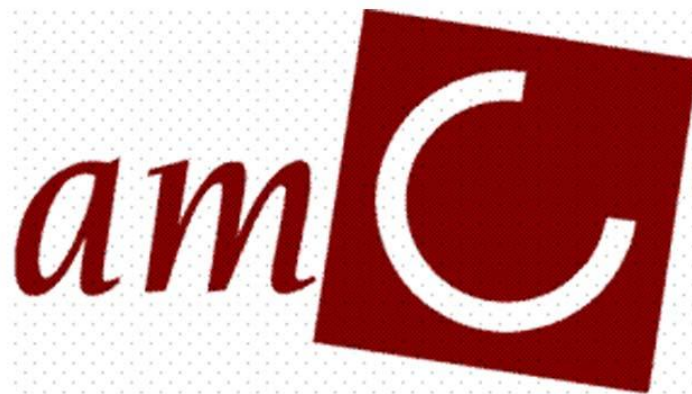


# Kwaliteitsonderzoek voor thermometrie bij hyperthermie

Stabiliteit en RF gevoeligheid van de multi sensor  
thermokoppel probes en het meetsysteem



Student : Erik Schwing  
Studentnummer : 10094032  
Shift : 3  
Studiejaar : 2013/2014  
Opleiding : Technische Natuurkunde  
School : De Haagse Hoge School – TIS Delft  
Datum : 12-02-2014

## Onderzoek naar thermometrie bij hyperthermie

stabiliteit en RF gevoeligheid van de Multi sensor thermokoppel  
probes en meetsysteem

**Bedrijf:**

Academisch Medisch Centrum  
Radiotherapie/Hyperthermie  
Meibergdreef 9  
1105 AZ Amsterdam

**Bedrijfsbegeleider**

Gerard van Stam  
Elektrotechnicus afdeling Hyperthermie

Hans Creeze  
Hoofdfysicus Radiotherapie

**Afstudeercoach**

J.L. van Yperen  
J.H.R. Lambers

**Auteur**

Erik Schwing  
10094032

**Datum publicatie**

## Voorwoord

Deze scriptie is geschreven naar aanleiding van het afstuderen van de student Erik Schwing voor de opleiding Technische Natuurkunde.

Ik wil graag de groep Hyperthermie van het AMC bedanken voor de geboden afstudeerstage. Ik wil Gerard van Stam en Hans Crezee bedanken als mijn begeleiders vanuit het bedrijf en alle andere collega's die mij geholpen hebben tijdens dit onderzoek. Ik wil Dhr. van Yperen bedanken als mijn afstudeercoach en alle andere docenten van de afgelopen vier jaar op de Haagse Hogeschool.

## Samenvatting

In dit onderzoek is gekeken naar de storingverschijnselen van elektromagnetische straling op thermokoppelprobes. Deze thermokoppels worden gebruikt om de temperatuur te meten tijdens een hyperthermie behandeling.

Bij hyperthermie wordt een patiënt verwarmd met elektromagnetische straling tot ongeveer 42°C. Hierbij kan o.a. denaturatie van eiwitten en proteïnen optreden. Omdat een tumor minder goed doorbloed is dan gezond weefsel zal het effect hier vele malen groter zijn. De hyperthermie behandeling wordt vervolgens altijd gecombineerd met radio- of chemotherapie omdat de werking hiervan wordt versterkt.

De gebruikte elektromagnetische straling heeft een frequentie van 434 MHz voor oppervlakkige behandelingen en 70 MHz voor dieper gelegen toepassingen. Bij 434 MHz wordt gebruikt gemaakt van een contact-flexible microstrip antenne (CFMA) en bij 70 MHz twee of vier golfpijp antennes. Voor een behandeling wordt het systeem afgestemd om zo min mogelijk reflecties te hebben omdat de generator hierdoor overbelast raakt.

De thermokoppelprobes die worden gebruikt zijn van Koper Constantaan en hebben een bereik van -270 °C en 400 °C en de gevoeligheid is ca. 43  $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ . Voor de referentie is een fiber optische sensor aanwezig die op het principe van fluorescentie werkt. Deze heeft een bereik van 35°C tot 45°C met +/- 0,2°C precisie. Het fiber optische systeem vertoont een vertraging van 1 á 2 seconden t.o.v. de thermokoppel.

In het vooronderzoek is gekeken naar de invloed van de EMI (Electro Magnetische Instraling) op de thermokoppels en naar de invloed van het gebruik van katheters. Uit het vooronderzoek blijkt dat meten in de richting evenwijdig aan het E-veld meer storing levert t.o.v. loodrecht op het E-veld, waar de storing bijna verwaarloosbaar is. Voor de invloed van katheters is o.a. gekeken naar of deze een verschil geven in de temperatuur binnen en buiten de katheter, en of ze gevuld moeten worden met een vulstof. Er is gebleken dat de katheters geen invloed hebben op de metingen als ze niet gevuld zijn voor fibers.

Er is na het vooronderzoek een fantoom ontworpen. Dit fantoom is bedoeld om een patiënt na te bootsen voor de elektromagnetische straling. In het fantoom worden een aantal katheters aangebracht om op verschillende plekken en richtingen te kunnen meten. Voor alle metingen van het onderzoek wordt het fantoom gebruikt.

In het onderzoek is allereerst de beïnvloeding in kaart gebracht bij een thermokoppel in de richting evenwijdig aan het E-veld en loodrecht op het E-veld. Evenwijdig aan het E-veld kan bij 400Watt de storing op lopen tot een fout van 16°C, en loodrecht op het E-veld kan deze oplopen tot 5,5°C. Daarnaast is er ook een RF geïnduceerde verwarming waargenomen evenwijdig aan het E-veld, deze bedraagt bij 400 Watt ca 0,5°C.

De volgende meting kijkt naar hoeveel de storing onderdrukt wordt door ferriet kralen. De ferriet kralen zorgen voor een vermindering in de storing met een factor vijf. Er is ook gekeken naar hoeveel ferriet kralen er gebruik moeten worden. Veertien ferriet kralen levert het gunstigste resultaat.

Vervolgens is er een meting een vijftal keer exact herhaald om de lineaire regressie fout te laten bepalen door Excel. Bij 200Watt, evenwijdig aan het E-veld, is drie maal de standaardafwijking +/-0,067°C en bij 600 Watt +/- 0,158°C.

Ook is er gekeken naar de fout die optreedt door de RF geïnduceerde verwarming. Bij een behandeling wordt het vermogen gepulseerd 25 seconden aan en 5 seconden uit. Er wordt dan bij 3 seconden vermogen uit een temperatuursmeting gedaan. Bij deze meting is gekeken naar de afkoeling van de RF geïnduceerde verwarming. Er wordt steeds gekeken naar de meet waarde 3 seconden na dat het vermogen uit is. Deze waarde is vergeleken met de referentie. Bij 600 Watt komt hier een fout van  $+0,37^{\circ}\text{C}$  uit. Als er ferriet kralen worden toegevoegd komt de fout tot  $+0,26^{\circ}\text{C}$ . Bij 600 Watt loodrecht op het E-veld zonder ferriet kralen is de fout  $+0,14^{\circ}\text{C}$ .

Het systeem voldoet aan de gestelde eisen, mits er rekening wordt gehouden met de oriëntatie t.o.v. het veld. Helaas is het zo dat het fantoom niet de werkelijkheid perfect weerspiegelt, de resultaten zijn daarom geen directe weergave van de realiteit. De metingen moeten nog maal worden gedaan in de kliniek om zekerheid te geven.

## Inhoudsopgave

|        |                                                       |    |
|--------|-------------------------------------------------------|----|
| 1.     | Inleiding.....                                        | 8  |
| 2.     | Hyperthermische oncologie.....                        | 9  |
| 2.1.   | Werking & uitvoering hyperthermie behandelingen ..... | 9  |
| 2.1.1. | Biologische werking .....                             | 9  |
| 2.1.2. | Oppervlakkige hyperthermie.....                       | 9  |
| 2.1.3. | Diepe hyperthermie.....                               | 9  |
| 2.2.   | Radiogolven.....                                      | 10 |
| 2.3.   | Diëlektrische verwarming .....                        | 11 |
| 2.4.   | Specific absorption rate.....                         | 12 |
| 2.5.   | Impedantie.....                                       | 13 |
| 2.6.   | Transmissielijnen .....                               | 14 |
| 2.7.   | Antennes.....                                         | 16 |
| 2.8.   | Versterking.....                                      | 16 |
| 2.9.   | Richtingkarakteristiek .....                          | 17 |
| 2.10.  | Antenne-impedantie .....                              | 17 |
| 2.11.  | Impedance matching .....                              | 18 |
| 2.12.  | Tuner.....                                            | 19 |
| 3.     | Thermometrie .....                                    | 20 |
| 3.1.   | Thermokoppelthermometrie.....                         | 20 |
| 3.2.   | Werking van een thermokoppel.....                     | 20 |
| 3.2.1. | Stoorstromen .....                                    | 21 |
| 3.3.   | Fiber optische thermometrie .....                     | 22 |

|        |                                                |    |
|--------|------------------------------------------------|----|
| 4.     | Vooronderzoek .....                            | 23 |
| 4.1.   | Invloed van de oriëntatie.....                 | 23 |
| 4.1.1. | Metingen.....                                  | 23 |
| 4.1.2. | Resultaten.....                                | 23 |
| 4.1.3. | Conclusie .....                                | 24 |
| 4.2.   | Turbulente stroming .....                      | 24 |
| 4.2.1. | Metingen.....                                  | 24 |
| 4.2.2. | Resultaten.....                                | 25 |
| 4.2.3. | Conclusie .....                                | 26 |
| 4.3.   | Invloed van ferriet kralen .....               | 26 |
| 4.3.1. | Metingen.....                                  | 26 |
| 4.3.2. | Resultaten.....                                | 26 |
| 4.3.3. | Conclusie .....                                | 27 |
| 4.4.   | Invloed van het gebruik van katheters .....    | 27 |
| 4.4.1. | Metingen.....                                  | 28 |
| 4.4.2. | Resultaten.....                                | 28 |
| 4.4.3. | Conclusie .....                                | 28 |
| 4.5.   | Vergelijking tussen TCM en Fiber Optisch ..... | 29 |
| 4.5.1. | Metingen.....                                  | 29 |
| 4.5.2. | Resultaten.....                                | 29 |
| 4.5.3. | Conclusie .....                                | 30 |
| 5.     | Fantom.....                                    | 31 |
| 5.1.   | Ontwerpeisen .....                             | 31 |
| 5.2.   | Oplossingen.....                               | 31 |
| 5.3.   | Uiteindelijke ontwerp .....                    | 32 |

|        |                                                     |    |
|--------|-----------------------------------------------------|----|
| 6.     | Meetplannen .....                                   | 33 |
| 6.1.   | Artefact meting .....                               | 33 |
| 6.1.1. | Meetplan .....                                      | 33 |
| 6.2.   | Invloed van ferriet kralen .....                    | 33 |
| 6.2.1. | Meetplan .....                                      | 33 |
| 6.3.   | Meting van precisie.....                            | 34 |
| 6.4.   | Decay meting bij 600 watt.....                      | 35 |
| 6.5.   | 434MHz meting .....                                 | 35 |
| 7.     | Resultaten .....                                    | 36 |
| 7.1.   | Resultaten artefact metingen .....                  | 36 |
| 7.1.1. | Conclusie: Artefact meting .....                    | 37 |
| 7.2.   | Resultaten voor de invloed van ferriet kralen. .... | 38 |
| 7.2.1. | Conclusie: Invloed van Ferriet kralen. ....         | 40 |
| 7.3.   | Resultaten meting van precisie .....                | 40 |
| 7.3.1. | 600 Watt.....                                       | 41 |
| 7.3.2. | Conclusie: Meting van precisie .....                | 42 |
| 7.4.   | Resultaten decay meting .....                       | 42 |
| 7.4.1. | Phase sweep.....                                    | 45 |
| 7.4.2. | Conclusie .....                                     | 46 |
| 8.     | Conclusie en aanbevelingen .....                    | 47 |
| 9.     | Bibliografie .....                                  | 48 |
| 10.    | Bijlage A .....                                     | 50 |
| 11.    | Bijlage B .....                                     | 60 |

## 1. Inleiding

Bij hyperthermie oncologie van het AMC worden tumoren van patiënt verhit door gebruik te maken van elektromagnetische straling van 70MHz en 434MHz. Om de temperatuur van de tumoren te meten worden thermokoppelprobes gebruikt. Thermokoppels zijn gevoelig voor EMI en dat kan de kwaliteit van de behandeling beïnvloeden. De hoofdvraag van dit onderzoek is: Voldoen de thermokoppel probes aan de Europese richtlijnen voor hyperthermie?

De thermokoppels behoren te voldoen aan een nauwkeurigheid en stabiliteit van +/- 0,2°C. Het doel van het onderzoek is om te controleren aan de hand van een fiber optische referentie of dit zo is. Het fiber optische systeem heeft een nauwkeurigheid van +/- 0.2°C tussen 35°C en 45°C en is immuun voor EMI. Ook is er voor het onderzoek een fantoom gemaakt, dit fantoom bootst het menselijk lichaam na en is geschikt voor beide systemen tegelijk.

Bij het onderzoek zal gekeken worden naar een aantal verwachte effecten zoals RF geïnduceerde verwarming en instraling. De verwachte RF geïnduceerde verwarming ligt bij ca. +0.1°C en de instraling is onbekend. Is het zo dat ferriet kralen de stoorstromen kunnen onderdrukken? Er zijn een aantal setjes ferriet kralen beschikbaar om dit te testen.

Omdat bij de hyperthermie behandeling de temperatuur van cruciaal belang is om te weten tijdens de behandeling, is er veel belangstelling bij dit onderzoek. Hoe beter de temperatuur bekend is hoe beter de behandeling kan worden uitgevoerd.

In de scriptie is een allereerst een theoretische achtergrond gegeven van hyperthermie en de gebruikte technieken. Ook zal er een onderzoek plaatsvinden met 434 MHz RF om de RF geïnduceerde verwarming en andere beïnvloeding te achterhalen.

In de conclusie van deze scriptie worden ook aanbevelingen gegeven.

## 2. Hyperthermische oncologie

Hyperthermie is een vorm van kankerbestrijding waarbij radiogolven worden gebruikt om een tumor te verwarmen. Door het verwarmen van de tumor naar een temperatuur rond de 43 °C denatureren er eiwitten en verliezen deze hun werking. De hyperthermie wordt altijd gecombineerd met radio- of chemotherapie omdat deze meer schade kunnen aanrichten door de denaturatie van de eiwitten.

### 2.1. Werking & uitvoering hyperthermie behandelingen

Hyperthermische oncologie is een vorm van kankerbestrijding d.m.v. warmte. De behandelingen komen voor in twee soorten. De eerste is oppervlakkige hyperthermie, dit is tot maximaal vier cm diep en gebruikt radiogolven met een frequentie van 434 MHz. De tweede is de diepe hyperthermie, dit is voor vier cm of dieper en gebruikt radiogolven met een frequentie van 70 MHz. Voor koeling en vermindering van reflecties worden waterbolussen tussen de antenne en de patiënt geplaatst.

#### 2.1.1. Biologische werking

Bij een hyperthermiebehandeling wordt de tumor verwarmd tot ergens tussen de 42 °C en 45 °C afhankelijk van het voor ogen gestelde doel. Tumorweefsel is door de omvang minder goed doorbloed dan gewoon weefsel, dit zorgt ervoor dat tumorweefsel niet in staat is de bloedvaten te verwijden en daardoor slecht kan koelen. Gewoon weefsel rondom de tumor is wel in staat tot goed koelen waardoor de schade aan het omliggende weefsel minimaal is. (Hyperthermie, 2013)

Als het lichaam boven een temperatuur van 42°C komt kan het o.a. voorkomen dat eiwitten en proteïnen beginnen te denatureren. Eiwitten hebben een karakteristieke vorm waardoor ze hun werking hebben, bij denaturatie vouwen de eiwitten uit en verliezen zo hun werking. Omdat de eiwitten niet meer werkzaam zijn, kan de tumor minder goed schade herstellen die aangericht wordt door chemo- of radiotherapie. Hyperthermie versterkt op deze manier de effectiviteit van chemo- en radiotherapie.

#### 2.1.2. Oppervlakkige hyperthermie

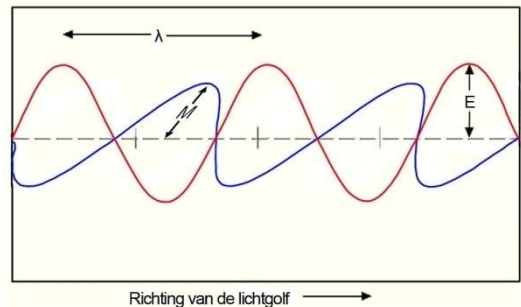
De oppervlakkige hyperthermie wordt veel gebruikt bij oppervlakkige tumoren zoals bijvoorbeeld borstkanker. Er is gekozen voor 434 MHz omdat er geen grote indringdiepte nodig is. Voor deze behandeling worden contact-flexible microstrip antennes (CFMA's) gebruikt. Deze antennes hebben als voordeel dat ze buigbaar zijn en dus om het lichaam gebogen kunnen worden om beter aan te sluiten. Aan de antenne zit een waterbolus vast waar verwarmd water doorheen wordt gepompt.

#### 2.1.3. Diepe hyperthermie

De diepe hyperthermie wordt gebruikt voor tumoren diep in het lichaam. Om een grotere indringdiepte te behalen dan bij oppervlakkige hyperthermie wordt er gebruik gemaakt van radiogolven met een frequentie van 70 MHz. Bij de diepe hyperthermie wordt een patiënt tussen vier identieke golfpijp antennes geplaatst. Interessant is dat deze antennes een vlak golffront produceren i.p.v. een gekromd golffront zoals bij een puntbron het geval is. De patiënt wordt ter hoogte van de antenne volledig omringd door waterbolussen. Door de waterbolussen wordt constant gekoeld water gepompt. Bij diepe hyperthermie kan d.m.v. een faseverschil tussen de antennes een focus gecreëerd worden op de plek van de tumor.

## 2.2. Radiogolven

Radiogolven zijn deel van het elektromagnetische spectrum net als licht. Elektromagnetische straling kan worden gedefinieerd als de voortplanting door de ruimte van elektrische en magnetische oscillaties. Een wisselend elektrisch veld gaat altijd gepaard met een magnetisch veld en vice versa. Een elektromagnetische golf is dus altijd een combinatie van een elektrisch veld  $\vec{E}$  en een magnetisch veld met magnetische fluxdichtheid  $\vec{B}$  die loodrecht op elkaar staan. In Figuur 2-1 is  $\vec{E}$  weergegeven met de rode lijn en daar loodrecht op in het blauw wordt  $\vec{B}$  weergegeven.  $\lambda$  duidt de golflengte aan van de getekende golf. (Giancoli, 2009)



**Figuur 2-1. Een schematische weergave van een elektromagnetisch golf. (Elektromagnetische straling, 2014)**

De golf weergegeven in Figuur 2-1 is een lineair gepolariseerde monochromatische golf die zich voortbeweegt in vacuüm. De golf kan nu als volgt worden beschreven (Giancoli, 2009):

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

waarin:

|                            |                                                                     |                    |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------|
| $\vec{E}$                  | de elektrische veldsterkte op de plaats $\vec{r}$ op tijdstip $t$   | [V/m]              |
| $\vec{B}$                  | de magnetische fluxdichtheid op de plaats $\vec{r}$ op tijdstip $t$ | [T]                |
| $\vec{E}_0$                | de amplitude van het elektrische veld                               | [V/m]              |
| $\vec{B}_0$                | de amplitude van de magnetische fluxdichtheid                       | [T]                |
| $\omega$                   | de hoekfrequentie van de golven                                     | [Rad/s]            |
| $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ | het golfgetal                                                       | [m <sup>-1</sup> ] |
| $t$                        | de tijd                                                             | [s]                |
| $x$                        | een lengte element van de golf                                      | [m]                |

Opmerkelijk aan elektromagnetische golven is dat ze, in tegenstelling tot b.v. geluidsgolven, geen medium nodig hebben om zich in te verplaatsen. In een vacuüm bewegen alle elektromagnetische golven zich voort met de lichtsnelheid  $c$  van 300.000 km/s.

