

Optisch Stroom Meten

Drs. H.S. Lassing

FOM-Instituut voor Plasmafysica "Rijnhuizen", Nieuwegein

1. Samenvatting

Het meten van grote elektrische stroomsterkten, bij hoge spanningen en variërend op verschillende tijdschalen, is niet eenvoudig. Aan verschillende bezwaren van de gangbare meetmethode kan worden ontkomen door gebruik te maken van de rotatie van het polarisatievlak van licht in een monomode glasvezel onder invloed van een magnetisch veld (Faraday-effect). Het principe van deze meetmethode zal hier besproken worden. Verder zal een proefopstelling waarmee stroomsterkten tot 1MA en met een frequentie van 25kHz betrouwbaar gemeten kunnen worden, beschreven worden alsmede het resultaat van een van de metingen. Een uitbreiding met als doel de gegevens automatisch te kunnen verwerken wordt ook besproken. Een uitvoeriger beschrijving van al deze punten is te vinden in een rapport (1).

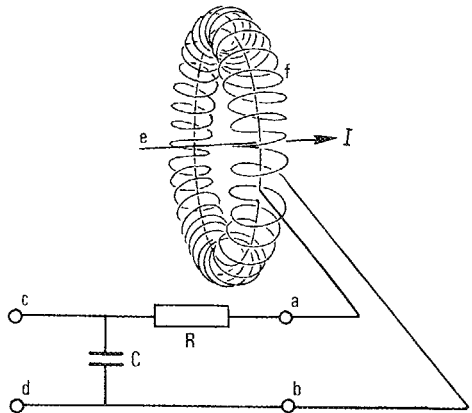
2. Inleiding

Bij de gebruikelijke methode om een wisselende of gepulste stroom te meten, maakt men gebruik van een Rogowski spoel en een integrator (zie Fig 1).

De lange en dunne spoel (f) ligt in een lus om de stroomvoerende geleider (e) en omvat aldus een zekere magnetische flux Φ behorende bij de stroom I. Wanneer deze stroom in de tijd verandert, ontstaat er over de Rogowski spoel een e.m.k. (V_{ab}) die evenredig is met dI/dt . Na integratie vinden we dat de uitgangsspanning (V_{cd}) evenredig is met I. Bij het FOM-instituut voor Plasmafysica "Rijnhuizen" wordt een schroefpinch experiment, "SPICA II" genaamd, uitgevoerd. Bij dit experiment wordt o.a. een grote gepulste stroom ge-

meten, met de hierboven beschreven methode. Hierbij doen er zich een aantal problemen voor:

- De Rogowski spoel moet zeer goed geïsoleerd worden t.o.v. metalen delen die, gedurende een meting, op hoogspanning staan (45 kV). Voor deze isolatie is echter weinig ruimte beschikbaar.
- De te meten stroom wordt geschakeld met vonkbruggen. Deze veroorzaken een zeer heftige elektromagnetische storing.
- Tijdens de meting wordt gedurende lange tijd (d.w.z. 100x de stijgtijd) de stroom constant gehouden. Dit stelt hoge eisen aan de integrator m.b.t. de stabiliteit.



Figuur 1.
Rogowski-spoel met integratie-netwerk.

Er is besloten een magneto-optische stroommeter te ontwikkelen, omdat bij dit systeem de beschreven problemen geheel ontbreken. Een artikel van A.M. Smith (2), die een opstelling beschrijft waarmee het mogelijk is, op een optische manier, stroom te meten, is daarbij als uitgangspunt genomen.

3. Principe van de meetmethode

Onder invloed van een magnetisch veld wordt in een transparant medium het polarisatievlak van lineair gepolariseerd licht gedraaid. Dit wordt het Faraday-effect genoemd. De hoek Θ , waarover het polarisatievlak draait, is evenredig met de component van het magnetisch veld, in de voortplantingsrichting van het veld en de lengte van de weg die het licht aflegt:

$$\Theta = V \int \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

De Verdetconstante V hangt af van: $1e$ het medium en $2e$ de golflengte van het licht (Θ is evenredig met λ^{-2}).

