Als de stroom wordt verminderd, gaat de wijzer van de magnetometer 'terug'. De ijzeren staaf behoudt echter nog even zijn magnetisme en zelfs als de stroom wordt verminderd tot 0, geeft de wijzer van de magnetometer nog steeds een zekere mate van magnetisme aan. Er moet een aanzienlijke hoeveelheid stroom door de draadwinding worden gevoerd in *tegenovergestelde richting*, voordat de staaf zijn magnetisme verliest. Als daarna meer stroom wordt toegevoerd in tegenovergestelde richting, wordt de staaf gemagnetiseerd in tegenovergestelde richting. Als één zo'n 'cyclus' is voltooid, heeft de grafiek de vorm van een soort 'lus', een *hysteresis-lus* genoemd.

De 'dikte' van de lus is een maat voor de hoeveelheid energie die verloren gaat bij het veranderen van de richting waarin de staaf wordt gemagnetiseerd, dus het *hysteresis-verlies*. De hysteresis-lus van weekijzer is dun, omdat weekijzer gemakkelijk kan worden gemagnetiseerd, gedemagnetiseerd en weer gemagnetiseerd in tegenovergestelde richting. De hysteresis-lus van staal daarentegen is dik, omdat staal veel meer weerstand biedt dan weekijzer bij de verandering van de richting waarin het wordt gemagnetiseerd.

Waarom bestaat er een maximale verzadigingswaarde voor het magnetisme van de magneet en wat gebeurt er binnenin de magneet en wat is de oorzaak van hysteresis? De algemeen aanvaarde theorie is, dat de ijzeren staaf is opgebouwd uit duizenden kleine 'elementairmagneetjes'. Als de staaf niet is gemagnetiseerd, wijzen deze elementairmagneetjes in allerlei richtingen, zodanig dat ze elkaars invloed opheffen. De afzonderlijke ijzermolekulen vormen niet de elementairmagneetjes, maar groepen van wellicht duizenden molekulen. Elke ijzermolekule treedt op als een magneet, met zijn eigen

noordpool en zuidpool. In een bepaald elementairmagneetje zijn de molekulen ordelijk gerangschikt, zodat ze elkaar versterken. Het hele elementairmagneetje werkt dan als een magneet. In niet-gemagnetiseerd weekijzer zijn de elementairmagneetjes zodanig gerangschikt, dat het resultaat wat magnetisme betreft nihil is.

Onder invloed van de elektrische stroom worden deze elementairmagneetjes zodanig gerangschikt, dat ze alle ongeveer in dezelfde richting wijzen. Dan is het maximaal mogelijke magnetisme bereikt en het toevoeren van een sterkere stroom heeft dan geen invloed meer. De ijzeren staaf is dan magnetisch *verzadigd*.

Als door een niet-gemagnetiseerde staaf weekijzer een steeds sterkere stroom wordt gevoerd, wordt het ene elementairmagneetje na het andere gericht. Men heeft ontdekt dat het magnetiseren geleidelijk toeneemt (zoals blijkt uit de hysteresis-lus), waarbij de kleine 'stapjes' ontstaan, als elk elementairmagneetje met een 'zwaai' gericht wordt. Als de stroomrichting plotseling tegenovergesteld verloopt, vindt in het magnetische veld een zodanige verandering plaats, dat een elektromagnetische golf (een soort radiogolf) ontstaat. Deze golf kan worden opgevangen door een antenne, worden versterkt en worden omgezet in hoorbaar geluid. Bij proeven met 'inluisteren' heeft men dit werkelijk kunnen horen. Het omzwaaien van elk elementairmagneetje kan worden gehoord als een zacht klik. Dit noemt men het Barkhausen-effekt.

De elementairmagneetjes zijn niet volledig vrij om van richting te veranderen. Hysteresis is een maat voor de hoeveelheid magnetische 'wrijving' die ze moeten overwinnen. Hoewel de meeste elektrische energie die wordt toegevoerd wordt *opgeslagen* in de vorm van magnetische energie in de ijzeren staaf en dus beschikbaar is voor gebruik, kan de hysteresis-energie niet meer worden gebruikt. Net als bij de meeste soorten energieverlies door wrijving, wordt ook deze energie omgezet in warmte-energie.