### 2.3. Diëlektrische verwarming

In het kort is dit het proces waarbij een hoogfrequent elektrisch veld of elektromagnetische golf een diëlektrisch materiaal verwarmt. Bij hoge frequenties wordt de verwarming veroorzaakt door moleculaire dipool rotaties.

Een dipool is een deeltje dat twee polen heeft die een tegengestelde polariteit hebben. Een paar goede voorbeelden van dipolen zijn water en vet (Dipool, 2013). Ook in het menselijk lichaam komen dus dipolen voor. Bij een molecuul dat van zich zelf ongeladen is kan er toch een ladingsverdeling ontstaan tussen de atomen omdat het ene atoom sterker aan de elektronen trekt dan het andere. Een molecuul waarbij dit zo is heeft een moleculair dipoolmoment. (Dipoolmoment, 2014)

Moleculaire rotaties komen voor in materialen die een dipoolmoment hebben, wat inhoudt dat de moleculen zich constant richten naar het aanwezige elektromagnetische veld. Omdat een radiogolf een snel oscillerende elektromagnetische golf is zullen de moleculen gaan roteren om constant gelijk te richten met het veld. Als het veld verandert draaien de moleculen om van richting. Het roteren van de moleculen zorgt voor botsingen met andere moleculen en andere interacties aan omliggende moleculen en geeft zo energie door aan de omgeving. Deze energie is in de vorm van warmte, het toenemen van de gemiddelde kinetische energie is hetzelfde als een toename van de temperatuur. (Dielectric heating, 2014)

De gegenereerde vermogensdichtheid per volume wordt gegeven door:

$$p = \omega \cdot \varepsilon_r'' \cdot \varepsilon_0 \cdot E^2 \quad (3)$$

|                   |                                                     |         |
|-------------------|-----------------------------------------------------|---------|
| $p$               | de gegenereerde vermogensdichtheid per volume       | [J/s]   |
| $\omega$          | de hoeksnelheid van de gebruikte frequentie         | [rad/s] |
| $\varepsilon_r''$ | het imaginaire deel van de relatieve permittiviteit | [-]     |
| $\varepsilon_0$   | de permittiviteit van vacuüm                        | [F/m]   |
| $E$               | de elektrische veld sterkte                         | [V/m]   |

De reden dat de complexe permittiviteit gebruikt wordt is omdat de reactie van materialen op externe velden afhangt van de frequentie van het veld. Hieruit blijkt dat de polarisatie van het materiaal niet instantaan kan gebeuren. De reactie loopt dus altijd achter op het veld, wat weergegeven kan worden met een fase verschil.

## 2.4. Specific absorption rate

De specific absorption rate (SAR) is de mate waarin energie geabsorbeerd wordt door het menselijke lichaam wanneer het wordt blootgesteld aan een radiofrequent (RF) elektromagnetisch veld. Voor behandelingen wordt dit gebruikt om de duur en het gebruikte vermogen af te stellen naar het gewenste effect. de SAR kan als volgt worden berekend (Specific absorption rate, 2014):

$$SAR = \int_{sample} \frac{\sigma(r) \cdot |E(r)|^2}{\rho(r)} dr \quad (4)$$

waarin:

|          |                                                        |                      |
|----------|--------------------------------------------------------|----------------------|
| SAR      | het geabsorbeerde vermogen per gewichtseenheid weefsel | [W/kg]               |
| $\sigma$ | de conductiviteit van een volume-element weefsel       | [S/m]                |
| $E$      | de effectieve waarde van het elektrische veld          | [V/m]                |
| $\rho$   | de dichtheid van een volume-element weefsel            | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $r$      | het volume-element                                     | [m <sup>3</sup> ]    |

In de formule voor de SAR staat de conductiviteit genoemd. Voor dezelfde reden als de complexe permittiviteit van formule 3 moet er ook een complexe vorm voor de conductiviteit worden gebruikt. Deze kan worden gekoppeld aan de permittiviteit op de volgende manier (Permittivity, 2014):

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' + j \frac{\sigma}{\omega} \quad (5)$$

waarin:

|                  |                                                    |          |
|------------------|----------------------------------------------------|----------|
| $\hat{\epsilon}$ | de complexe permittiviteit                         | [F/m]    |
| $\epsilon'$      | het reële deel van de permittiviteit               | [F/m]    |
| $j$              | de imaginaire eenheid                              | [-]      |
| $\omega$         | de hoekfrequentie van de elektromagnetische golven | [rad/s]. |

Bij een andere frequentie verandert de conductiviteit en dit heeft ook invloed op de SAR. Bepaalde frequenties zullen meer schade doen dan anderen. Een andere vorm voor complexe conductiviteit is de admitantie  $Y$  gemeten in Siemens.  $Y$  is het tegenovergestelde van de impedantie  $Z$ , de complexe weergave van weerstand.

## 2.5. Impedantie

In het geval van elektromagnetische golven is de weerstand  $R$  onvoldoende om te beschrijven wat er gebeurt. In dit geval moet de impedantie  $Z$  worden gebruikt. De impedantie kan worden beschreven als (Impedance, 2014):

$$Z = R + jX \quad (6)$$

waarin:

|     |               |              |
|-----|---------------|--------------|
| $Z$ | de impedantie | $[\Omega]$   |
| $R$ | de weerstand  | $[\Omega]$   |
| $X$ | de reactantie | $[\Omega]$ . |

of in polaire vorm (Impedance, 2014):

$$Z = |Z| e^{j\varphi} \quad (7)$$

waarin:

|           |                                            |                  |
|-----------|--------------------------------------------|------------------|
| $ Z $     | de grote van de vector van $Z$             | $[\Omega]$       |
| $\varphi$ | het faseverschil tussen spanning en stroom | $[\text{rad}]$ . |

De reactantie is in de elektronica de tegenstand van een systeem tegen een verandering in stroom of spanning als gevolg van zelfinductie of capaciteit. De totale reactantie is te beschrijven als (Electrical reactance, 2014):

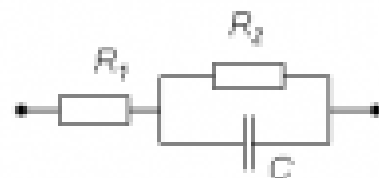
$$X = X_c - X_L = \frac{1}{\omega C} - \omega L \quad (8)$$

waarin:

|       |                           |                |
|-------|---------------------------|----------------|
| $X_c$ | de capacatieve reactantie | $[\Omega]$     |
| $X_L$ | de inductieve reactantie  | $[\Omega]$     |
| $C$   | de capacitantie           | $[\text{F}]$   |
| $L$   | de inductantie            | $[\text{H}]$ . |

Ook het menselijk lichaam heeft een impedantie, deze is vereenvoudigd weergegeven in Figuur 2-2.

In Figuur 2-2 Zijn twee weerstanden en een condensator weergegeven. De reactantie bevat dus alleen de  $X_c$  component. De impedantie van het lichaam speelt een belangrijke rol in de vermogensoverdracht van de antenne naar het lichaam. Voordat het signaal van de generator bij de antenne komt wordt het getransporteerd via een transmissielijn, dit zal eerst worden behandeld.



**Figuur 2-2. Vereenvoudiging van de impedantie van het menselijk lichaam. (impedantie plethysmografie & flebografie, 2013)**

## 2.6. Transmissielijnen

Alle verbindingen die elektromagnetische golven transporteren worden in het algemeen transmissielijnen genoemd. Daarnaast moet de lengte van de lijn veel groter zijn dan de golflengte van het signaal. De gebruikte kabels in dit geval zijn coaxkabels. Transmissielijnen hebben een karakteristieke impedantie, dat is de impedantie van de lijn als deze oneindig lang zou zijn. Deze wordt gegeven door (Characteristic impedance, 2014):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad (9)$$

waarin:

|       |                                              |                       |
|-------|----------------------------------------------|-----------------------|
| $Z_0$ | de karakteristieke impedantie                | [ $\Omega$ ]          |
| $r$   | de serieweerstand per lengte-eenheid         | [ $\Omega/\text{m}$ ] |
| $l$   | de zelfinductie per lengte-eenheid           | [H/m]                 |
| $g$   | de parallelgeleidbaarheid per lengte-eenheid | [S/m]                 |
| $c$   | de elektrische capaciteit per lengte-eenheid | [F/m].                |

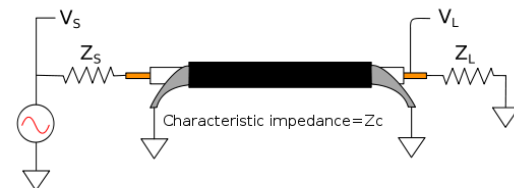
De karakteristieke impedantie kan visueel worden weergegeven zoals in Figuur 2-3. Waarbij  $Z_s$  de bron impedantie van de generator is,  $Z_c$  de karakteristieke impedantie van de transmissie lijn en  $Z_L$  de belastingsimpedantie van de antenne.

De impedantie van de transmissielijn is belangrijk bij het ontwerpen van een systeem. Als een systeem niet goed is ontworpen kan er signaalverlies of signaalvervalsing optreden door reflecties die ontstaan. De reflecties ontstaan als het signaal een discontinuïteit in de karakteristieke impedantie tegenkomt in de lijn, of als het einde van de lijn niet is afgesloten met de karakteristieke impedantie. Naast signaalverlies/valsing kan gereflecteerd signaal ook een overbelasting geven van een generator. Reflecties in de lijn zorgen ervoor dat er staande golven optreden in de lijn. Voor de reflecties kan er een reflectiecoëfficiënt worden bepaald volgens (VSWR, 2014):

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_f} \quad (10)$$

waarin:

|          |                            |      |
|----------|----------------------------|------|
| $\Gamma$ | de reflectiecoëfficiënt    | [-]  |
| $V_r$    | de gereflecteerde spanning | [V]  |
| $V_f$    | de voorwaartse spanning    | [V]. |



**Figuur 2-3. Een model van een transmissie lijn met een karakteristieke impedantie. (coaxial line, 2014)**

Reflecties ontstaan door verschillen in de impedantie. De reflectiecoëfficiënt kan ook worden bepaald met impedanties. Stel een transmissielijn met een impedantie  $Z_0$  en een load met een impedantie  $Z_L$  zijn verbonden. De reflectiecoëfficiënt is dan als volgt (VSWR, 2014):

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (11)$$

waarin:

$$\begin{aligned} Z_L & \text{ de belastingsimpedantie} & [\Omega] \\ Z_0 & \text{ de transmissielijn impedantie} & [\Omega]. \end{aligned}$$

$\Gamma$  is een complex getal wat de grote en de fase van de reflectie weergeeft. De staande golven die ontstaan door de reflecties worden beschreven met de staande golf verhouding (Engels voor: Standing wave Ratio, SWR). De SWR is het spanningsdeel van de voorwaartse golf gesuperponeerd met het spanningsdeel van de gereflecteerde golf. Voor het berekenen van de SWR is alleen de grote van de reflectie nodig, dit definiëren we als volgt (VSWR, 2014):

$$\rho = |\Gamma| \quad (12)$$

waarin:

$$\rho \quad \text{de grote van de reflectie} \quad [-].$$

Op het moment dat er reflectie optreedt in de transmissielijn zullen de twee golven gaan interfereren. Er zal een maximum,  $V_{\max}$ , en een minimum  $V_{\min}$ , ontstaan ergens in de lijn. De som van de amplitudes zijn (VSWR, 2014):

$$V_{\max} = V_f + V_r = V_f + \rho V_f = V_f (1 + \rho) \quad (13)$$

en

$$V_{\min} = V_f - V_r = V_f - \rho V_f = V_f (1 - \rho) \quad (14)$$

waarin:

$$\begin{aligned} V_{\max} & \text{ de maximale spanningsamplitude} & [V] \\ V_{\min} & \text{ de minimale spanningsamplitude} & [V]. \end{aligned}$$

de SWR is dan (VSWR, 2014):

$$SWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (15)$$

de SWR wordt uitgedrukt met bijvoorbeeld 1,2:1, dit betekent dat er een staande golf ontstaat met een 1,2 maal zo grote amplitude.

De SWR kan ook worden gebruikt om de verhouding tussen voorwaarts en gereflecteerd vermogen uit te drukken. Omdat het vermogen proportioneel is met de spanning in het kwadraat geldt het volgende (VSWR, 2014):

$$\frac{P_r}{P_f} = \left( \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \right)^2 \quad (16)$$

waarin:

$P_r$  het gereflecteerde vermogen [W]

$P_f$  het voorwaartse vermogen [W].

Deze verhouding is belangrijk bij behandelingen. Het gebruikte systeem gebruikt 50 Ohm coaxkabels als transmissielijnen naar de antenne toe. De antenne en de generator hebben beide een impedantie van 50 Ohm waardoor er geen reflecties ontstaan in de transmissielijn omdat het systeem niet zou voldoen aan karakteristieke afsluiting. De impedantie van de patiënt is vaak geen 50 Ohm waardoor er dus als nog reflecties kunnen ontstaan, zie hoofdstuk 2.14 hierover.

## 2.7. Antennes

Voor de vermogensoverdracht naar het lichaam van de patiënt worden antennes gebruikt. Antennes zorgen voor een overdracht van elektrische energie naar radiogolven.

Bij het ontwerpen van een antenne zijn er een aantal dingen waar rekening mee moet worden gehouden: de versterking, de richtingkarakteristiek en de impedantie. (Antenna\_(radio), 2014)

## 2.8. Versterking

De versterking van een antenne wordt uitgedrukt met de letter G (engelse Gain). De versterking is een maat voor hoe richtingsgevoelig de antenne is. De versterking is gedefinieerd als het door de antenne uitgezonden vermogen in de richting van de maximale output, gedeeld door het vermogen uitgezonden door een isotrope antenne in dezelfde richting. Een isotrope antenne is een antenne die in alle richting evenveel vermogen uitstraalt. In formule vorm ziet de versterking G er als volgt uit (Antenna\_(radio), 2014):

$$G = 10 \log \left( \frac{\Phi_A}{\Phi_0} \right) \quad (17)$$

waarin:

$G$  de antenneversterking [dB]

$\Phi_A$  de stralingsdichtheid van de antenne [W/m<sup>2</sup>]

$\Phi_0$  de stralingsdichtheid van een isotrope antenne [W/m<sup>2</sup>].

De versterking moet gemeten worden op een afstand van minimaal een aantal keer de golflengte verwijderd van de antenne. Daarnaast heeft een antenne ook nog een efficiëntie. Bij een efficiëntie van 80% als er 100W vermogen wordt geleverd aan de antenne dan zal er 80W worden uitgestraald en 20W aan warmte worden geproduceerd door weerstand in de verschillende onderdelen.

## 2.9. Richtingskarakteristiek

De richtingskarakteristiek van een antenne geeft aan in welke richting een antenne de straling bundelt. Bij een ontvangstantenne geeft het aan in welke richting de antenne het gevoeligst is. In een stralingsdiagram kan de richtingskarakteristiek worden weergegeven. Hierin kan de openingshoek worden gedefinieerd. Dit is de hoek tussen de richtingen waarbij de antenneversterking met 3dB is afgenomen. Een hoge waarde voor  $G$  gaat altijd gepaard met een kleine openingshoek. De energie wordt beter gebundeld dus de openingshoek wordt kleiner (Antenna\_(radio), 2014).

In het geval van een ontvangst antenne kan er ook worden gesproken over het effectieve antenneoppervlak  $A_{eff}$ .  $A_{eff}$  is gerelateerd aan de antenneversterking  $G$  als volgt (Antenna\_(radio), 2014):

$$A_{eff} = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (18)$$

waarin:

|           |                                 |         |
|-----------|---------------------------------|---------|
| $A_{eff}$ | het effectieve antenneoppervlak | $[m^2]$ |
| $\lambda$ | de golflengte van het signaal   | $[m]$ . |

$A_{eff}$  is een mate voor hoe effectief een antenne vermogen kan ontvangen uit binnenkomende radiogolven. Het effectieve oppervlak staat altijd loodrecht op de binnenkomende radio golven.

## 2.10. Antenne-impedantie

De impedantie van een antenne is belangrijk om reflecties te voorkomen. Bij elke overgang kunnen er reflecties optreden die ongunstig zijn. Ook kan er een reflectie optreden bij de overgang van de antenne naar de patiënt. Om dit effect zo klein mogelijk te maken worden er waterbolussen geplaatst tussen de antenne en de patiënt. De impedantie van water is dichterbij die van het menselijk lichaam dan lucht. Volgens formule 11 is dan de reflectie kleiner.

Hoe verder de twee waarden uit elkaar liggen hoe meer reflectie. Een tweede probleem dat optreedt is dat de impedantie van het menselijk lichaam per persoon anders is. Er moet iets worden gedaan om hier voor te compenseren. Deze techniek heet "Impedance matching."

### 2.11. Impedance matching

Impedance matching kan op twee manieren worden gebruikt: maximale vermogensoverdracht of minimale reflectie. Voor maximale vermogensoverdracht moet gelden (Impedance matching, 2014):

$$Z_s = \bar{Z}_l \quad (19)$$

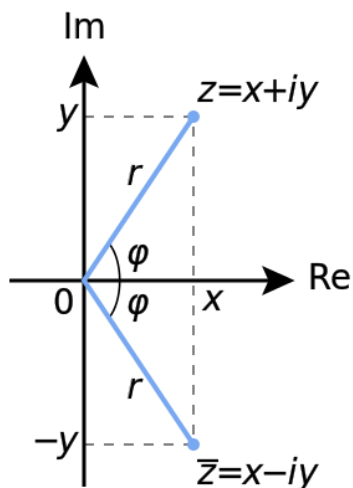
waarin:

$$Z_s \quad \text{de bronimpedantie} \quad [\Omega]$$

$$\bar{Z}_l \quad \text{de belastingsimpedantie} \quad [\Omega].$$

Het sterretje in de formule duidt op de complex geconjugeerde van de belastingsimpedantie.

Dus als  $Z = A + jB$  dan is de complex geconjugeerde van de impedantie:  $\bar{Z} = A - jB$  zoals weergegeven in Figuur 2-4.



**Figuur 2-4. Een vectoriële weergave van de complex geconjugeerde  $\bar{z}$  van  $z$ . (Complex conjugate, 2014)**

Er kan ook een match gemaakt worden voor de minimale reflectie. Er moet dan gelden (Impedance matching, 2014):

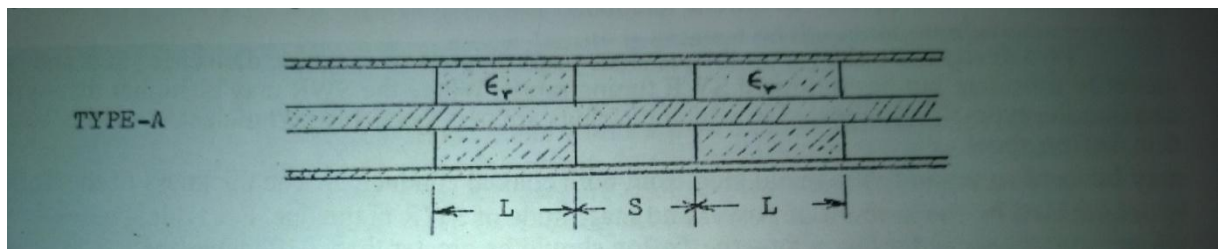
$$Z_s = Z_l \quad (20)$$

Bij behandeling wordt het systeem ingesteld op zo min mogelijk reflectie omdat de generatoren hier zeer gevoelig voor zijn. De impedantie van de patiënt is niet constant dus moet de impedantie worden aangepast. Om de impedantie aan te passen zo dat er zo min mogelijk reflecties optreden wordt een tuner gebruikt.