Met een opstelling voor gelijkstroom is de Verdetconstante van de door ons gebruikte glasvezel van kwarts gemeten. Het resultaat was $V = 4.60 \times 10^{-6}$ rad/A bij $\lambda = 633$ nm (He Ne laser). Hieraan zien we al, dat de methode met name geschikt is voor grote stroomsterkten

Wanneer we nu de glasvezel in een lus om de te meten stroom I heen leggen, dan geldt voor de verdraaiing van het polarisatievlak in de lus:

$$\Theta = V \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = V \iint j_n dA = V \cdot I$$

(gebruikmakend van de wet van Ampère; j_n = component van de stroomdichtheid, loodrecht op het vlak van de lus, A = oppervlakte).

Door de verdraaiing Θ te meten, weten we ook meteen de stroom I . Hoe kunnen we nu deze verdraaiing meten? In feite wordt de hoek gemeten die het polarisatievlak maakt met de richting waarin het polarisatievlak staat wanneer de stroom nul is. Voor het meten van deze polarisatiehoek

wordt gebruik gemaakt van een Wollaston prisma. Hierin wordt de invallende lichtbundel gesplitst in twee bundels, onder een kleine hoek, die elk lineair gepolariseerd zijn, maar in een onderling loodrechte richting. Van beide bundels wordt met behulp van 2 PIN fotodiodes de intensiteit gemeten I_1 en I_2 . Analoge elektronica berekend volgens het genormeerde verschil: $T = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$. Dat we met deze grootte T de polarisatiehoek meten, kan als volgt worden ingezien:

Stel het Wollaston prisma wordt zó gedraaid dat bij stroom nul al het licht op één fotodiode valt. (De intensiteit van het licht wat op de andere fotodiode valt is dan nul en $|T| = 1$). Vervolgens is bij stroom I het polarisatievlak over een hoek Θ gedraaid. Het signaal wat de fotodiodes afgeven (I_1 en I_2) is recht evenredig met de intensiteit van het opvallende licht en deze is op zijn beurt weer evenredig met het kwadraat van de amplitude van het elektrische veld (E_1 en E_2). Aangezien $E_1 = E_0 \cos \theta$ en $E_2 = E_0 \sin \theta$ geldt:

$I_1 = C_1 (E_0 \cos \Theta)^2$ en $I_2 = C_2 (E_0 \sin \Theta)^2$, met C_1, C_2 = evenredigheidsconstante. Wanneer de fotodiodes gelijkwaardig en de elektronica in balans is, dan geldt $C_1 = C_2$.

We vinden dan voor $T = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \cos 2\Theta$.

Wanneer het Wollaston prisma over 45° wordt gedraaid (in dat geval geldt $T = 0$ bij $I = 0$) dan wordt dit $T = \sin 2\Theta$. (1)

Deze methode om de polarisatiehoek te meten wordt gebruikt omdat het signaal T onafhankelijk is van de intensiteit van het licht waar de polarisatiehoek van bepaald moet worden. Dit is belangrijk. De intensiteit van de laser is meestal wel redelijk constant (zeker tijdens gepulste metingen), maar het inkoppelen van het licht in de monomode fiber is zéér gevoelig voor trillingen van de optika en kan voor grote intensiteit variaties zorgen.

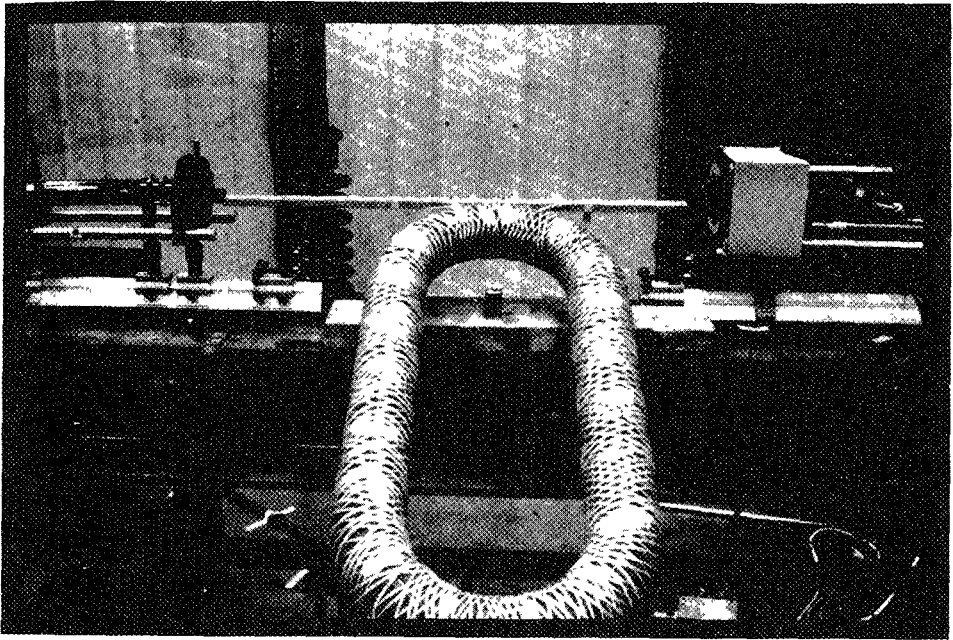
4. De optische eigenschappen van de glasvezel