## 2.12. Tuner

Om een impedance match te maken wordt er een dual-slug tuner gebruikt. Deze wordt aangesloten tussen de generatoren en de antennes. Een dual-slug tuner is een grote buis gemaakt van een geleider met in het midden van de buis een staaf van geleidend materiaal. Aan beide uiteinden bevinden zich correctoren die worden aangesloten op de transmissielijnen.

Tussen de wand en de staaf in het midden bevindt zich lucht en twee zogeheten "slugs." De slugs worden gemaakt van een diëlektricum.



**Figuur 2-5. Een schets van de binnenkant van een dual-slug tuner.**

In Figuur 2-5 is de binnenkant van de tuner weergegeven. De lengte  $L$  van de slugs kan worden berekend volgens:

$$L = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r}} \quad (21)$$

waarin:

|              |                                                            |      |
|--------------|------------------------------------------------------------|------|
| $L$          | de lengte van de slug                                      | [m]  |
| $\lambda_0$  | de golflengte van het signaal in lucht                     | [m]  |
| $\epsilon_r$ | de relatieve diëlektrische constante van het slugmateriaal | [-]. |

De slugs zijn een kwart lambda lang, de tuners zijn dus geschikt voor één golflengte. Voor andere golflengtes werkt de tuner minder goed.

Om de impedantie nu te veranderen worden de slugs verschoven in de buis. Het voorwaartse en gereflecteerde vermogen wordt constant gemeten, er kan zo op een empirische wijze de optimale positie van de slugs bepaald worden.

### 3. Thermometrie

De thermometrie is het systeem waarmee de temperatuur wordt gemeten. Bij hyperthermie is de temperatuur cruciaal omdat de hoeveelheid schade direct gerelateerd is aan de temperatuur.

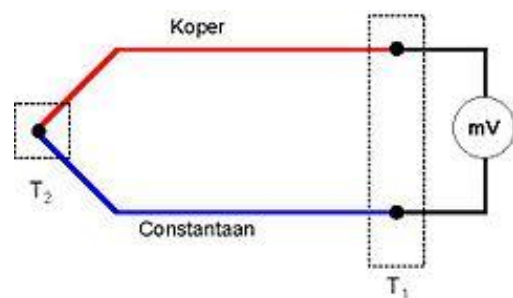
Om de temperatuur te meten tijdens een behandeling zijn twee systemen in gebruik. Het eerste, en meest gebruikte, systeem maakt gebruik van thermokoppels. Het tweede systeem maakt gebruik van fiber optische techniek en luminescentie.

#### 3.1. Thermokoppelthermometrie

Thermokoppels zijn temperatuur sensoren die gebruik maken van het thermo-elektrische effect.

#### 3.2. Werking van een thermokoppel

In Figuur 3-1 is een Koper Constantaan thermokoppel weergegeven. Het punt  $T_2$  in de figuur is de warmelas en tevens het punt waar wordt gemeten. Punt  $T_1$  is de koudelas. Een thermokoppel meet altijd een verschil temperatuur tussen de warmelas en de koudelas. Als er een temperatuursverschil optreedt tussen  $T_2$  en  $T_1$  dan ontstaat er een spanning van enkele mV die kan worden gemeten. Deze spanning is evenredig aan het temperatuursverschil als deze binnen het bereik van de thermokoppel valt. Bij de behandelingen worden Koper Constantaan thermokoppels gebruikt. Voor een Koper Constantaan thermokoppel ligt het bereik tussen  $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$  en  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  en de gevoeligheid is ca.  $43\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  (Thermokoppel, 2013). De opgewekte spanning kan worden berekend met de volgende formule (Thermokoppel, 2013):



**Figuur 3-1. Een schematische weergave van een thermokoppel.**

$$U_t = \alpha(T_2 - T_1) \quad (22)$$

waarin:

|          |                          |                          |
|----------|--------------------------|--------------------------|
| $U_t$    | de thermokoppel spanning | [V]                      |
| $\alpha$ | de Seebeckconstante      | [V/ $^{\circ}\text{C}$ ] |
| $T_2$    | de warmelas temperatuur  | [ $^{\circ}\text{C}$ ]   |
| $T_1$    | de koudelas temperatuur  | [ $^{\circ}\text{C}$ ].  |

Het is belangrijk bij temperatuurmetingen met een thermokoppel om de koudelas temperatuur te weten. Vaak wordt de koudelas gemeten met één of meerdere thermistors(temperatuur gevoelige weerstanden).

Formule 24 beschrijft het Seebeck-effect. Dit is een onderdeel van het thermo-elektrische effect. Het andere deel is het Peltier-effect. Omdat er een spanning ontstaat en de ingang van het meetsysteem hoog ohmig is zal er geen stroom gaan lopen. Als er door een andere bron wel stroom gaat lopen dan kan deze stroom kan er voor zorgen dat er warmte wordt weg- of toegevoerd bij een las. Het Peltier-effect is als volgt uit te drukken voor Figuur 3-1 (Thermoelectric effect, 2014):

$$Q = (\Pi_a - \Pi_b) \cdot I \quad (23)$$

waarin:

|         |                                                   |       |
|---------|---------------------------------------------------|-------|
| $Q$     | de gegenereerde hitte                             | [J]   |
| $\Pi_a$ | de Peltierconstante van materiaal A (Koper)       | [J/A] |
| $\Pi_b$ | de Peltierconstante van materiaal B (Constantaan) | [J/A] |
| $I$     | de stroom tussen de twee materialen               | [A].  |

Het Peltier-effect is ongunstig omdat het fungeert als een warmtepomp. Omdat de netto stroom die gaat lopen vanwege het Seebeck-effect nul is zal de invloed van het Peltier-effect door het Seebeck-effect verwaarloosbaar zijn. Als er via een externe bron een stroom gaat lopen in de thermokoppel kan het Peltier-effect wel een rol gaan spelen, naar ohmse verwarming.

De thermokoppels zijn gemaakt van hele dunne draden met een plastic omhulsel. Een thermokoppel probe kan daarom worden gezien als een draad antenne. Een draad antenne is onmindirectioneel, in elke richting evenwijdig aan de draad wordt evenveel vermogen omgezet. Als de  $A_{\text{eff}}$  uit formule 19 nul is dan wordt er geen vermogen omgezet.

### 3.2.1. Stoorstromen

Het omgezette vermogen kan zorgen voor o.a. een stoorstroom volgens (Thermoelectric effect, 2014):

$$P = I^2 \cdot R \quad (24)$$

waarin:

|     |                                  |      |
|-----|----------------------------------|------|
| $P$ | het omgezette vermogen           | [W]  |
| $R$ | de weerstand van de thermokoppel | [Ω]. |

Om deze stoorstromen te onderdrukken kunnen ferriet kralen worden gebruikt. Ferriet is één van de vele vormen waarin ijzer kan voorkomen en vertoont ferrimagnetisme. Ferrimagnetisme is een combinatie van ferromagnetisme en anti-ferromagnetisme. Bij ferromagnetisme staan alle magnetische moment in het materiaal de zelfde kant op, hierbij ontstaat er een netto magnetisch moment. Bij anti-ferromagnetisme staan alle magnetische momenten in het materiaal antiparallel aan elkaar, er is hier geen netto magnetische moment. Bij een ferrimagneet staan alle magnetische moment in het materiaal antiparallel net als een anti-ferromagneet alleen zijn ze niet van gelijke grootte. Hier door ontstaat net als bij een ferromagneet een netto magnetisch moment (Ferrimagnetisme, 2013).

Een ferrietkraal kan in twee richtingen interferentie voorkomen, van en naar een apparaat. De kraal voorkomt dat een draad zich kan gaan gedragen als een antenne en

ruis oppikt van andere bron. Het ferrimagnetisme zorgt voor een frequentie afhankelijke reactantie die simpelweg kan worden beschouwd als een impedantie, deze impedantie zorgt er voor dat hoog frequente ruis verzwakt word. De energie wordt gereflecteerd of gedissipeerd als warmte in de kraal (Ferrite bead, 2014).

### 3.3. *Fiber optische thermometrie*

De fiber optische thermometrie maakt gebruik van het principe van luminescentie bij fosfor. Luminescentie is als een foton een elektron in een aangeslagen toestand brengt en deze dan terug valt naar de grondtoestand waarbij er licht wordt uitgestraald. Bij het veranderen van de temperatuur van het gebruikte fosfor veranderen er eigenschappen van het uitgezonden licht. Aan de hand van de nalichttijd kan vervolgens de temperatuur worden bepaald (Phospor thermometry, 2014).

Het fosfor wordt belicht door een gepulste laser waarna er luminescentie optreed. De luminescentie blijft een tijdje bestaan maar neemt af gedurende de tijd. De vervaltijd  $\tau$  is gedefinieerd als de tijd die het duurt voor het signaal om  $1/e$  van de originele waarde te bereiken. De intensiteit van de luminescentie verloopt als volgt (Phospor thermometry, 2014):

$$I = I_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (27)$$

waarin:

|        |                                |      |
|--------|--------------------------------|------|
| $I$    | de intensiteit op tijdstip $t$ | [cd] |
| $I_0$  | de intensiteit op tijdstip 0   | [cd] |
| $t$    | de tijd                        | [s]  |
| $\tau$ | de vervaltijd                  | [s]. |

Het systeem meet de intensiteit en bepaalt daarmee de vervaltijd die de temperatuur aangeeft. Formule 27 kan herschreven worden naar:

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)} \quad (27-2)$$

Het systeem middelt over een aantal metingen, dit wordt gedaan op de nauwkeurigheid te verbeteren. Het is niet bekend welk fosfor wordt gebruikt in het gebruikte systeem, daarom is de temperatuursafhankelijkheid van de vervaltijd ook niet bekend voor het systeem.

## 4. Vooronderzoek

Vooraf aan het onderzoek is er gekeken naar welke effecten er daadwerkelijk voorkomen, of de oriëntatie ten opzichte van het veld invloed heeft op het opgevangen vermogen en of de bedachte maatregelen daadwerkelijk invloed hebben.

### 4.1. Invloed van de oriëntatie

Bij deze metingen worden er twee thermokoppels en twee fibers gebruikt. Eén set bevindt zich loodrecht op het E-veld en de andere set bevindt zich evenwijdig aan het E-veld. Deze meting is uitgevoerd met de 434 MHz opstelling, naar verwachting zal het effect hier vergelijkbaar zijn met de 70 MHz opstelling alleen in een andere magnitude. Dit omdat de antenne werking onafhankelijk is van de frequentie maar het effectieve antenne oppervlak niet. Verder wordt er verwacht dat er meer effect zichtbaar is van EMI met de thermokoppel evenwijdig aan het E-veld, dit omdat er meer effectief oppervlak is dan bij loodrecht op het E-veld.

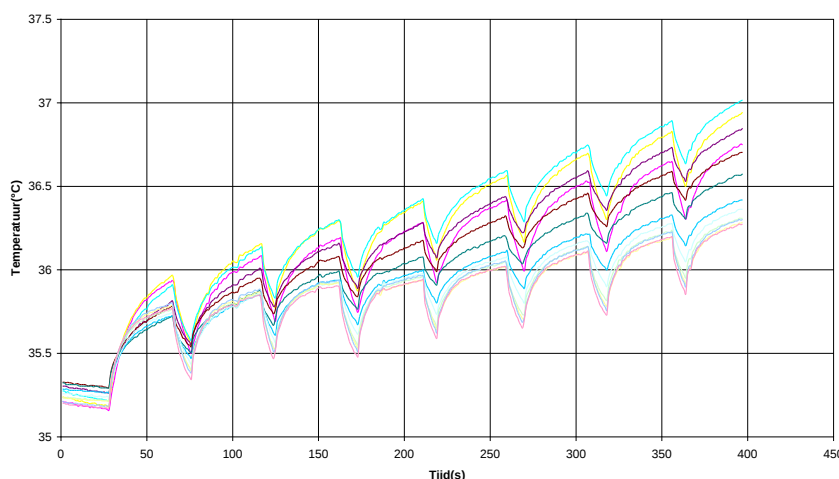
#### 4.1.1. Metingen

De metingen worden uitgevoerd met een vermogen van 150 Watt en er wordt superstuff gebruikt als load. Superstuff wordt gebruikt om het menselijk lichaam na te bootsen. Als antenne is een 5H gebruikt, dit is de grootste beschikbare maat. Er zijn probes met 14 meetpunten gebruikt.

Tijdens de meting wordt het vermogen gepulst, 25 seconden aan en 5 seconden uit. Er wordt ongeveer om de seconden een temperatuursmeting gedaan.

#### 4.1.2. Resultaten

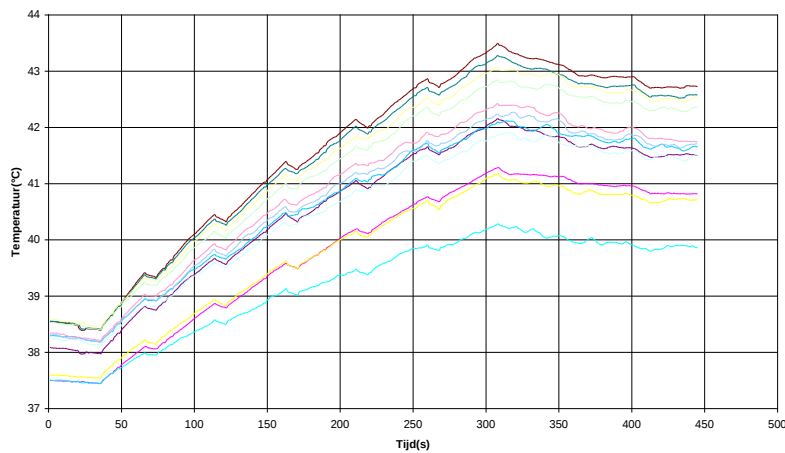
In Figuur 4-1 is het volledige verloop weergegeven van alle 14 punten evenwijdig aan het E-veld.



**Figuur 4-1. 14 puntsthermokoppel evenwijdig aan het E-veld.**

Er is een duidelijk periodiek signaal zichtbaar in het figuur wat gelijk is aan de periode van het vermogen. Dit duidt er op dat de thermokoppel vermogen opvangt uit het elektromagnetische veld. Er treed een fout van ongeveer  $+0,5^{\circ}\text{C}$  op als het vermogen aan staat.

In Figuur 4-2 staat het volledige verloop van alle 14 punten loodrecht op het E-veld weergegeven.



**Figuur 4-2. 14 puntsthermokoppel loodrecht op het E-veld.**

Er is een periodiek signaal zichtbaar in de meting die gelijk is aan de periode van het vermogen. Er treedt een fout op van ongeveer  $+0,1^{\circ}\text{C}$  als het vermogen aan staat.

Na ca. 200 seconden is het vermogen volledig uitgeschakeld en koelt de load af. Er zit nog steeds een storing op het gemeten signaal wat niet afkomstig kan zijn van het EM veld.

#### 4.1.3. Conclusie

Er is daadwerkelijk meer invloed evenwijdig aan het E-veld dan loodrecht op het E-veld. Van ongeveer  $+0,5^{\circ}\text{C}$  naar  $+0,1^{\circ}\text{C}$ . Ook is er nog een storing op het signaal die niet afkomstig is van het elektromagnetische veld. Deze is zo klein dat evenwijdig aan het E-veld deze weg valt tegen over de EMI geïnduceerde storing. Waarschijnlijk komt deze storing van de turbulente stroming door de waterbolus onder de antenne.

### 4.2. Turbulente stroming

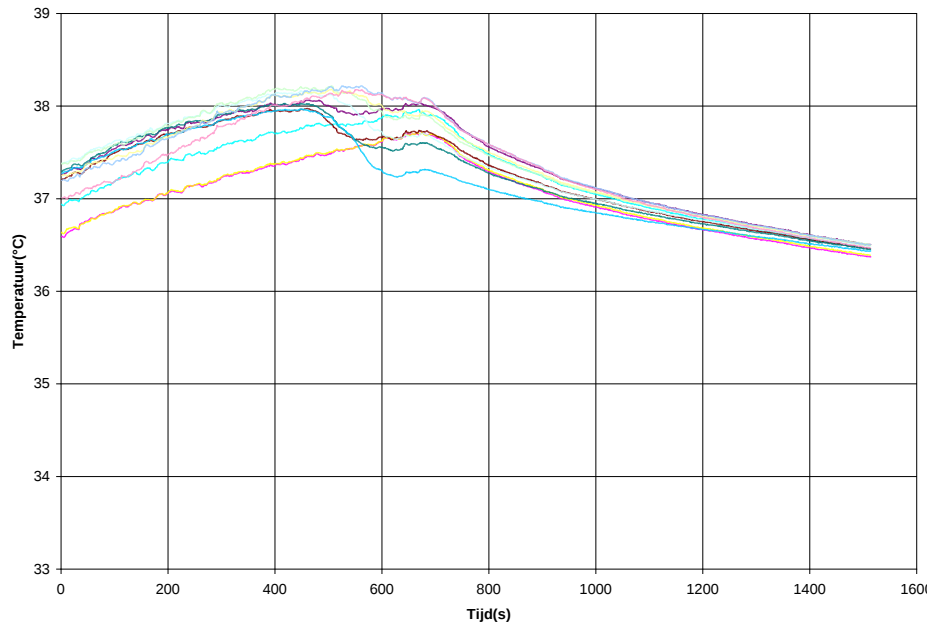
Er lijkt een storing te zijn die naar verwachting komt van de turbulente stroming door de waterbolus. Er wordt onderzocht of dit ook daadwerkelijk zo is. Er wordt een meting gedaan zonder vermogen om dit uit te kunnen sluiten als oorzaak.

#### 4.2.1. Metingen

Er zal bij deze meting een bepaalde tijd worden gepompt met verwarmd water en daarna zal de pomp worden uitgezet een wordt er nog een bepaalde tijd doorgemeten. Als de storing niet meer voorkomt als de pomp uitgaat kan er worden aangenomen dat de stroming in de bolus de oorzaak is. Bij de meting wordt een 5H applicator gebruikt, waarschijnlijk heeft de maat van de antenne ook invloed op hoe sterk het effect waarneembaar is. Bij een kleinere antenne is de stroming anders en het oppervlak kleiner wat invloed kan hebben op de verstoring. Er zal ook een meting worden gedaan met een kleinere antenne.

#### 4.2.2. Resultaten

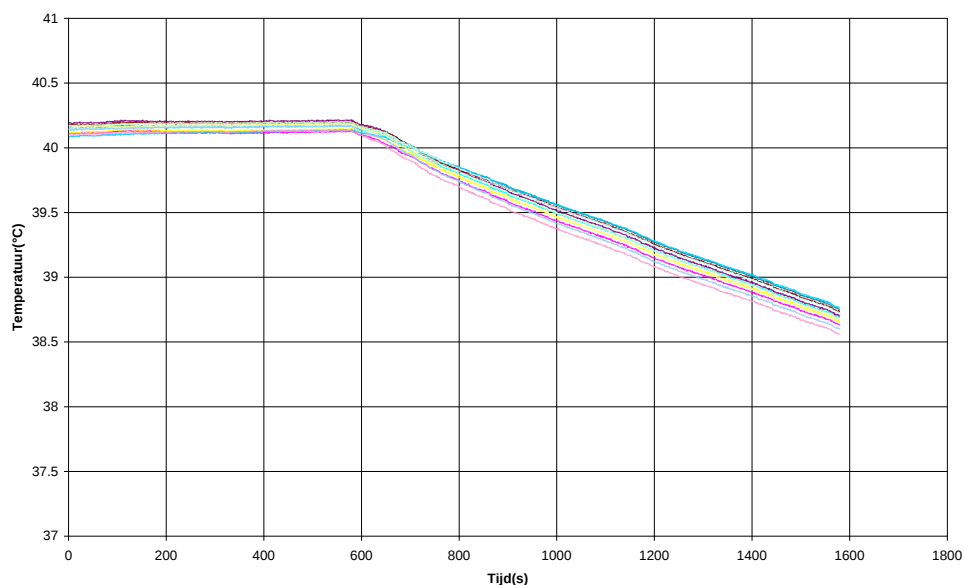
De resultaten van de 5H antenne, welke de grootste is worden als eerste besproken. Daarna volgen de resultaten van de meting met een kleinere 2H antenne, ongeveer de helft van het oppervlak van de 5H.



**Figuur 4-3. Tijd, Temperatuur -diagram van een 5H antenne voor stromingsruis.**

In het figuur zijn alle 14 meetpunten van de probe geplot aangegeven met de verschillende kleuren. Na ca. 600 seconden is de pomp uitgeschakeld en begint de superstuf af te koelen. De helft van de meting waar de pomp aan staat is een storing op het signaal waar te nemen die verdwenen lijkt als de pomp uit gaat. De storing lijkt dus gerelateerd aan de stroming.

De resultaten van de meting met de kleiner 2h antenne zijn geplot met Excel.



**Figuur 4-4. Tijd, Temperatuur -diagram van een 2H antenne voor stromingsruis.**

In figuur 3-4 zijn alle 14 meetpunten van de probe geplot weergegeven in de verschillende kleuren. Na ca. 600 seconden is de pomp uitgeschakeld en begint de superstuff af te koelen. Zowel voor als na het uitzetten van de pomp is de storing op het signaal gelijk maar kleiner dan bij de 5H antenne.

#### 4.2.3. Conclusie

Er is een storing afkomst van de stroming in de bolus zoals verwacht. Ook is de maat van de antenne van invloed op de storing. Een kleinere antenne geeft minder storing.

#### 4.3. Invloed van ferriet kralen

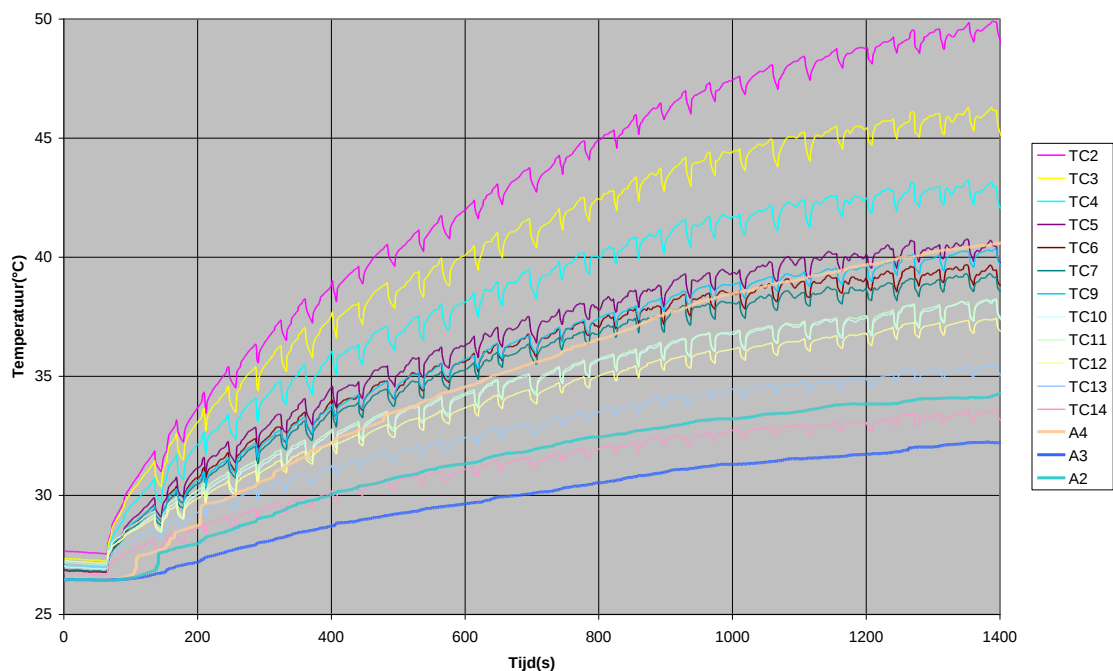
Ferriet kralen kunnen worden gebruikt om stoorstromen te onderdrukken bij RF toepassingen. Er wordt bij deze meting gekeken naar de invloed van het plaatsen van ferriet kralen om een thermokoppel tijdens het verwarmen van superstuff. De verwachting is dat de EMI storing minder zal zijn met ferriet kralen omdat de ferriet kralen als passief filter fungeren.

##### 4.3.1. Metingen

De metingen worden gedaan evenwijdig aan het E-veld omdat het de storing van de EMI het grootste is gebleken. De metingen worden gedaan zonder water rond te pompen en met een 5H antenne. Het vermogen is 150 Watt en wordt 25 seconden aan en 5 seconden uitgezet per periode.

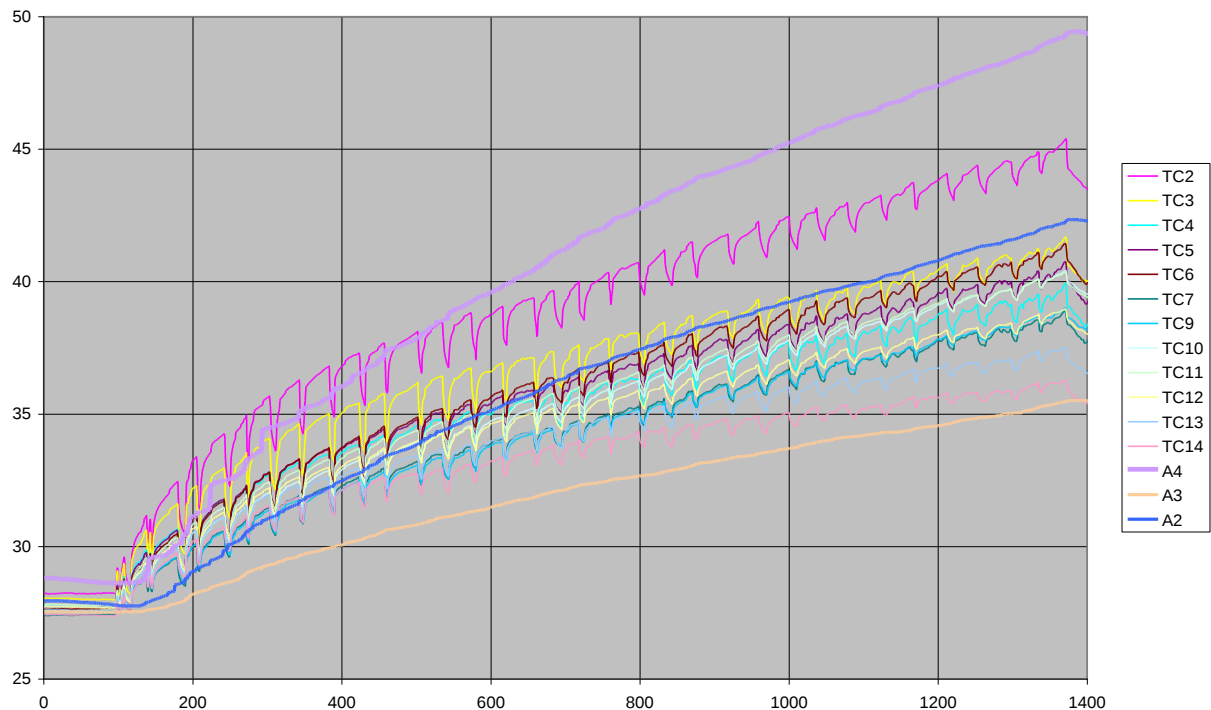
##### 4.3.2. Resultaten

In Figuur 4-5 staan de resultaten van een nul meting zonder ferriet kralen.



**Figuur 4-5. Tijd, temperatuur -diagram nulmeting zonder ferriet kralen.**

Deze meting moet worden vergeleken met de meting zonder ferriet kralen in Figuur 4-6.



**Figuur 4-6 Tijd, Temperatuur -diagram meting met ferriet kralen.**

In zowel Figuur 4-5 als Figuur 4-6 zijn alle meet punten van een thermokoppel geplot en ook drie fiber optische referenties. De referenties waren op drie verschillende plekken langs de thermokoppel probe geplaatst.

De temperatuur is in de meting met ferriet kralen 5°C lager dan zonder. Wat opvalt is dat de temperatuur van de referentie in de nulmeting veel lager blijft dan de temperatuur die de thermokoppel aangeeft. Bij de meting met ferriet kralen is het weer andersom, de referentie bereikt veel hogere temperaturen dan de meting zelf. Er is dus wel iets gebeurd door het toevoegen van ferriet kralen maar hoeveel de invloed is, is nog niet duidelijk.

#### 4.3.3. Conclusie

Er is wel een invloed van het toevoegen van ferriet kralen maar er kan niet met zekerheid gezegd worden hoeveel dit is.

#### 4.4. Invloed van het gebruik van katheters

In het fantoom voor het echte onderzoek worden katheters gebruikt. Deze katheters vormen een isolatie tussen de vulling van het fantoom en de thermokoppels. Er zal een vergelijking worden getroffen tussen een fiber met en een fiber zonder een katheter. Daarna worden beiden fibers in de katheter gemeten om te kijken of er een absoluut verschil aanwezig is. Naar verwachting zal de fiber zonder een katheter een hogere temperatuur geven omdat er geen extra isolatie tussen zit in vorm van een katheter.

#### 4.4.1. Metingen

Er wordt bij deze meting geen thermokoppel gebruikt om verstoring door EMI te voorkomen. Er is een katheter tussen superstuff geplakt zoals weergegeven in Figuur 4-7 bij A. Bij punt B bevinden zich twee katheters naast elkaar voor het tweede deel van de meting.



**Figuur 4-7. Een foto van de meetopstelling.**

De flap superstuff bij C wordt tijdens de meting teruggevouwen over de katheters. De gebruikte antenne is een 5H bij een vermogen van 100Watt.

#### 4.4.2. Resultaten

De resultaten van één fiber zonder katheter en één met staan in Tabel 4-1 weergegeven.

**Tabel 4-1 Resultaten voor een vergelijking van de invloed van een katheter**

|                          | Trendlijn          |
|--------------------------|--------------------|
| Fiber #1 in katheter     | $0,0079x + 17,051$ |
| Fiber #2 buiten katheter | $0,0077x + 16,988$ |

Er is een trendlijn berekend door Excel. De trendlijnen hebben een helling die 0,0002 verschilt, ze zijn bij benadering gelijk. Beide fibers warmen dus even snel op, zowel met als zonder een katheter. Wel zit er een verschil in de offset van de lijnen van 0,063. Dit komt vanwege de ruimte tussen de katheters en de onnauwkeurigheid van +/- 0,25°C.

Als beide fibers vervolgens in een katheter worden geschoven zien de trendlijnen er als volgt uit:

**Tabel 4-2 Resultaten voor een vergelijking van de invloed van een katheter**

|                      | Trendlijn          |
|----------------------|--------------------|
| Fiber #1 in katheter | $0,0098x + 25,199$ |
| Fiber #2 in katheter | $0,01x + 25,275$   |

De trendlijnen hebben beide bij benadering weer een gelijke helling. Alleen is de offset verschoven van fiber #1 die hoger zat naar fiber #2 die nu hoger zit.

#### 4.4.3. Conclusie

De katheters hebben geen invloed op de meting die merkbaar is met de fibers. Ze verwarmen even snel met of zonder katheter. De katheters hoeven niet gevuld te worden

met glycerol maar, ook omdat thermokoppels een kleinere diameter hebben, worden de katheters toch gevuld tijdens de metingen.

#### 4.5. Vergelijking tussen TCM en Fiber Optisch

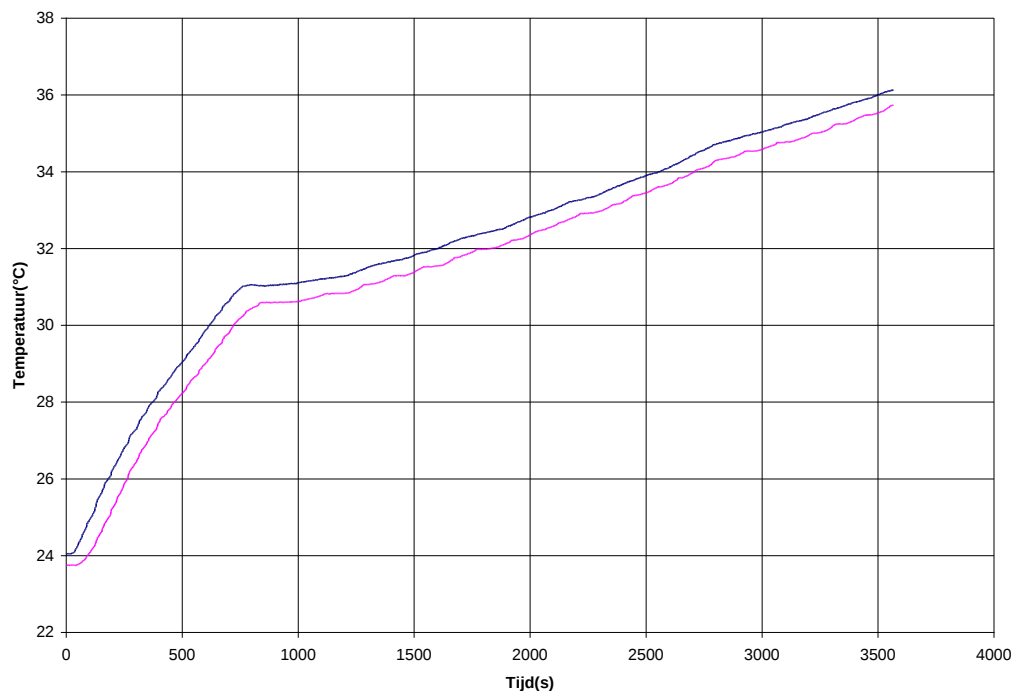
Er wordt een vergelijking gemaakt tussen de thermokoppels en de fibers in een gevulde katheter. Hieruit moet duidelijk worden hoe beide systeem reageren op dezelfde meting. Dit wordt gedaan omdat de fiber als referentie moet dienen voor de thermokoppel probes, maar er niet bekend of beide systeem wel hetzelfde reageren. Naar verwachting zullen beide systeem vergelijkbaar gedrag vertonen als het vermogen uit is.

##### 4.5.1. Metingen

Er wordt een meting gedaan waarbij een fiber en een thermokoppel beide in een katheter gevuld met glycerol worden gestopt. Deze zijn te zien bij B in Figuur 4-7. Er wordt een meting evenwijdig aan het E-veld en loodrecht op het E-veld gedaan met een 5H antenne bij 100Watt.

##### 4.5.2. Resultaten

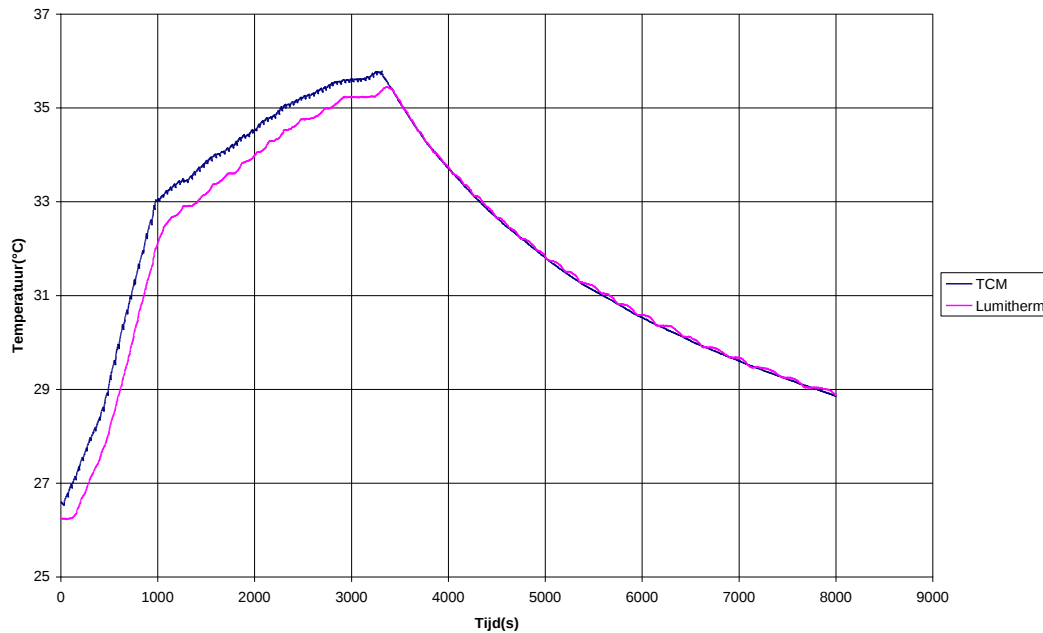
De resultaten van de meting loodrecht op het E-veld zijn hieronder in Figuur 4-8 weergegeven:



**Figuur 4-8. Tijd, Temperatuur -diagram vergelijking loodrecht op het E-veld.**

De blauwe lijn geeft één punt van de thermokoppel probe weer op gelijke hoogte als de in roze weergegeven fiber. Het valt op dat de fiber achter lijkt te lopen op de thermokoppel, ongeveer 5 á 10 seconden later dan de thermokoppel laat de fiber pas een temperatuurstijging zien. Dit zou te verklaren kunnen zijn door het feit dat de fiber meetwaarden uitmiddelt intern.

In Figuur 4-9 staat de meting evenwijdig aan het E-veld weergegeven op dezelfde manier als de meting loodrecht op het E-veld.



**Figuur 4-9 Tijd, Temperatuur -diagram vergelijking evenwijdig aan het E-veld.**

Net als in Figuur 4-8 loopt de fiber achter op de thermokoppel. Er is in deze meting ook een afkoeling meegenomen, hier lopen de twee lijnen door elkaar heen omdat de fiber later begint met afkoelen en de temperatuur dus hoger lijkt dan hij is. Ook zit er in beide meting een absoluut temperatuursverschil tussen de twee sensoren, waarbij de thermokoppel altijd hoger zit dan de fiber. Het is niet bekend waar dit gedrag vandaan komt. Het verschil aan het begin van de meting valt binnen de fout marges van beide systemen.

#### 4.5.3. Conclusie

Het fiber optische systeem en het thermokoppel systeem verwarmen en koelen even sterk, alleen loopt het fiber optische systeem wel achter in de tijd op de thermokoppel. Daarnaast is er ook nog een klein absoluut temperatuursverschil, dit kan worden gecompenseerd en is dus geen probleem. Het achterlopen was niet verwacht en zal extra rekening mee moeten worden gehouden.

## 5. Fantoom

Voor het onderzoek wordt een fantoom gemaakt. Een fantoom bootst het lichaam van een patiënt na qua warmte capaciteit en RF gevoeligheid. In dit hoofdstuk wordt beschreven hoe het fantoom tot stand is gekomen en hoe het er uit ziet.

### 5.1. Ontwerpeisen

In het vooronderzoek is gekeken naar de invloed van katheters op de meting omdat deze in het fantoom gebruikt moeten worden. Daarnaast zijn er nog een aantal eisen waar het fantoom aan moet voldoen.

De eisen zijn de volgende:

- Geschikt voor 70MHz & 434MHz toepassingen .
- Meerdere oriëntaties van thermokoppels t.o.v. het veld kunnen accommoderen.
- Genoeg ruimte om ferriet kralen te plaatsen.
- Geschikt voor thermokoppelsensoren en fiber optische sensoren.
- Bruikbaar bij klinische vermogens(600Watt of hoger).
- Een vorm die optimaal op het antenne oppervlak aansluit.
- Fantoom moet verplaatsbaar zijn.