De afleiding van vergelijking (1) gaat alleen op, wanneer het licht, wat uit de glasvezel treedt, lineair gepolariseerd is. Dit kan als volgt gezien worden. Wanneer er lineaire dubbelbreking is, dan zullen 2 onderling loodrecht gepolariseerde golven (x- en y-golven) in de glasvezel een iets verschillende voortplantingssnelheid hebben, en zodoende met een faseverschil aan het einde van de glasvezel aankomen. Het licht wat uit de glasvezel komt is dan enigszins elliptisch gepolariseerd (x- en y-golf weer samengesteld). Wanneer de assen van het Wollaston prisma in dezelfde richting georiënteerd staan als de assen van lineaire dubbelbreking van de glasvezel, dan wordt in het signaal T de lineaire dubbelbreking niet opgemerkt (omdat het enkel om een tijdsverschil in aankomst van

de golven gaat, de amplitude blijft daarbij ongewijzigd). Wanneer het Wollaston prisma echter 45° gedraaid wordt, dan zien beide fotodiodes een combinatie van x en y golf

$$(E_x = \frac{E_x + E_y}{\sqrt{2}} \text{ en } E_y = \frac{E_x - E_y}{\sqrt{2}} \text{ met } E = \text{ampl.})$$

In die situatie kan het signaal T ons geen uitsluitel geven of we nu te maken hebben met lineair gepolariseerd licht dat een zekere hoek maakt met de assen van het Wollaston prisma of met elliptisch gepolariseerd licht dat juist langs die assen georiënteerd is. Wanneer gepulste metingen gedaan worden, dan wordt vóór de meting het Wollaston prisma in de juiste stand gedraaid, terwijl het tijdens de meting in de



Figuur 2.

Foto van de proefopstelling, met van links naar rechts: de laser, de stroomspoel en de detector. De fiber wordt tussen laser en spoel en tussen spoel en detector, ondersteund door een houten balkje

stand blijft. Wanneer de glasvezel lineaire dubbelbreking heeft, dan meten we met het signaal T een onbekende combinatie van lineaire en circulaire (n.l. het Faraday-effect) dubbelbreking.

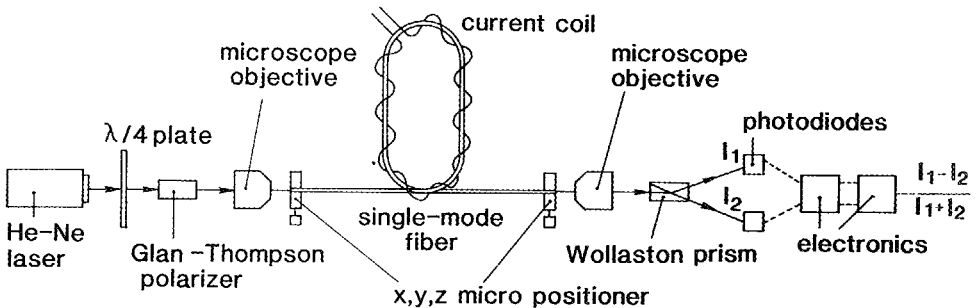
We moeten daarom gebruik maken van een glasvezel die de polarisatie-toestand onveranderd laat. De zogenaamde "polarisatie behoudende" glasvezels, zijn niet geschikt. Weliswaar wordt de polarisatie richting behouden, maar alleen in een bepaalde richting; het polarisatievlak kan in de glasvezel niet (of moeilijk) draaien. De glasvezel die wij gebruiken is een monomode "spun" glasvezel. Bij dit type glasvezel wordt de vorm waaruit de glasvezel getrokken wordt, tijdens het fabricageproces langzaam gedraaid, waardoor er in de glasvezel een "twist" wordt ingevroren. De glasvezel heeft daardoor bijzonder isotrope eigenschappen. De lineaire dubbelbreking bedraagt in onbelaste toestand slechts enkele graden. Druk op, en buiging van, de glasvezel geven al gauw een fors lineaire dubbelbreking. Metingen van de lineaire dubbelbreking van de glasvezel in verschillende omstandigheden wijzen uit dat bij buiging de kromtestraal minstens 10 cm moet bedragen, en dat druk zorgvuldig moet worden vermeden ten einde de lineaire dubbelbreking laag te houden. Wanneer

aan deze voorwaarden voldaan wordt blijkt de glasvezel goed geschikt te zijn om optisch stroom te meten.

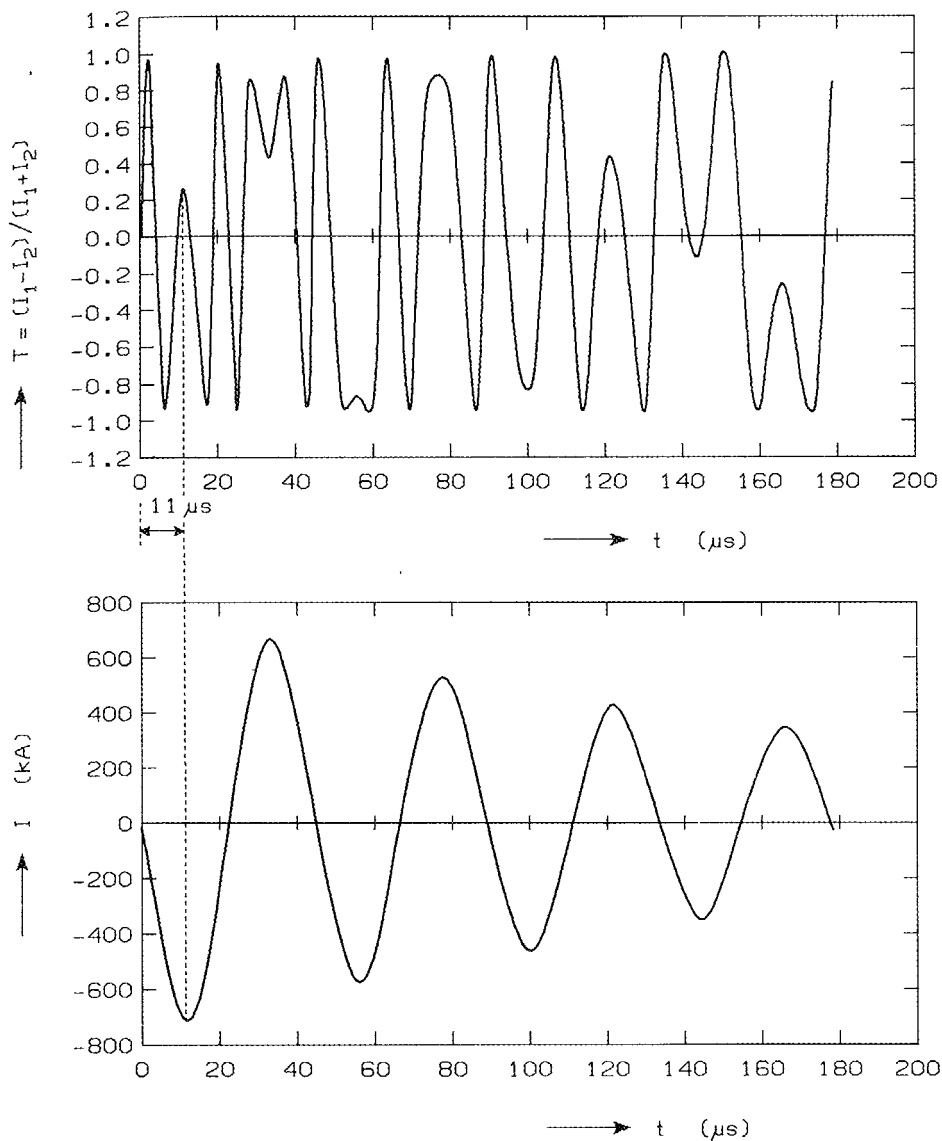
5. De proefopstelling

a. De spoel

In het experiment SPICA II bedraagt de te meten stroom maximaal 700 kA. Deze stroom is niet eenvoudig te produceren in een proefopstelling, maar we kunnen gelukkig volstaan met een spoel te nemen en ervoor te zorgen dat de glasvezel $n \cdot I = 700$ kA-wikkelingen omvat. De gebruikte spoel bestond uit 18 parallelle draden die elk 19 windingen bevatten ($L = 1.6 \mu\text{H}$) en werd aangesloten op een condensator ($C = 30 \mu\text{F}$), die tot 15 kV opgeladen kon worden. Om de stroom in te schakelen werd gebruik gemaakt van een vonkbrug. Op deze wijze kon een oscillerende stroom geproduceerd worden met een frequentie van 22.5 kHz en een maximum van 62 kA. Omdat de 19 wikkelingen van de spoel door de lus van de glasvezel prikken, wordt optisch een stroom gemeten van maximaal $19 \times 62 = 1.2$ MA. Om de optisch gemeten stroom te kunnen vergelijken is in het stroomcircuit ook een Rogowski spoel opgenomen. Een foto van de gehele proefopstelling is te zien in figuur 2. Het experiment is uitgevoerd bij de vakgroep Hoogspanningstech-