### 5.2. Oplossingen

Om het fantoom geschikt te maken voor 70 MHz en 434 MHz toepassingen worden er zowel langs het oppervlak als diep in het fantoom katheters geplaatst. De katheters worden in verschillende richtingen door het fantoom geplaatst om zo meerdere oriëntaties t.o.v. het veld te kunnen meten.

Voor de oriëntaties van de katheter zijn twee ideeën geopperd. Het eerste idee was om clusters van 7 katheters op verschillende plaatsen in het fantoom plaatsen, dit om zoveel mogelijk informatie in een zo'n klein mogelijk volume te halen. Het tweede idee was om steeds 2 katheters naast elkaar te plaatsen om zo min mogelijk het veld te verstoren. Uiteindelijk is er voor het tweede idee gekozen.

De thermokoppels zijn zo lang dat er altijd een stuk probe buiten het fantoom hangt waar de ferriet kralen om heen kunnen.

De katheters die worden gebruikt zijn allemaal hetzelfde en groot genoeg voor beide sensoren. De thermokoppel probes hebben een kleinere diameter dus wordt er wel nog een vulstof gebruikt.

Het fantoom moet groot genoeg zijn en gevuld om bruikbaar te zijn bij hoge vermogens bij 70 MHz. Het fantoom kan worden gevuld met superstuff of met behangplaksel. Superstuff ligt dichterbij spierweefsel qua eigenschappen dan behangplaksel alleen is het veel moeilijker om netjes consistent gemengd te krijgen. Er is daarom uiteindelijk gekozen voor behangplaksel.

De 70MHz golfpijp antennes hebben een afmeting van 26 cm lang en 40 cm breed. De volledige breedte hoeft niet te worden benut maar de lengte wel vanwege de effectieve oppervlakte van de golf.

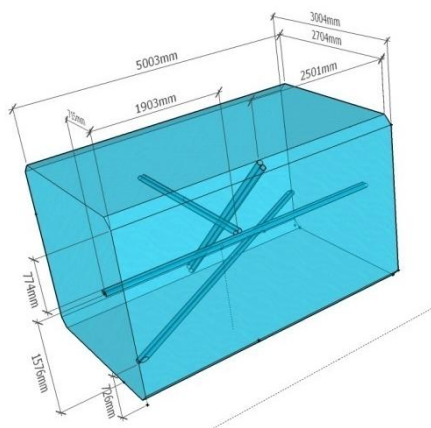
Het fantoom kan redelijk zwaar worden als het gevuld wordt met behangplaksel, daarom kan het worden verplaatst op een karretje.

### 5.3. Uiteindelijke ontwerp

De vorm van het fantoom is gebaseerd op een waterfantoom dat ook gebruikt is voor de 70 MHz opstelling. Dit fantoom is in de vorm van een kubus met afgesneden hoeken.

De maat zou in eerste instantie 30x30x30cm zijn vanwege het in alle richtingen symmetrisch kunnen roteren, maar dan balanceert het fantoom op de waterbolus waar het oppervlak niet sterk genoeg voor is. Het fantoom wordt daarom 50x30x30cm zodat het fantoom op de verstevigde rand kan staan op twee kunststof blokken om de waterbolus dikte te kunnen accommoderen. Helaas is hierdoor minder rotatie

In Figuur 5-1 is een tekening te zien van het fantoom gemaakt in Google SketchUp, een 3D tekenpakket.



**Figuur 5-1 Een Google sketchup ontwerp van het fantoom**

In Figuur 5-1 zijn ook een aantal katheters getekend die in het fantoom komen, maar niet allemaal. In Figuur 5-2 is een foto te zien van het uiteindelijke fantoom met alle katheters. Rechts boven in zit de vuldop, het fantoom is op de foto nog niet gevuld.



**Figuur 5-2 Het uiteindelijke fantoom**

## 6. Meetplannen

In dit hoofdstuk zijn alle voorbereiding en handelwijzen voor de metingen van het onderzoek opgenomen. De resultaten zijn opgenomen in het volgende hoofdstuk.

### 6.1. *Artefact meting*

De storing die optreedt bij een meting met 70MHz wordt geanalyseerd. Hoeveel °C gaat de meting omhoog of omlaag door EMI? Treedt er ook verwarming op in de thermokoppel? Er is onbekend hoe groot de afwijking is of kan zijn. Deze meting heeft als doel de fout te achterhalen.

Er is in het vooronderzoek al gebleken dat de storing kleiner is loodrecht op het E-veld, de storing zal in die richting minder groot zijn is de verwachting.

#### 6.1.1. **Meetplan**

Deze meting is zo bedacht dat hij herhaald kan worden voor meer resultaten. Er wordt gebruikt gemaakt van twee fibers en twee thermokoppels. Eén set wordt gebruikt voor de richting loodrecht op het E-veld en de andere voor evenwijdig aan het E-veld. Er wordt gemeten op 7,5 cm onder het oppervlak van het fantoom.

Het vermogen zal tijdens de metingen stapsgewijs worden verhoogd beginnende bij 100 Watt naar 200Watt en daarna 400Watt. Het vermogen is ongeveer 30 seconden per puls. Er wordt één antenne gebruikt bij deze metingen dus de fase heeft geen invloed. De katheters zijn gevuld met glycerol.

### 6.2. *Invloed van ferriet kralen*

Naar verwachting zullen ferriet kralen storingen onderdrukken in de thermokoppel zoals beschreven in hoofdstuk 3.2.1. en hierdoor bijdragen aan een kleinere fout. Er zijn twee onderdelen bij deze meting. Het eerste onderdeel is kijken naar een vergelijking tussen geen ferriet kralen en wel ferriet kralen. Wat voor effecten hebben de ferriet kralen? Het tweede deel bij deze meting wordt een vergelijking gemaakt tussen 0, 7, 14 en 21 ferriet kralen om een thermokoppel om te bepalen wat de meest gunstige hoeveelheid is.

#### 6.2.1. **Meetplan**

Deze meting wordt alleen uitgevoerd in de richting evenwijdig op het E-veld omdat dan de grootste invloeden meetbaar zijn. De verwachting is dat door het plaatsen van een aantal ferriet kralen de RF geïnduceerde verwarming zal afnemen omdat de stroomstromen onderdrukt worden.

Eerst wordt er een meting gedaan met twee thermokoppel probes, waarvan eentje met 7 ferriet kralen en eentje zonder. Daarna wordt er een serie metingen gedaan: zonder ferriet kralen, met 7, met 14 en met 21. Er wordt gemeten bij een vermogen van 300Watt met één antenne op 7,5 cm diep. De metingen bestaan uit een aantal pulsen van ca.30 seconden.

### 6.3. *Meting van precisie.*

Bij deze meting wordt de precisie en herhaalbaarheid bepaald.

**Eisen:**

- Een herhaalbare meting met een vaste beginsituatie en vast meetverloop.
- Een referentie voor de absolute temperatuur tijdens power off. (Losse thermokoppel meter)
- Een referentie voor de stabiliteit tijdens de meting. (Fiber optische)

**Uitvoering:**

De verwachting bij deze meting is +/- 0.2°C voor het fiber optische systeem en het thermokoppel systeem. Voor de fiber is deze waarde gegeven door de fabrikant, zie bijlage B Figuur 11-1, en voor de thermokoppel is dit de standaard (J. J. W. Lagendijk, G. C. Van Rhooen, S. N. Hornsleth, P. Wust, A. C. C. De Leeuw, C. J. Schneider, J. D. P. Van Ddk, J. Van Der Zee, R. Van Heek-Romanowski, S. A. Rahman, C. Gromoll, 1998) waar het systeem aan voldoet.

Meerdere malen moet de zelfde meting worden herhaald om de standaardafwijking te kunnen bepalen en de juistheid te kunnen achterhalen. Daarnaast wordt ook de precisie weergegeven door meerdere metingen te vergelijken.

Er wordt gemeten een thermokoppel, een fiber en de Ellab DM 852 thermometer (data sheet: Bijlage B Figuur 11-2). Er wordt in het midden van het fantoom gemeten in meerdere richtingen. De katheters zitten ongeveer 3mm uit elkaar en het is dus mogelijk dat het niet overal de zelfde temperatuur is. Om dit te controleren wordt de DM 852 gebruikt om te meten of het absolute temperatuurverschil daadwerkelijk aanwezig is

Metingen bestaan uit 9 á 10 minuten verwarmen met 25 seconden vermogen aan en 5 seconden vermogen uit met 1 antenne en 200 Watt vermogen. Er is gemeten op 1.5cm diep vanaf het oppervlak.

De zelfde meting zal ook gedaan worden bij 600 Watt omdat dit een klinisch relevanter vermogen is. Naar verwachting zal de verwarming minder zijn omdat er op 7.5 cm zal worden gemeten en dit gunstig zal uitpakken voor de trage Fiber maar niet voor de TCM die waarschijnlijk een grotere afwijking zal krijgen door het hogere vermogen.

**Mogelijkheden:**

De verschillende vormen die de resultaten aan kunnen nemen zijn als volgt:

- iedere waarde heeft een grote mate van juistheid en ook precies;
- individuele waarden zijn niet precies door een grote toevallige fout, het gemiddelde van een aantal waarden is wel juist;
- de waarden zijn precies, maar door een systematische fout niet juist;
- individuele waarden zijn niet precies door een toevallige fout, het gemiddelde van een aantal waarden is ook niet juist, want er is ook nog een systematische fout.

#### 6.4. *Decay meting bij 600 watt*

Deze meting heeft twee delen. Het eerste deel is meting van steeds één puls, met elke puls een hoger vermogen beginnende bij 100Watt en door tot 600Watt. Op deze manier wordt de RF geïnduceerde verwarming zichtbaar gemaakt en wanneer deze daadwerkelijk invloed heeft op de meting.

Het tweede deel is een meting van een aantal pulsen van 600Watt om de decay van de temperatuur te analyseren en te kijken naar hoe groot de fout is t.o.v. de referentie.

Van de RF geïnduceerde verwarming bij deze meting wordt er gekeken naar hoe groot de fout is drie seconden na het uitzetten van het vermogen. Het is wel zo dat een patiënt doorbloed is en het fantoom niet, dit houdt in dat het fantoom minder snel warmte kwijt kan aan de omgeving en dus de gemeten fout naar verwachting groter is dan bij een patiënt.

#### 6.5. *434MHz meting*

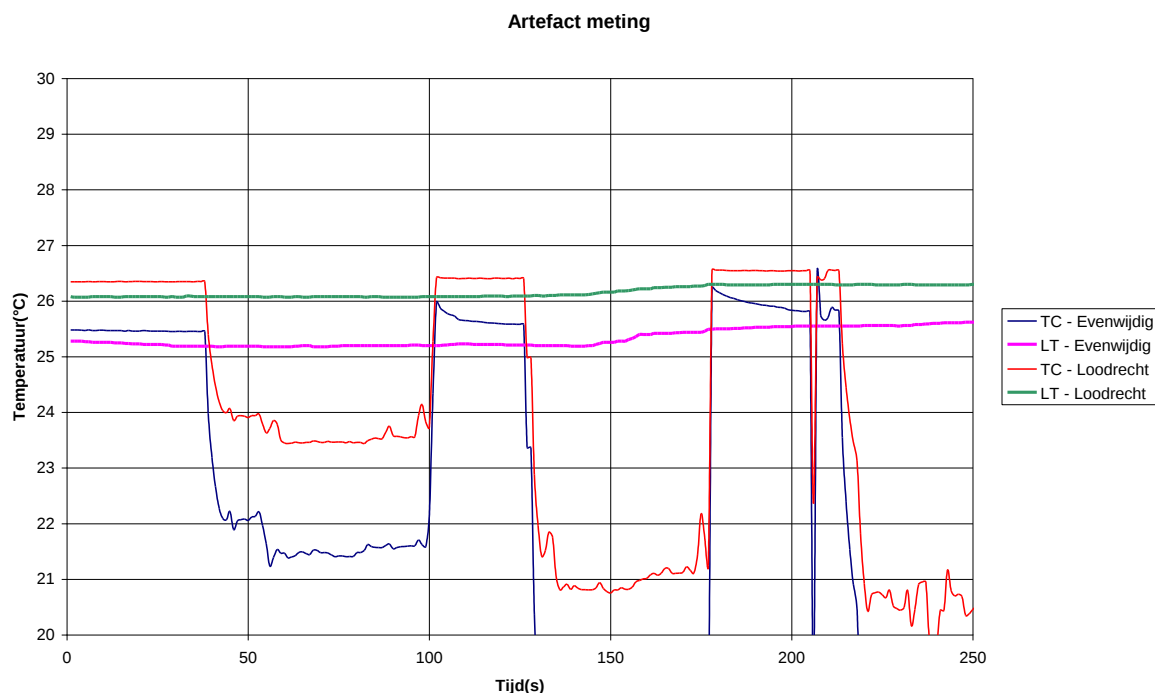
Met de 434MHz opstelling wordt ook nog een decay meting gedaan. Deze is om de fout die er optreedt bij deze frequentie te analyseren. Er wordt zowel loodrecht op het veld als evenwijdig aan het veld een meting gedaan. Beide metingen bestaan uit één puls met een vermogen van 200Watt. Naar verwachting is de RF geïnduceerde verwarming in de richting loodrecht op het E-veld verwaarloosbaar klein zoals in het vooronderzoek ook is gebleken.

## 7. Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven en tussentijdse conclusies getrokken.

### 7.1. Resultaten artefact metingen

Uit de resultaten van de twee richtingen zijn de twee referenties gehaald en het meetpunt van de thermokoppel waarmee ze waren uitgelijnd. Deze vier zijn allemaal in één grafiek in Figuur 7-1 weergegeven. Er is in de twee richtingen uiteindelijk gemeten bij 100, 200 en 400 Watt, tijdens de meting is de temperatuur binnen  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  constant gebleven. Er is gemeten op een diepte van 7.5cm vanaf het oppervlak van het fantoom.



**Figuur 7-1. Artefact meting**

Er is in Figuur 7-1 te zien dat er verschil is tussen loodrecht op het veld en evenwijdig aan het veld. Zo heeft de blauwe lijn, evenwijdig aan het E-veld, last van een zichtbare RF geïnduceerde verwarming na het uitzetten van het vermogen. Dit is te zien aan de e-macht die optreedt direct na het uitzetten van het vermogen. Deze e-macht is niet aanwezig in de rode lijn welke de loodrechte richting vertegenwoordigt.

**Tabel 7-1. maximale RF verstoring in beide richtingen**

| Vermogen (Watt) | $\pm$ Storing evenwijdig ( $^\circ\text{C}$ ) | $\pm$ Storing loodrecht ( $^\circ\text{C}$ ) |
|-----------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 100             | 2,0                                           | 1,5                                          |
| 200             | 4,0                                           | 3,0                                          |
| 400             | 16,0                                          | 5,5                                          |

In Tabel 7-1 zijn de grootste waargenomen fouten van de RF weergegeven in beide richtingen. De storing neemt met een factor twee toe per 100 watt. Er is ook geconstateerd dat er RF geïnduceerde verwarming optreedt bij de thermokoppels. In de loodrechte richting is deze verwaarloosbaar klein maar in de evenwijdige richting niet.

**Tabel 7-2. RF geïnduceerde verwarming van de thermokoppels in de evenwijdige richting**

| Vermogen (Watt) | RF geïnduceerde verwarming op<br>$t=0$ (°C) | Tijd tot $3 \tau$ (s) |
|-----------------|---------------------------------------------|-----------------------|
| 100             | 0,15                                        | 15                    |
| 200             | 0,4                                         | 15                    |
| 400             | 0,45                                        | 15                    |

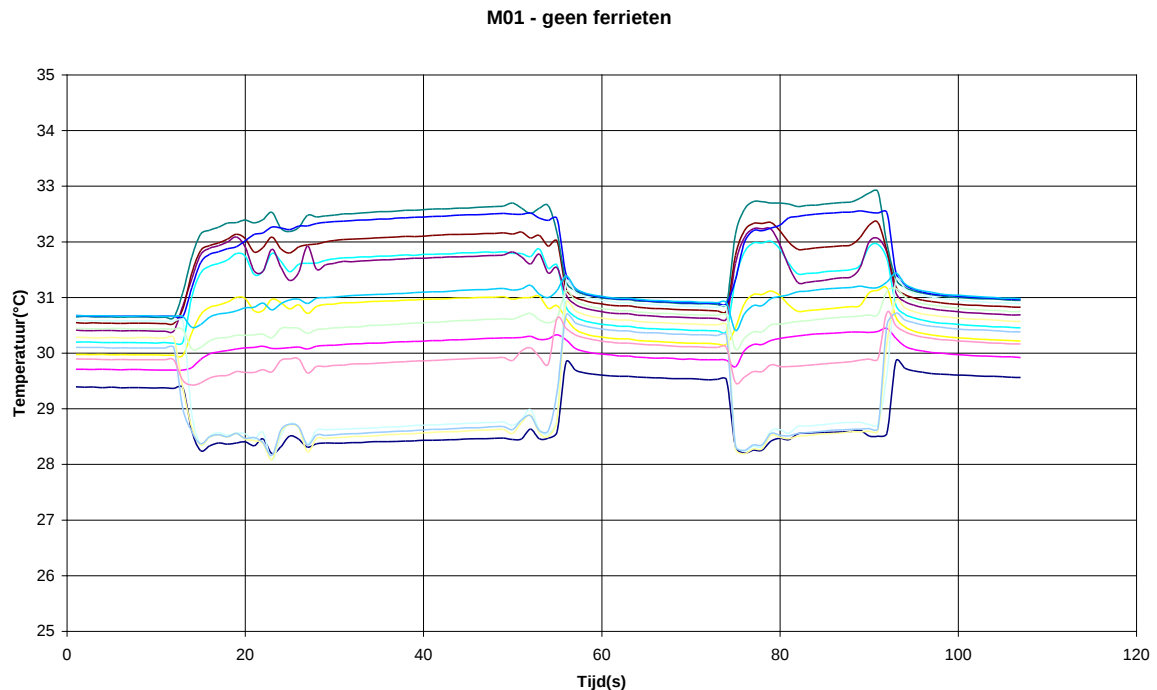
De RF geïnduceerde verwarming is weergegeven in Tabel 7-2 bij dezelfde vermogens als hiervoor. Ook is er gekeken naar hoelang ongeveer drie keer de  $\tau$  tijd is. Dit is een constante waarde voor verschillende vermogens. Er is ook te zien dat er een verschil van 0,25°C zit tussen 100 Watt en 200 Watt en daarna 0,05°C. Er is onbekend waar dit verschil uit voortkomt.

#### 7.1.1. Conclusie: Artefact meting

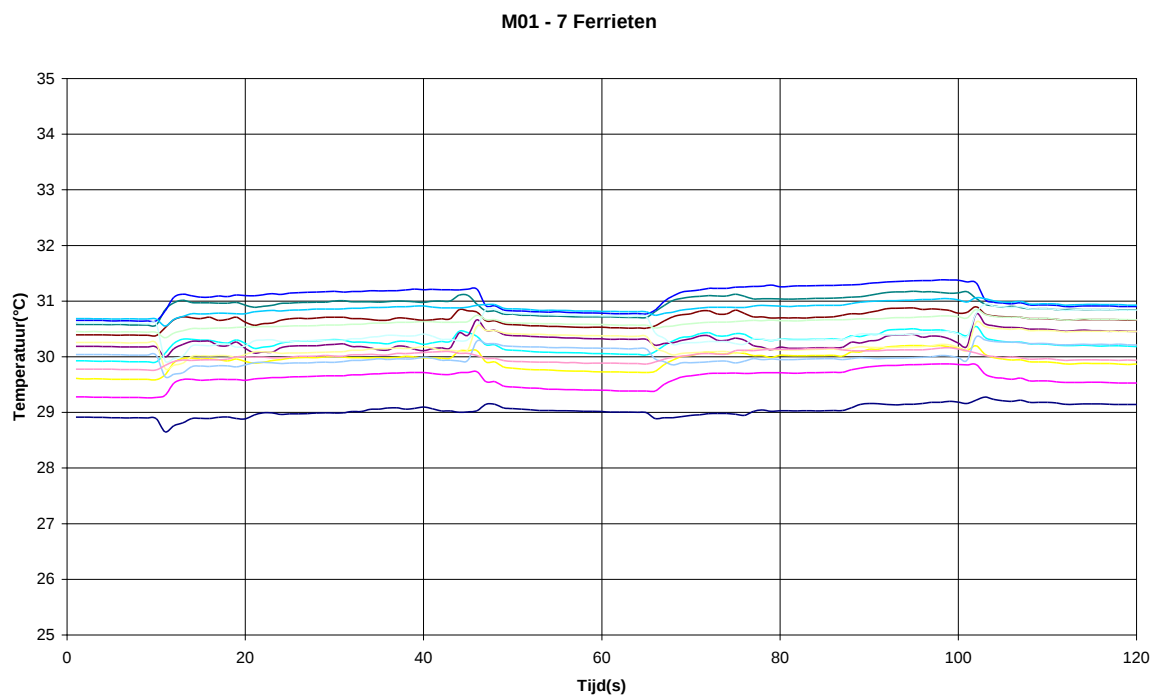
Uit deze metingen blijkt dat naar verwachting de richting van de probe ten opzichte van het veld invloed heeft. Het scheelt bij een vermogen van 400Watt 10.5°C in de storing als het vermogen aanstaat. Ook treedt er RF geïnduceerde verwarming op, maar alleen evenwijdig aan het E-veld. Deze is bij een vermogen van 400Watt 0.45°C en heeft in het fantoom een  $\tau$ -tijd van ongeveer 15 seconden.

## 7.2. Resultaten voor de invloed van ferriet kralen.

Van de resultaten zijn hier onder twee grafieken weergegeven, Figuur 7-2 & Figuur 7-3, met resultaten voor één dezelfde thermokoppel probes eenmaal zonder ferriet kralen en eenmaal met 7 ferriet kralen.



**Figuur 7-2. De meting van M01 zonder Ferriet kralen.**

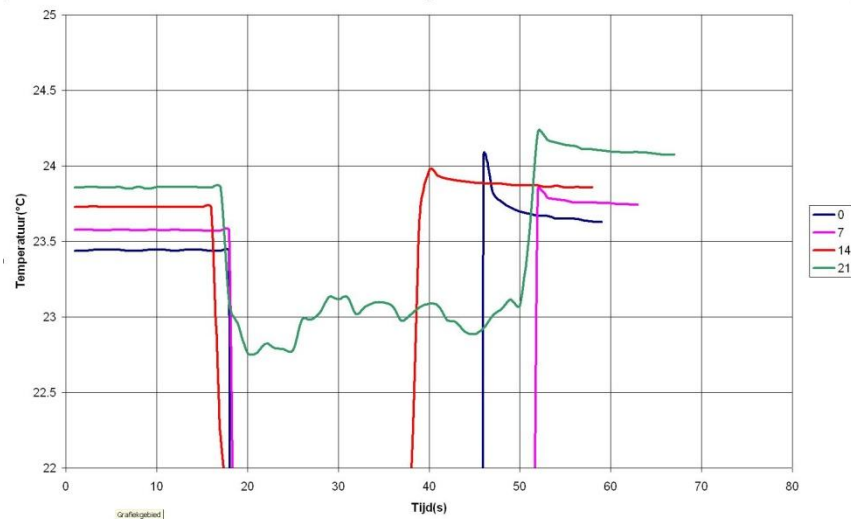


**Figuur 7-3. De meting van M01 met 7 Ferriet kralen.**

Er is een verschil te zien tussen met en zonder ferriet kralen. De storing is met ca. een factor twee verminderd en de RF geïnduceerde verwarming is verwaarloosbaar klein

geworden. De RF geïnduceerde verwarming gaat van  $0.5 \pm 0.2$  °C naar  $0.1 \pm 0.2$  °C. Op deze manier kan de fout door RF geïnduceerde verwarming zo klein mogelijk worden gehouden. Uit meerdere metingen met verschillende probes blijkt dat het per probe verschilt hoeveel last deze heeft van RF geïnduceerde verwarming. Hierover meer in Tabel 7-4.

Er is bepaald hoeveel ferriet kralen nog een merkbare invloed hebben op de onderdrukking van de RF geïnduceerde verwarming.



**Figuur 7-4. metingen waarbij steeds 7 ferriet kralen meer zijn toegevoegd.**

In Figuur 7-4 is weergegeven wat er gebeurt als er meer ferriet kralen om de thermokoppel worden gedaan. De bijbehorende waardes zijn hier onder weergegeven in Tabel 7-3.

**Tabel 7-3. Waarden behorende bij de meting in Figuur 7-4.**

| Ferriet kralen (-) | RF geïnduceerde verwarming (°C) | Storing (°C) |
|--------------------|---------------------------------|--------------|
| -                  | $\pm 0.1$ °C                    | $\pm 0.5$ °C |
| 0                  | 0,4                             | -25          |
| 7                  | 0,1                             | -7           |
| 14                 | 0,1                             | -3           |
| 21                 | 0,2                             | -2           |

Het is zo dat 7 of 14 ferriet kralen ideaal zijn, hier is de storingopwarming het laagste. Bij 21 is de RF geïnduceerde verwarming zelfs toe is genomen. De storing die zichtbaar is tijdens het vermogen aan neemt ook af door ferriet kralen te plaatsen maar dit is verder niet relevant voor de behandelingen maar wel opmerkelijk.

Er is van een aantal probes in kaart gebracht welke storingen er optreden en in welke mate. De storingen zijn voor elke probe anders. Er zijn hier ook 2 sensoren uit de kliniek meegenomen, Tc 2301 en Tc 588 in Tabel 7-4. De rest van de probes in de lijst zijn dezelfde probes als gebruikt voor metingen. De figuren hierbij staan in de bijlage.

**Tabel 7-4. Storingsinvloed op verschillende thermokoppel probes**

| TC #   | RF geïnduceerde verwarming | RF storing +/- |
|--------|----------------------------|----------------|
| -      | (°C) +/- 0.05              | (°C) +/- 0.5   |
| M01    | 0,5                        | 2,0            |
| M03    | 0,0                        | 10             |
| M04    | 0,0                        | 15             |
| Tc2301 | 0,1                        | 2,0            |
| Tc885  | 0,0                        | 3,0            |

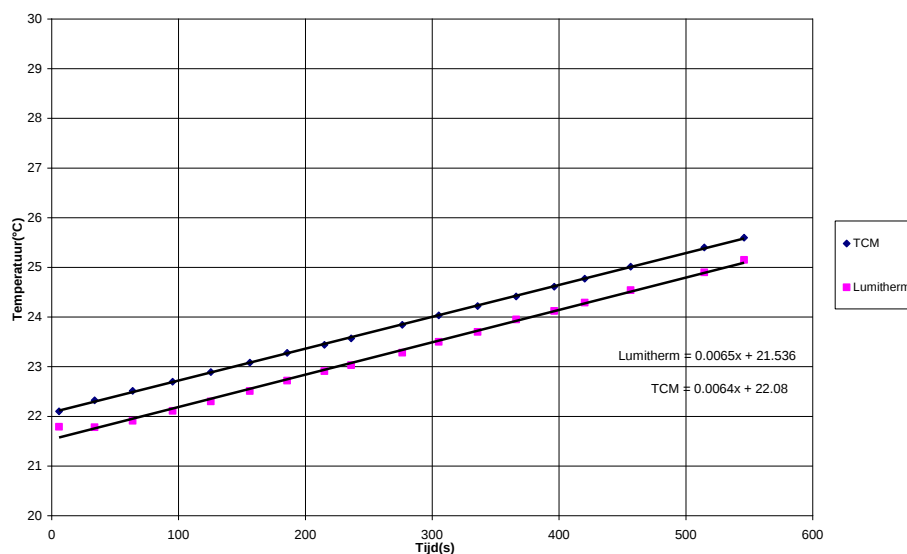
De twee klinische probes pikken minder storing op tijdens dat het vermogen aan is. Dit zou kunnen komen door een kortere kabellengte dan de M probes. De lage RF geïnduceerde verwarming bij deze lage vermogens is zeer gunstig.

### 7.2.1. Conclusie: Invloed van Ferriet kralen.

Het gebruik van ferriet kralen kan storingen onderdrukken. Met ferriet kralen is dus altijd beter. Het enige nadelige is dat de kralen zelf opwarmen. Er zou kunnen worden gekeken naar andere ferriet kralen waar de verlies factor lager is bij deze frequentie om dit te verhelpen. Ook vermindert de RF geïnduceerde verwarming door het gebruik van ferriet kralen zoals verwacht werd.

## 7.3. Resultaten meting van precisie

De figuren van de metingen zijn te vinden in bijlage A. In Figuur 7-5 staat een figuur van één van de metingen weergegeven om een beeld te geven hoe ze er uit zien. De overige figuren staan in de bijlage opgenomen.



**Figuur 7-5. Voorbeeld tijd, temperatuur -diagram bij de metingen.**

Hieronder staan de resultaten van de respectievelijke metingen. De door Excel gemaakte trendlijn is vermeld en de berekende standaard deviatie en ook deze maal drie wat de onnauwkeurigheid is.

**Tabel 7-5. Standaardafwijking TCM bij 200 Watt.**

| Meting #   | $\sigma$ (°C) | $3 \times \sigma$ (°C) | Trendlijn          |
|------------|---------------|------------------------|--------------------|
| 1          | 0,041         | 0,123                  | $0,0072x + 21,8$   |
| 2          | 0,016         | 0,047                  | $0,0064x + 22,08$  |
| 3          | 0,022         | 0,066                  | $0,0066x + 22,02$  |
| 4          | 0,011         | 0,034                  | $0,0069x + 22,219$ |
| Gemiddelde | 0,022         | 0,067                  | -                  |

**Tabel 7-6. Standaardafwijking fiber bij 200Watt.**

| Meting #   | $\sigma$ (°C) | $3 \times \sigma$ (°C) | Trendlijn          |
|------------|---------------|------------------------|--------------------|
| 1          | 0,116         | 0,348                  | $0,0072x + 21,34$  |
| 2          | 0,066         | 0,197                  | $0,0065x + 21,54$  |
| 3          | 0,067         | 0,202                  | $0,0067x + 21,501$ |
| 4          | 0,094         | 0,283                  | $0,0068x + 21,783$ |
| Gemiddelde | 0,086         | 0,258                  | -                  |

De metingen vonden plaats tussen 20 en 30 graden. Volgens de datasheet van het fiber optische systeem, te vinden in bijlage B, staat dat de nauwkeurigheid +/- 0,25 °C is bij dat bereik.

Deze metingen zijn gedaan bij 200Watt vermogen, bij een behandeling is vaak een hoger vermogen gebruikelijk. Hier worden ook metingen mee gedaan. Er worden 2 antennes gebruikt met bij een vermogen van 600Watt en de probes bevinden zich 7,5cm onder het oppervlak omdat 1,5cm niet klinisch relevant is bij 70MHz op deze vermogens.

### 7.3.1. 600 Watt.

De resultaten van de meting bij 600Watt met twee antennes staan hieronder. Deze zijn gemeten op 7,5 cm diep i.p.v. 1,5 cm diep. De totale verwarming is daarom maar ongeveer 1° in 10 minuten vergeleken met bijna 5° op 1,5 cm diep.

**Tabel 7-7. Standaardafwijking TCM bij 600Watt.**

| Meting #   | $\sigma$ (°C) | $3 \times \sigma$ (°C) |
|------------|---------------|------------------------|
| 1          | 0,044         | 0,131                  |
| 2          | 0,031         | 0,094                  |
| 3          | 0,084         | 0,251                  |
| Gemiddelde | 0,053         | 0,158                  |

**Tabel 7-8. Standaardafwijking fiber bij 600Watt.**

| Meting #   | $\sigma$ (°C) | $3 \times \sigma$ (°C) |
|------------|---------------|------------------------|
| 1          | 0,056         | 0,168                  |
| 2          | 0,049         | 0,148                  |
| 3          | 0,059         | 0,177                  |
| Gemiddelde | 0,055         | 0,165                  |

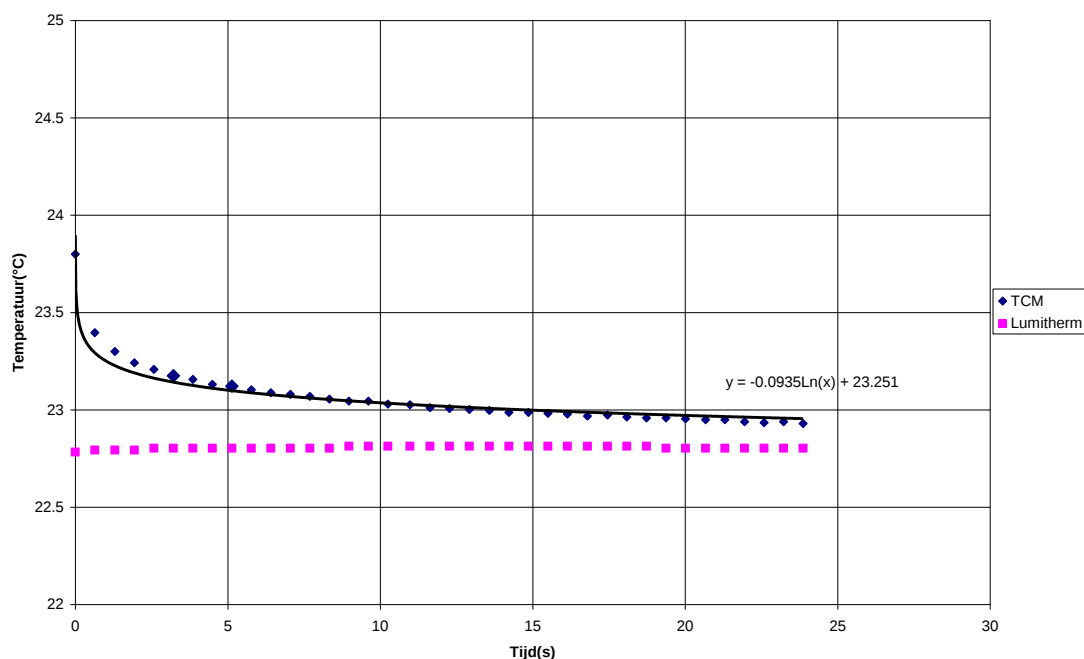
De TCM scoort dit maal twee keer zo hoog als bij de meting met 200Watt. De Fiber daar in tegen doet het beter. Tijdens deze 600Watt metingen hadden de TCM sensoren last van RF geïnduceerde verwarming wat niet voorkwam bij 200Watt. Bij de volgende meting wordt hier verder op in gegaan.

### 7.3.2. Conclusie: Meting van precisie

Bij 200 Watt halen de TCM en de Fiber respectievelijk een waarde van 0,067°C en 0,258°C voor 3 maal de standaardafwijking. Bij 600Watt zijn deze 0,158°C en 0,165°C. Bij 600 Watt op 7,5 cm diep is de totale verwarming afgenomen van ongeveer 5°C tot 1°C, dit is gunstig omdat de traagheid minder invloed heeft waardoor de fiber beter presteert. De invloed van de storing op de TCM bij 600 Watt is groter waardoor de precisie af is genomen t.o.v. een vermogen van 200Watt.

### 7.4. Resultaten decay meting

In Figuur 7-6 staat het gemeten temperatuursverval in de z-richting waar geen ferriet kralen zijn gebruikt weergegeven. De blauwe punten geven de thermokoppel weer en de roze lijn is de fiber optische sensor. Deze meting is in de meest ongunstige richting en zal dus een grotere fout hebben naar verwachting dan in de x-richting



**Figuur 7-6. Temperatuursverloop z-as zonder ferriet kralen**

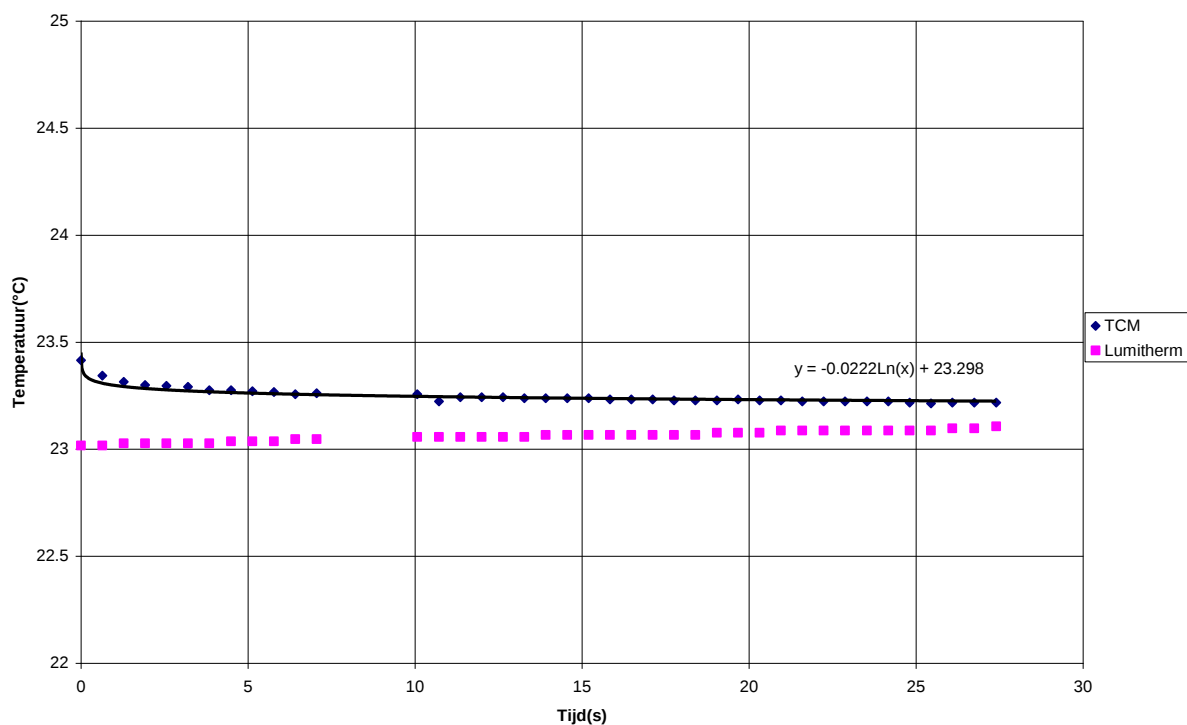
In Tabel 7-9 staan de eerste vijf seconden van de decay die weergegeven staat in het figuur hierboven.

**Tabel 7-9. Meting zonder ferriet kralen in de z-richting**

| Tijd (s) | Temperatuur (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
|----------|------------------|-----------------------|----------|
|          |                  | ±0,25                 | ±0,25    |
| 0,001    | 23,8             | 22,783                | 1,017    |
| 0,64     | 23,396           | 22,793                | 0,603    |
| 1,295    | 23,3             | 22,793                | 0,507    |
| 1,934    | 23,242           | 22,793                | 0,449    |
| 2,575    | 23,208           | 22,803                | 0,405    |
| 3,214    | 23,175           | 22,803                | 0,372    |
| 3,855    | 23,156           | 22,803                | 0,353    |
| 4,494    | 23,131           | 22,803                | 0,328    |
| 5,133    | 23,122           | 22,803                | 0,319    |

De waardes bij 3 en 5 seconden zijn weergegeven met een grotere ruit. Na 3,2 seconden is de gemeten fout respectievelijk +0,372°C. Dit is t.o.v. de fiber optische sensor die als referentie wordt gebruikt.

In Figuur 7-7 staat het gemeten temperatuursverval in de z-richting waarbij wel ferriet kralen zijn gebruikt weergegeven. De blauwe punten geven de thermokoppel weer en de roze lijn is de fiber optische sensor.