Figuur 3.
De magneto-optische stroommeter



Figuur 4

Het signaal T van de magneto-optische stroommeter en de stroom I gemeten met de Rogowski-spoel, gelijktijdig geregistreerd in één "schot".

niek van de afdeling electrotechniek van de Technische Hogeschool Eindhoven.

b. De Magneto optische stroommeter

Deze is als volgt opgebouwd (zie figuur 3):

*de lichtbron, bestaande uit:

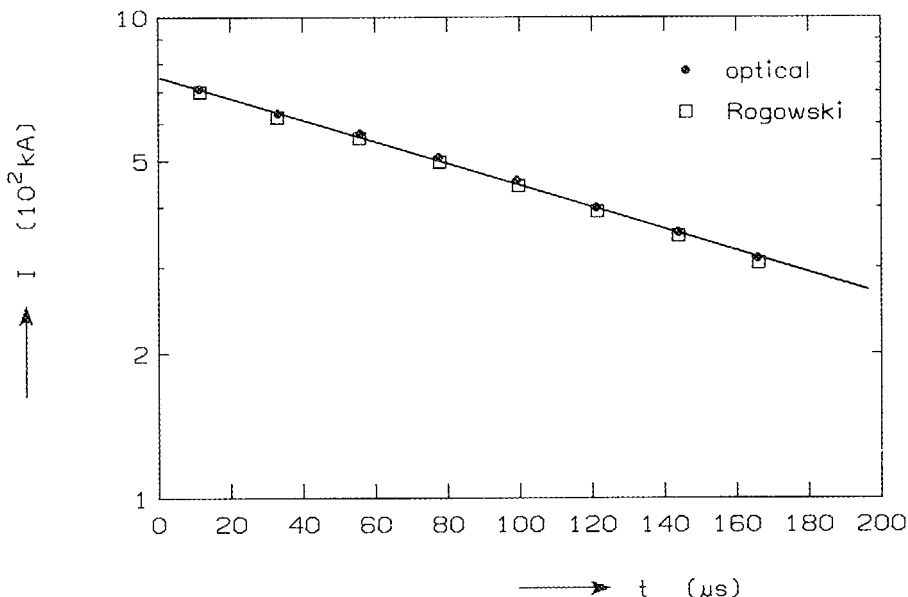
- een 5 mW He Ne laser, die linear gepolariseerd licht geeft,
- een $\lambda/4$ plaatje, zodanig ingesteld dat het linear gepolariseerde licht uit de laser omgezet wordt in circulair gepolariseerd licht
- een polarisator. Met behulp hiervan kan het polarisatievlak in elke willekeurige richting ingesteld worden, terwijl de intensiteit constant blijft.
- Een 10x microscoop-objectief, om het licht in de glasvezel te koppelen.
- Een x,y,z-instelling om het eindvlak van de glasvezel in het brandpunt van het objectief te zetten.

*De monomode glasvezel, die in een lus om de te meten stroom ligt. De stroomdraden zijn om een mal gewikkeld, in het centrum van de windingen loopt de glasvezel. De glasvezel ligt in dezelfde vorm (renbaan) als de glasvezel die nu in SPICA II gebruikt wordt.

*De detector, bestaande uit

- x,y,z-instelling.
- een 10x microscoop objectief, waarmee het glasvezel eindvlak op de fotodiodes wordt afgebeeld.
- een Wollaston prisma.
- twee fotodiodes, die de intensiteiten meten I_1 en I_2 van de twee bundels die van het Wollaston prisma komen.
- Analoge elektronica, die van deze twee intensiteiten het genormeerde verschil

$$\text{berekent: } \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = T$$



Figuur 5

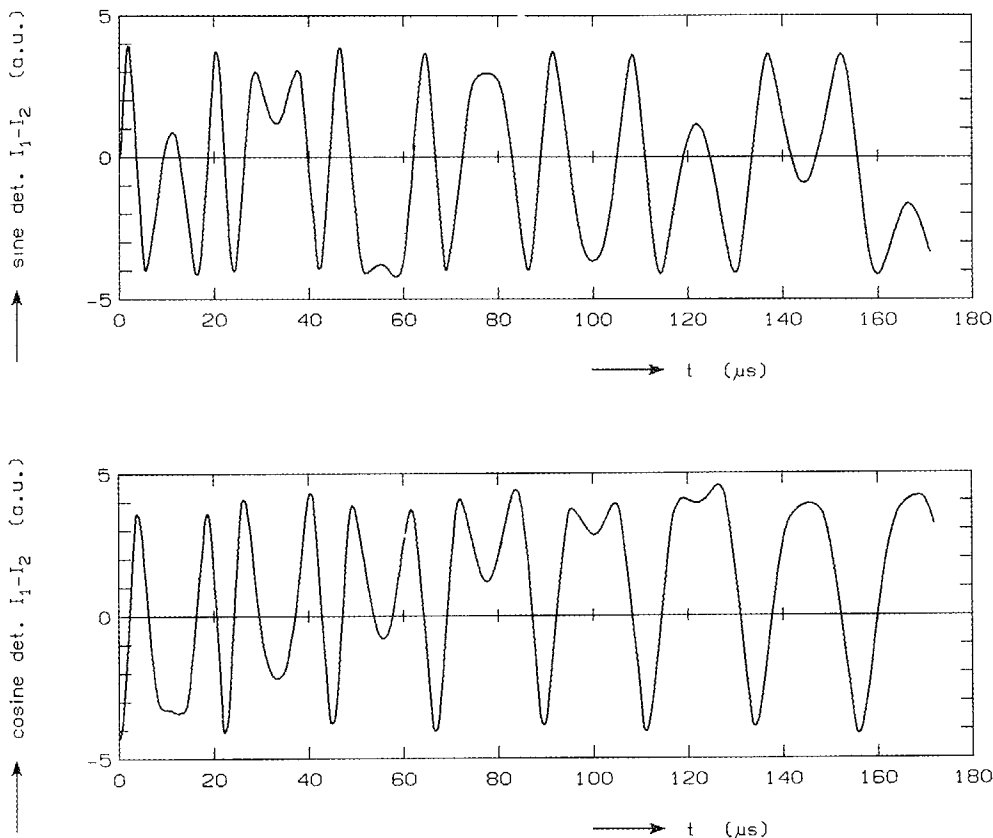
De toppen (maxima- en minima) van de stroom, zowel optisch als elektrisch gemeten, logarithmisch uitgezet tegen de tijd. De getrokken lijn stelt de theoretisch verwachte exponentiele afname voor.

— een oscilloscoop of transient recorder om de meting te registreren.