**Figuur 7-7. Temperatuursverloop z-as met ferriet kralen**

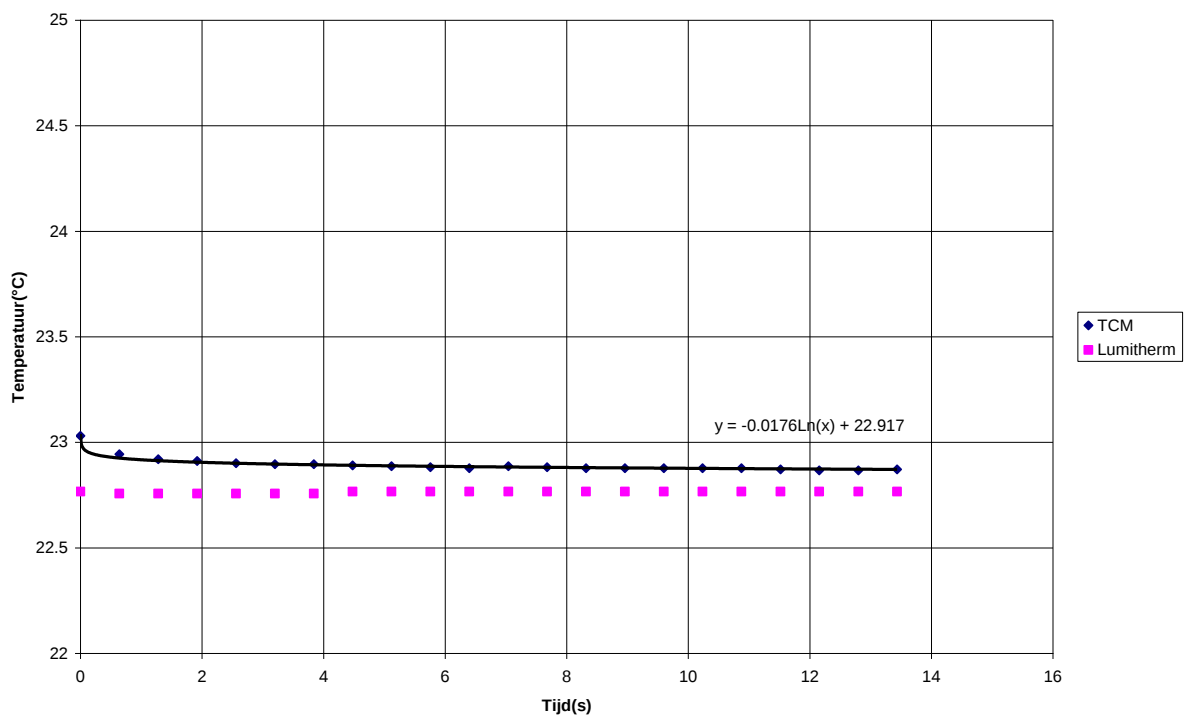
In Tabel 7-10 staan de eerste vijf seconden van de decay die weergegeven staat in het figuur hierboven.

**Tabel 7-10. Meting met ferriet kralen in de z-richting**

| Tijd (s) | Temperatuur (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
|----------|------------------|-----------------------|----------|
|          |                  | ±0,25                 | ±0,25    |
| 0,001    | 23,416           | 23,017                | 0,399    |
| 0,638    | 23,344           | 23,017                | 0,327    |
| 1,279    | 23,315           | 23,027                | 0,288    |
| 1,918    | 23,3             | 23,027                | 0,273    |
| 2,559    | 23,296           | 23,027                | 0,269    |
| 3,2      | 23,291           | 23,027                | 0,264    |
| 3,84     | 23,276           | 23,027                | 0,249    |
| 4,494    | 23,276           | 23,037                | 0,239    |
| 5,133    | 23,271           | 23,037                | 0,234    |

Na 3,2 seconden is de fout die is gemeten t.o.v. de referentie +0,269°C. Vergelijken met de vorige meting is de fout 0,1°C kleiner geworden.

In Figuur 7-8 staat het temperatuursverloop weergegeven van de meting in de x-as zonder ferriet kralen.



**Figuur 7-8. Temperatuursverloop x-as zonder ferriet kralen**

In Tabel 7-11 staan de eerste vijf seconden van de decay die weergegeven staat in het figuur hierboven.

**Tabel 7-11. Meting in de x-richting**

| Tijd (s) | Temperatuur (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout  |
|----------|------------------|-----------------------|-------|
|          |                  | ±0,25                 | ±0,25 |
| 0,001    | 23,031           | 22,767                | 0,264 |
| 0,639    | 22,944           | 22,757                | 0,187 |
| 1,279    | 22,92            | 22,757                | 0,163 |
| 1,919    | 22,911           | 22,757                | 0,154 |
| 2,56     | 22,901           | 22,757                | 0,144 |
| 3,2      | 22,896           | 22,757                | 0,139 |
| 3,841    | 22,896           | 22,757                | 0,139 |
| 4,478    | 22,891           | 22,767                | 0,124 |
| 5,118    | 22,887           | 22,767                | 0,12  |

Na 3.2 seconden is de fout nog +0.139°C die gemeten wordt. Dit is zoals verwacht lager dan in de z-richting. De fout is ongeveer 2.5 keer zo klein als in de z-richting zonder ferriet kralen.

#### 7.4.1. Phase sweep

Er is in eerste instantie geen rekening gehouden met de fase van de twee signalen. Deze storing is gemeten bij verschillende faseverschillen. De resultaten van het volledige fase bereik zijn weergegeven in een aantal tabellen, Tabel 7-14 t/m 7-19.

**Tabel 7-13. Faseverschil -90°**

| Tijd(s) | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
|---------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| 0,001   | 25,826                | 25,25                | 25,455                | 0,371    |
| 0,641   | 25,768                | 25,25                | 25,455                | 0,313    |
| 1,281   | 25,73                 | 25,26                | 25,465                | 0,265    |
| 1,921   | 25,706                | 25,26                | 25,465                | 0,241    |
| 2,562   | 25,687                | 25,26                | 25,465                | 0,222    |
| 3,201   | 25,668                | 25,26                | 25,465                | 0,203    |
| 3,84    | 25,654                | 25,26                | 25,465                | 0,189    |
| 4,48    | 25,639                | 25,26                | 25,465                | 0,174    |
| 5,12    | 25,63                 | 25,26                | 25,465                | 0,165    |

**Tabel 7-12. Faseverschil: -60°**

| Tijd(s) | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
|---------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| 0,001   | 25,553                | 24,92                | 25,128                | 0,425    |
| 0,641   | 25,496                | 24,92                | 25,128                | 0,368    |
| 1,281   | 25,453                | 24,92                | 25,128                | 0,325    |
| 1,921   | 25,424                | 24,94                | 25,148                | 0,276    |
| 2,56    | 25,396                | 24,94                | 25,148                | 0,248    |
| 3,2     | 25,381                | 24,95                | 25,158                | 0,223    |
| 3,84    | 25,362                | 24,95                | 25,158                | 0,204    |
| 4,48    | 25,348                | 24,95                | 25,158                | 0,19     |
| 5,121   | 25,338                | 24,96                | 25,168                | 0,17     |

**Tabel 7-15. Faseverschil: -30°**

| Tijd(s) | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
|---------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| 0,001   | 25,497                | 24,96                | 24,961                | 0,536    |
| 0,641   | 25,411                | 24,96                | 24,961                | 0,45     |
| 1,282   | 25,373                | 24,96                | 24,961                | 0,412    |
| 1,922   | 25,335                | 24,97                | 24,971                | 0,364    |
| 2,576   | 25,311                | 24,97                | 24,971                | 0,34     |
| 3,216   | 25,287                | 24,97                | 24,971                | 0,316    |
| 3,856   | 25,268                | 24,98                | 24,981                | 0,287    |
| 4,496   | 25,249                | 24,98                | 24,981                | 0,268    |
| 5,137   | 25,239                | 24,98                | 24,981                | 0,258    |

**Tabel 7-14. Faseverschil: 0°**

| Tijd(s) | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
|---------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| 0.01    | 24.815                | 23.88                | 24.188                | 0.627    |
| 0.649   | 24.724                | 23.88                | 24.188                | 0.536    |
| 1.29    | 24.667                | 23.9                 | 24.208                | 0.459    |
| 1.931   | 24.633                | 23.9                 | 24.208                | 0.425    |
| 2.571   | 24.6                  | 23.9                 | 24.208                | 0.392    |
| 3.226   | 24.571                | 23.91                | 24.218                | 0.353    |
| 3.864   | 24.552                | 23.91                | 24.218                | 0.334    |
| 4.505   | 24.533                | 23.93                | 24.238                | 0.295    |
| 5.145   | 24.519                | 23.93                | 24.238                | 0.281    |

| Tabel 7-16. Faseverschil: +30° |                       |                      |                       |          | Tabel 7-17. Faseverschil: +60° |                       |                      |                       |          |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| Tijd(s)                        | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) | Tijd(s)                        | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
| 0,001                          | 26,033                | 25,65                | 25,747                | 0,286    | 0,001                          | 26,115                | 25,66                | 25,767                | 0,348    |
| 0,642                          | 25,995                | 25,65                | 25,747                | 0,248    | 0,641                          | 26,044                | 25,67                | 25,777                | 0,267    |
| 1,282                          | 25,966                | 25,65                | 25,747                | 0,219    | 1,296                          | 26,01                 | 25,67                | 25,777                | 0,233    |
| 1,938                          | 25,947                | 25,65                | 25,747                | 0,2      | 1,934                          | 25,986                | 25,67                | 25,777                | 0,209    |
| 2,575                          | 25,923                | 25,65                | 25,747                | 0,176    | 2,575                          | 25,962                | 25,67                | 25,777                | 0,185    |
| 3,216                          | 25,909                | 25,65                | 25,747                | 0,162    | 3,216                          | 25,943                | 25,67                | 25,777                | 0,166    |
| 3,856                          | 25,89                 | 25,65                | 25,747                | 0,143    | 6,193                          | 25,929                | 25,67                | 25,777                | 0,152    |
| 4,497                          | 25,88                 | 25,65                | 25,747                | 0,133    | 6,845                          | 25,886                | 25,67                | 25,777                | 0,109    |
| 5,153                          | 25,871                | 25,65                | 25,747                | 0,124    | 7,486                          | 25,881                | 25,67                | 25,777                | 0,104    |

| Tabel 7-18. Faseverschil: +90° |                       |                      |                       |          |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------|
| Tijd(s)                        | T <sub>tcm</sub> (°C) | T <sub>lt</sub> (°C) | T <sub>ref</sub> (°C) | Fout(°C) |
| 0,001                          | 26,233                | 25,87                | 25,875                | 0,358    |
| 0,638                          | 26,123                | 25,87                | 25,875                | 0,248    |
| 1,279                          | 26,085                | 25,87                | 25,875                | 0,21     |
| 1,919                          | 26,056                | 25,87                | 25,875                | 0,181    |
| 2,559                          | 26,042                | 25,87                | 25,875                | 0,167    |
| 3,198                          | 26,018                | 25,87                | 25,875                | 0,143    |
| 3,838                          | 26,009                | 25,87                | 25,875                | 0,134    |
| 6,788                          | 25,994                | 25,87                | 25,875                | 0,119    |
| 7,438                          | 25,951                | 25,87                | 25,875                | 0,076    |

Bij een faseverschil van 0° graden wordt de grootste fout gemeten door de RF geïnduceerde verwarming. Hierbij bevindt de focus zich dus in het midden van het fantoom. Bij de meting van 7.4 in de z-richting zonder ferriet kralen werd 0,37°C gemeten als fout. Bij een faseverschil van 0° in de z-richting met een vermogen van 600Watt wordt er een fout van 0,35°C gemeten.

#### 7.4.2. Conclusie

De gemeten fouten na 3 seconden zijn: zonder ferriet kralen evenwijdig aan het veld 0,37°C +/- 0,25°C, met ferriet kralen evenwijdig aan het veld 0,26°C +/- 0,25°C, en zonder ferriet kralen loodrecht op het veld 0,139°C +/- 0,25°C.

Met ferriet kralen geeft in ieder geval een beter resultaat dan zonder ferriet kralen. Daarnaast zijn deze waarden niet direct toepasbaar op de kliniek vanwege het missen van doorbloeding, maar het beeld dat wordt geschetst dat ferriet kralen beter zijn is nog steeds van toepassing.

## 8. Conclusie en aanbevelingen

Uit de metingen is gekomen dat de storingen richtingsgevoelig zijn. Door bij behandeling de richting de thermokoppels slim te kiezen t.o.v. het veld kan de storing geminimaliseerd worden en zelfs verwaarloosbaar bij meting loodrecht op het E-veld.

Loodrecht op het E-veld zonder ferriet kralen kan een storing tot +/- 5,5°C optreden en evenwijdig aan het E-veld tot +/-16°C. Het gebruik van ferriet kralen dempt de storing met ca. een factor vijf.

De precisie van de thermokoppel ligt op +/- 0,17°C dit is onder de 0,2°C die wordt geëist van het systeem (J. J. W. Lagendijk, G. C. Van Rhoon, S. N. Hornsleth, P. Wust, A. C. C. De Leeuw, C. J. Schneider, J. D. P. Van Ddk, J. Van Der Zee, R. Van Heek-Romanowski, S. A. Rahman, C. Gromoll, 1998).

Bij fantoom metingen is het zo dat de RF geïnduceerde verwarming zonder ferriet kralen een fout van 0,37 +/- 0,25 °C kan opleveren. Met ferriet kralen kan dit worden verminderd tot 0,26 +/- 0,25°C. Het gebruik van ferriet kralen is dus beter.

De eindconclusie is dat het systeem voldoet aan de gestelde eisen, maar dat het systeem beter zou zijn door ferriet kralen te gebruiken bij de behandeling. Dit zou klinisch getest moeten worden, helaas waren er tijdens het onderzoek geen patiënten beschikbaar en is dit niet gedaan.

## 9. Bibliografie

*Antenna\_(radio)*. (2014, mei 15). Opgeroepen op mei 16, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna\\_\(radio\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Antenna_(radio))

*Antenne (straling)*. (2014, Januari 18). Opgeroepen op Maart 2014, van wikipedia.org:  
[http://nl.wikipedia.org/wiki/Antenne\\_\(straling\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Antenne_(straling))

*Characteristic impedance*. (2014, mei 15). Opgeroepen op mei 16, 2014, van wikipedia.org: [http://en.wikipedia.org/wiki/Characteristic\\_impedance](http://en.wikipedia.org/wiki/Characteristic_impedance)

*Dielectric heating*. (2014, mei 9). Opgeroepen op mei 15, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric\\_heating](http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_heating)

*Dipool*. (2013, maart 8). Opgeroepen op mei 2, 2014, van wikipedia.org:  
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Dipool>

*Dipoolmoment*. (2014, maart 10). Opgeroepen op mei 2, 2014, van wikipedia.org:  
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Dipoolmoment>

*Electrical reactance*. (2014, april 27). Opgeroepen op mei 15, 2014, van wikipedia:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Reactance\\_%28electronics%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Reactance_%28electronics%29)

*Elektromagnetische straling*. (2014, april 12). Opgeroepen op mei 2, 2014, van wikipedia.org: [http://nl.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische\\_straling](http://nl.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetische_straling)

*Ferriet*. (2014, Maart 6). Opgeroepen op April 2014, van Wikipedia.org:  
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Ferriet>

*Ferrimagnetisme*. (2013, Maart 10). Opgeroepen op Maart 2014, van Wikipedia.org:  
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Ferrimagnetisme>

*Ferrite bead*. (2014, april 30). Opgeroepen op mei 16, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite\\_bead](http://en.wikipedia.org/wiki/Ferrite_bead)

Giancoli, D. C. (2009). *Natuurkunde deel 2*. Amsterdam: Pearson education benelux.

*Hyperthermie*. (2013, December 31). Opgeroepen op Februri 20, 2014, van Wikipedia:  
<http://nl.wikipedia.org/wiki/Hyperthermie>

*Impedance*. (2014, mei 7). Opgeroepen op mei 15, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_impedance](http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_impedance)

*Impedance matching*. (2014, may 1). Opgeroepen op mei 16, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Impedance\\_matching](http://en.wikipedia.org/wiki/Impedance_matching)

*impedantie plethysmografie&fleboografie*. (2013). Opgeroepen op Mei 2014, van [www.menselijk-lichaam.com](http://www.menselijk-lichaam.com): <http://www.menselijk-lichaam.com/algemeen/impedantie-plethysmografie-en-flebografie>

J. J. W. Lagendijk, G. C. Van Rhoon, S. N. Hornsleth, P. Wust, A. C. C. De Leeuw, C. J. Schneider, J. D. P. Van Ddk, J. Van Der Zee, R. Van Heek-Romanowski, S. A. Rahman, C. Gromoll. (1998). *Esho Quality Assurance Guidelines for Regional Hyperthermia. International Journal of Hyperthermia* , 125-133.

*Permittivity*. (2014, mei 5). Opgeroepen op mei 15, 2014, van wikipedia.org:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Permittivity>

*Phosphor thermometry*. (2014, april 29). Opgeroepen op mei 20, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphor\\_thermometry](http://en.wikipedia.org/wiki/Phosphor_thermometry)

*Specific absorption rate*. (2014, maart 26). Opgeroepen op mei 15, 2014, van  
wikipedia.org: [http://en.wikipedia.org/wiki/Specific\\_absorption\\_rate](http://en.wikipedia.org/wiki/Specific_absorption_rate)

*Thermoelectric effect*. (2014, April 29). Opgeroepen op Maart 2014, van Wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect)

*VSWR*. (2014, may 10). Opgeroepen op may 16, 2014, van wikipedia.org:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Standing\\_wave\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Standing_wave_ratio)

## 10. Bijlage A

Afstudeeropdracht thermokoppel thermometrie AMC

### Algemeen

Het afstudeerproject vindt plaats op het AMC, afdeling Radiotherapie en wordt uitgevoerd bij de groep Hyperthermie. Hyperthermie is een behandelmethode bij kanker. Hierbij wordt de tumortemperatuur verhoogd tot 41-43°C, met behulp van radio frequente elektromagnetische straling. Deze therapie wordt toegepast in combinatie met gamma bestraling en/of chemotherapie. De stagebegeleiders in het AMC zijn Hans Crezee en Gerard van Stam.

### Beschrijving

Er zijn twee hyperthermie opstellingen beschikbaar op de afdeling, één voor de oppervlakkig gelegen tumoren en één voor de tumoren dieper dan 4 cm.

Voor diepgelegen tumoren wordt de hyperthermie uitgevoerd met 70 MHz golfpijp antennes. Er worden één of meer antennes dicht bij de huid geplaatst om de energie zo goed mogelijk in de tumor te krijgen. Tussen huid en antenne wordt een waterbolus aangebracht als energieleider en huidkoeler. Voor de oppervlakkige tumoren wordt de behandeling uitgevoerd met een 434 MHz applicator die eveneens is voorzien van een waterbolus. Gedurende de behandeling wordt de temperatuur gemeten op de huid onder de bolus en in of dicht bij de tumor. Voor deze meting worden meerdere multisensor thermokoppel probes gebruikt. Om de betrouwbaarheid van de temperatuur meting te verhogen wordt tijdens de behandeling, vooraf aan de meting, de RF power even uitgeschakeld.