6. Resultaten

Tijdens een van de metingen was het maximum van de stroom tijdens de eerste halve periode gelijk aan 700 kA (= nI). In de glasvezel wordt dan het polarisatievlak gedraaid over een hoek van $\Theta = V.I \approx 190^\circ$. Wanneer de stroom stijgt van nul tot maximum, heeft het signaal $T = \sin 2\Theta$ dus al meer dan een hele periode van een sinus doorlopen. Daarna daalt de stroom weer

naar nul, en het signaal T doorloopt weer een hele periode van een sinus in omgekeerde richting. We zien dus dat T een signaal is, wat een veel hogere frequentie heeft (n.I. ongeveer 200 kHz) dan de stroom (22,5 kHz). Hiermee moet bij het ontwerpen van de analoge elektronica, die het genormeerde verschil berekent, rekening gehouden worden. Het resultaat van de meting is weergegeven in figuur 4. Wanneer we op de toppen de stroom berekenen uit het signaal T en deze in een logaritmische grafiek tekenen, dan vinden we



Figuur 6. $\sin 2\Theta$ (boven) en $\cos 2\Theta$ (beneden), gelijktijdig gemeten in een opstelling met 2 detectoren. $I_{\max} = 710$ kA

een goede overeenstemming met de stroom gemeten met de Rogowski-spoel en de theoretisch verwachte exponentiële afname van de stroom in een LC-keten (zie figuur 5).

7. Uitbreiding

Voor het gemeten signaal T geldt: $T = \sin 2\Theta = 2V.I$. Hieruit volgt dat uit T niet eenduidig de stroom I is te berekenen. Bovendien is de stroom slechts met beperkte nauwkeurigheid te bepalen indien $\Theta = (45^\circ + n.90^\circ)$. Deze beide problemen kunnen opgelost worden wanneer de opstelling uitgebreid wordt met een tweede detector. Het licht wat uit de glasvezel treedt moet dan met een beamsplitter gesplitst worden. De tweede detector (Wollaston prisma + 2 fotodiodes + elektronica) wordt 45° gedraaid ten opzichte van de eerste.

Voor deze tweede detector geldt dan $T^* = \cos 2\Theta$. Het resultaat van een meting met 2 detectoren is weergegeven in figuur 6. De meting is minder nauwkeurig, omdat gebruik gemaakt werd van een polarisatie afhankelijke beamsplitter (een prisma). In de nieuwe magneto-optische stroommeter wordt gebruik gemaakt van een halfdoorlatende spiegel onder een kleine hoek (6°). Deze beamsplitter is wél voldoende onafhankelijk van de polarisatietoestand en de resultaten ermee zijn goed. De signalen van beide detectoren kunnen in een geheugen worden opgeslagen. Door telkens de stroom te berekenen, uitgaande van dat signaal wat in absolute zin het kleinst is, wordt over het hele stroomgebied een even

grote nauwkeurigheid verkregen. Ook staat nu steeds ondubbelzinnig vast of de stroom stijgt of daalt. Hiervoor is het wel nodig dat bijgehouden wordt hoeveel het polarisatievlak is gedraaid, sinds de start van de meting ($I = 0$).

Met een opstelling met twee detectoren kan dus gemakkelijk met behulp van een computer-programma de stroom I berekend worden. Op het Instituut voor Plasmafysica "Rijnhuizen" is momenteel een versie van de stroommeter met twee detectoren gebouwd en getest.

8. Conclusie

Het meten van een elektrische stroom op magneto-optische wijze heeft wat voeten in de aarde. Maar wanneer in een hoogspanningsomgeving gewerkt wordt, en/of wanneer de stroom verandert op sterk wisselende tijdschalen (DC -20 kHz), dan biedt de magneto-optische methode zeker voordelen. Wanneer ervoor gezorgd wordt dat de glasvezel weinig lineaire dubbelbreking heeft, dan is de methode voldoende nauwkeurig ($\pm 1\%$ of beter).

Referenties

- [1] H.S. Lassing; The Development of a Magneto-optic Current Measurement System for High, Pulsed Currents, Rijnhuizen Report 85-161(1985).
- [2] A.M. Smith; Optical fibers for Current measurements applications Optics and Lasertechnology, february 1980, p 25-29.