### De opdracht

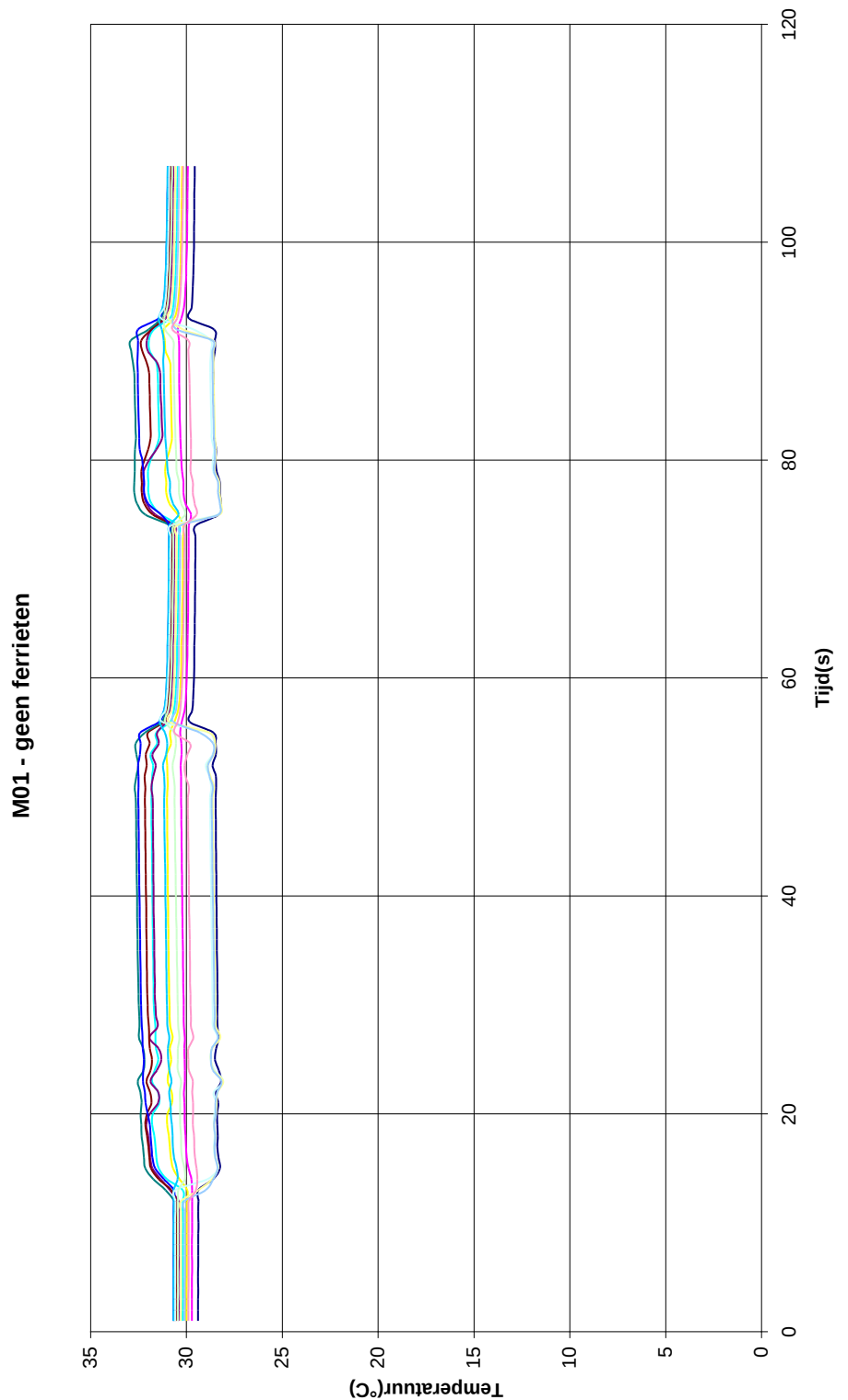
1. Bepalen van nauwkeurigheid, stabiliteit en RF gevoeligheid (EMC) van de multisensor thermokoppel probes en meetsysteem.

- a. Voor de metingen is een RF ongevoelige gekalibreerd optisch thermometrie systeem beschikbaar als referentie
- b. Voor onderzoek naar thermokoppel zelfopwarming zijn ferriet-beads beschikbaar.
- c. Bij de metingen wordt gebruik gemaakt van weefsel equivalente fantomen.
- d. Er kan zo nodig een computer simulatie worden uitgevoerd met het hyperthermie plannings-systeem

2. Verbeteren van het een JAVA programma, voor het uitlezen en weergeven van de temperaturen, van het optische thermometrie systeem. (evt. in ander ontwikkel omgeving)

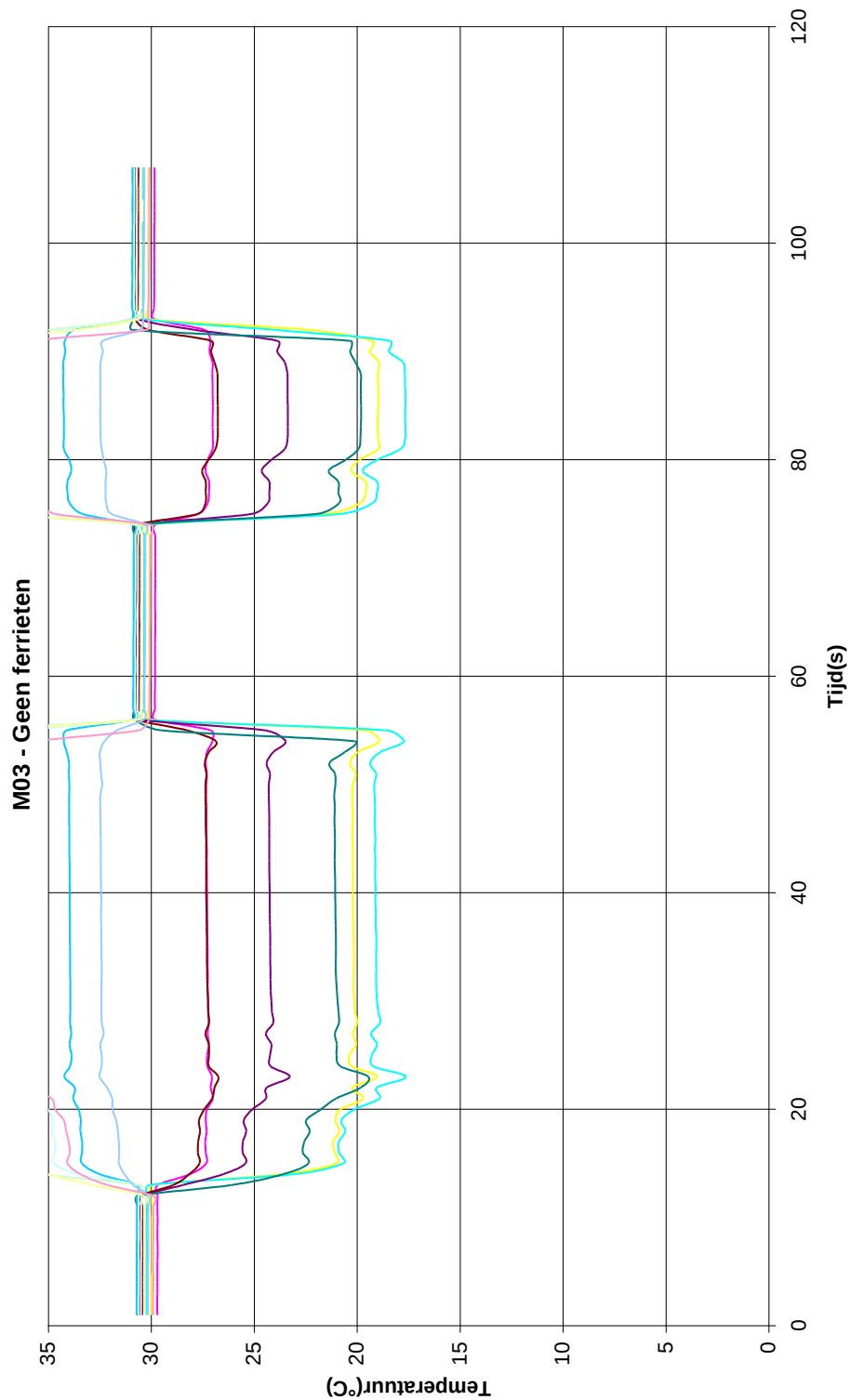
### Gewenst resultaat

- Rapport met meetresultaten en aanbevelingen t.a.v. de nauwkeurigheid en bruikbaarheid van de thermokoppels in de klinische praktijk.
- Aangepast/geoptimaliseerd software programma.



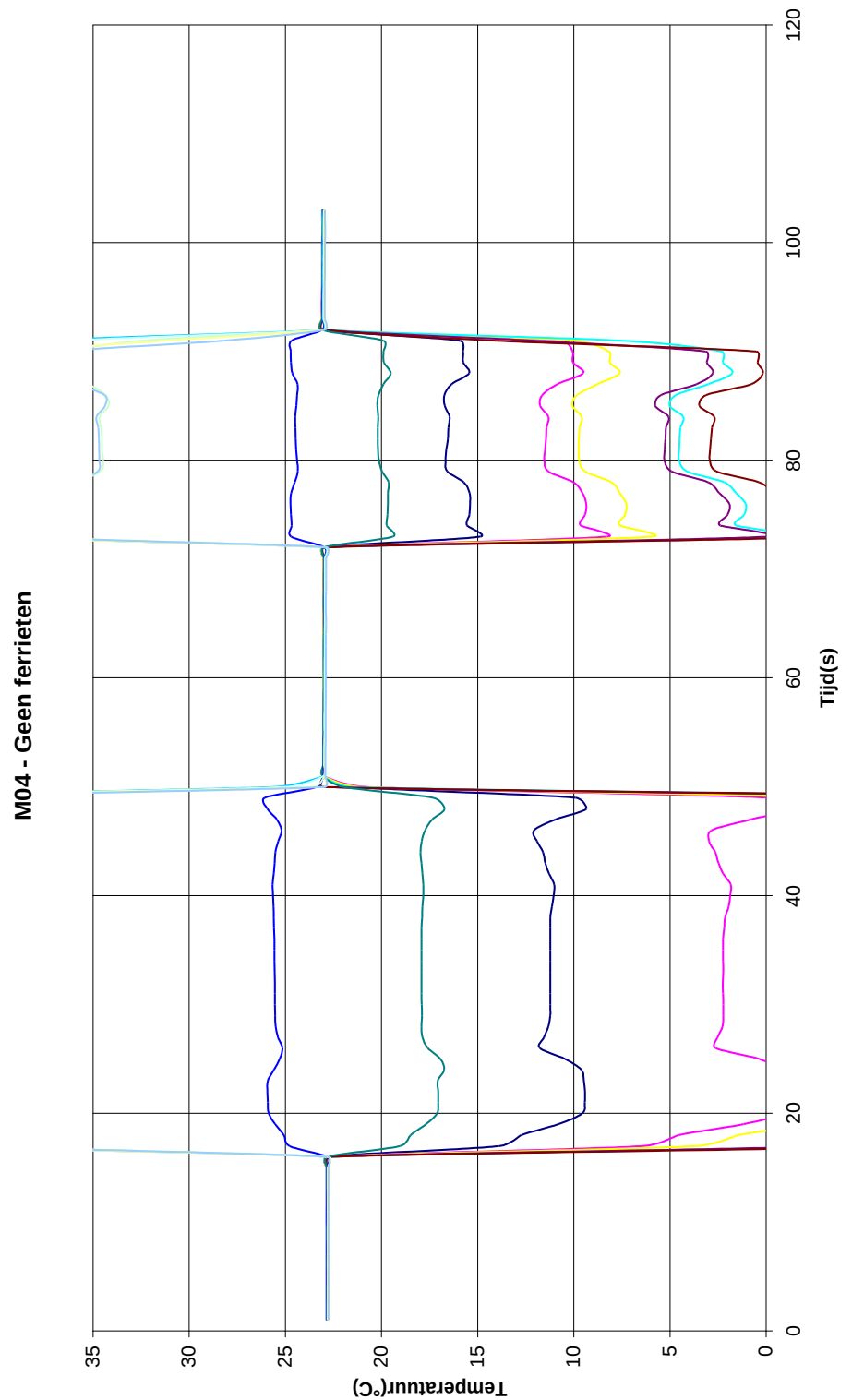
**Figuur 10-1. Storingsprofiel van M01.**

In het bovenstaande figuur is een meting van één thermokoppel zonder ferriet kralen weergegeven. Deze meting hoort bij 7.2 voor het in kaart brengen van de storing per thermokoppel.



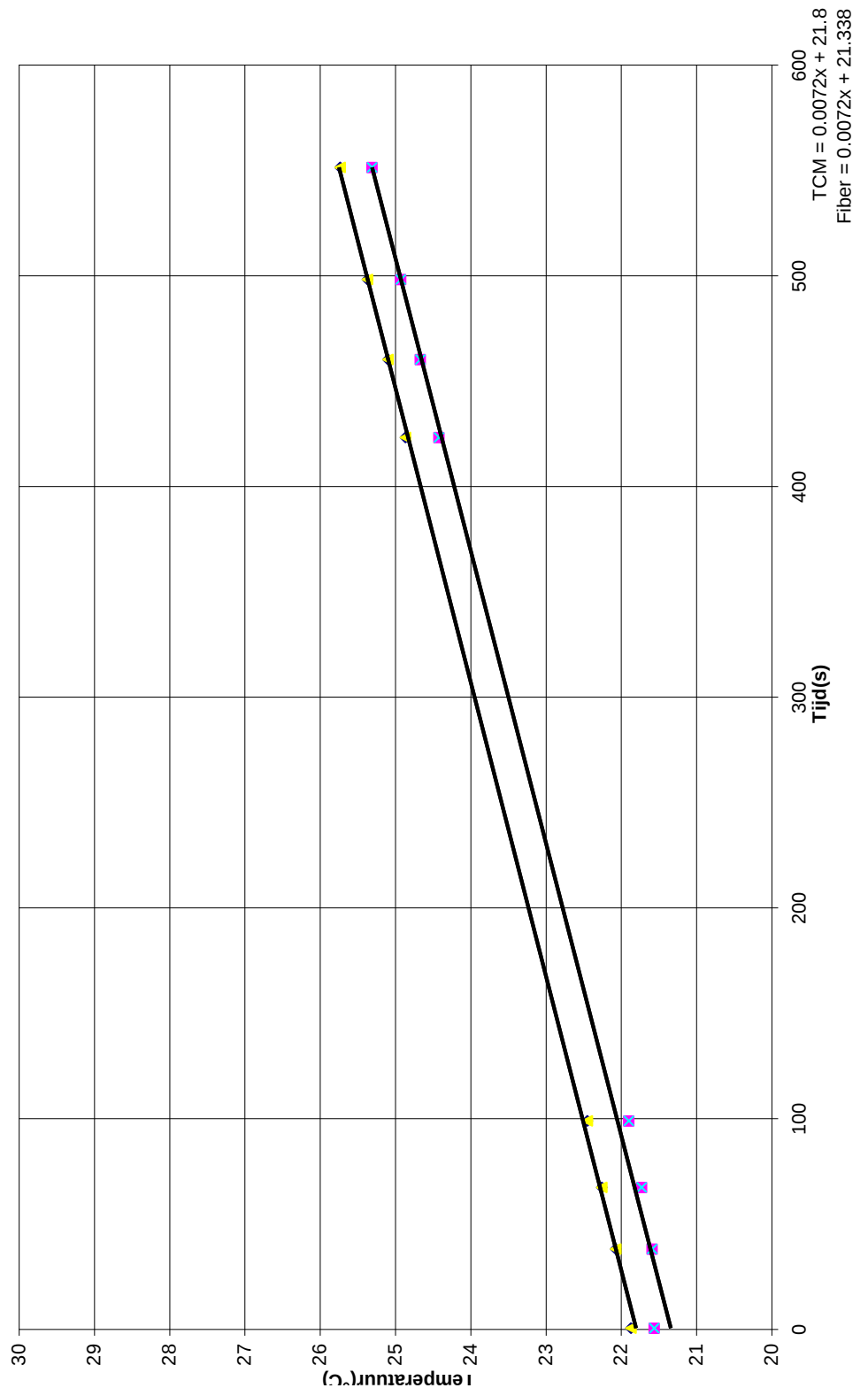
**Figuur 10-2. Storingsprofiel van M03.**

In het bovenstaande figuur is een meting van één thermokoppel zonder ferriet kralen weergegeven. Deze meting hoort bij 7.2 voor het in kaart brengen van de storing per thermokoppel.



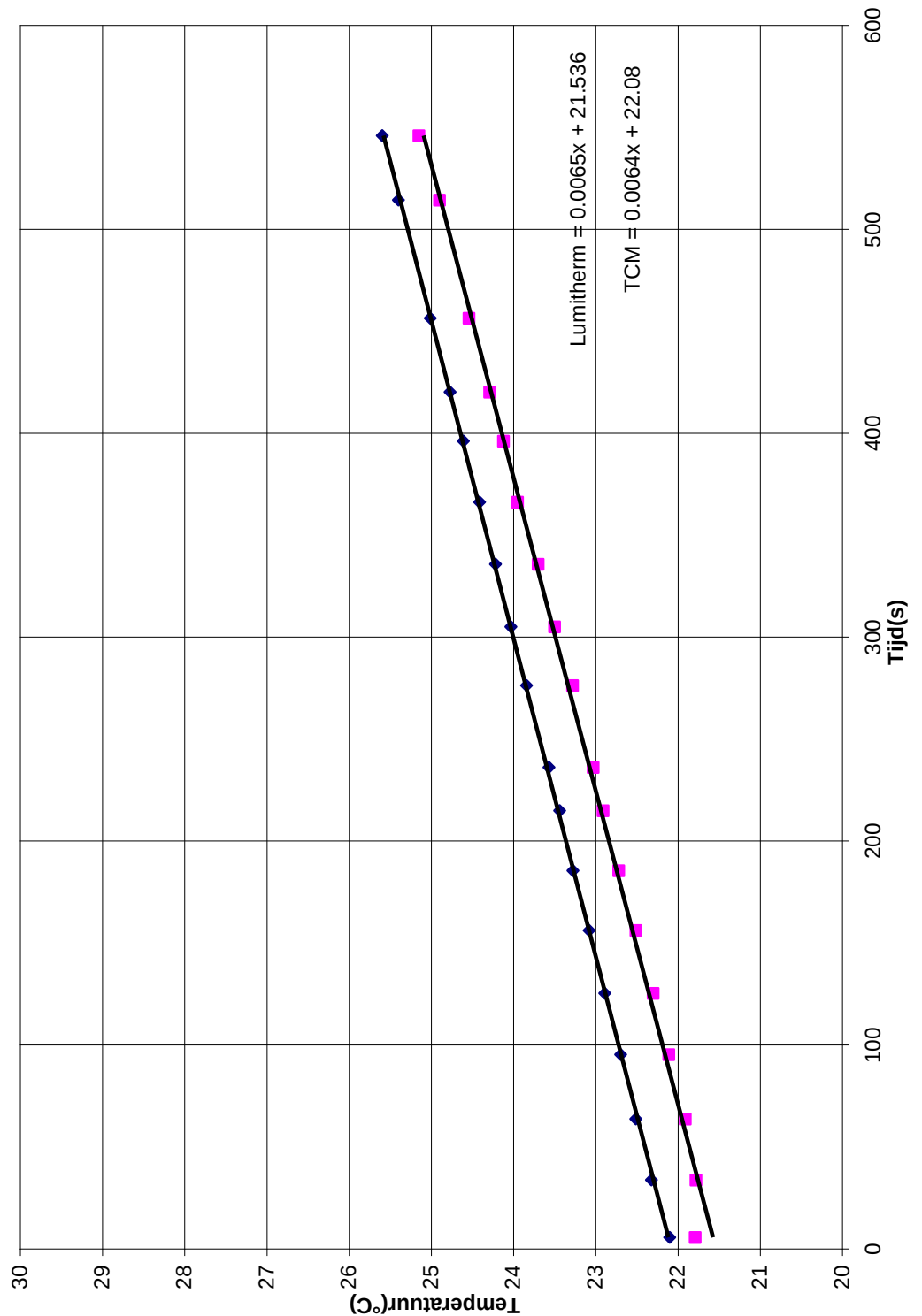
**Figuur 10-3. Storingsprofiel van M04.**

In het bovenstaande figuur is een meting van één thermokoppel zonder ferriet kralen weergegeven. Deze meting hoort bij 7.2 voor het in kaart brengen van de storing per thermokoppel.



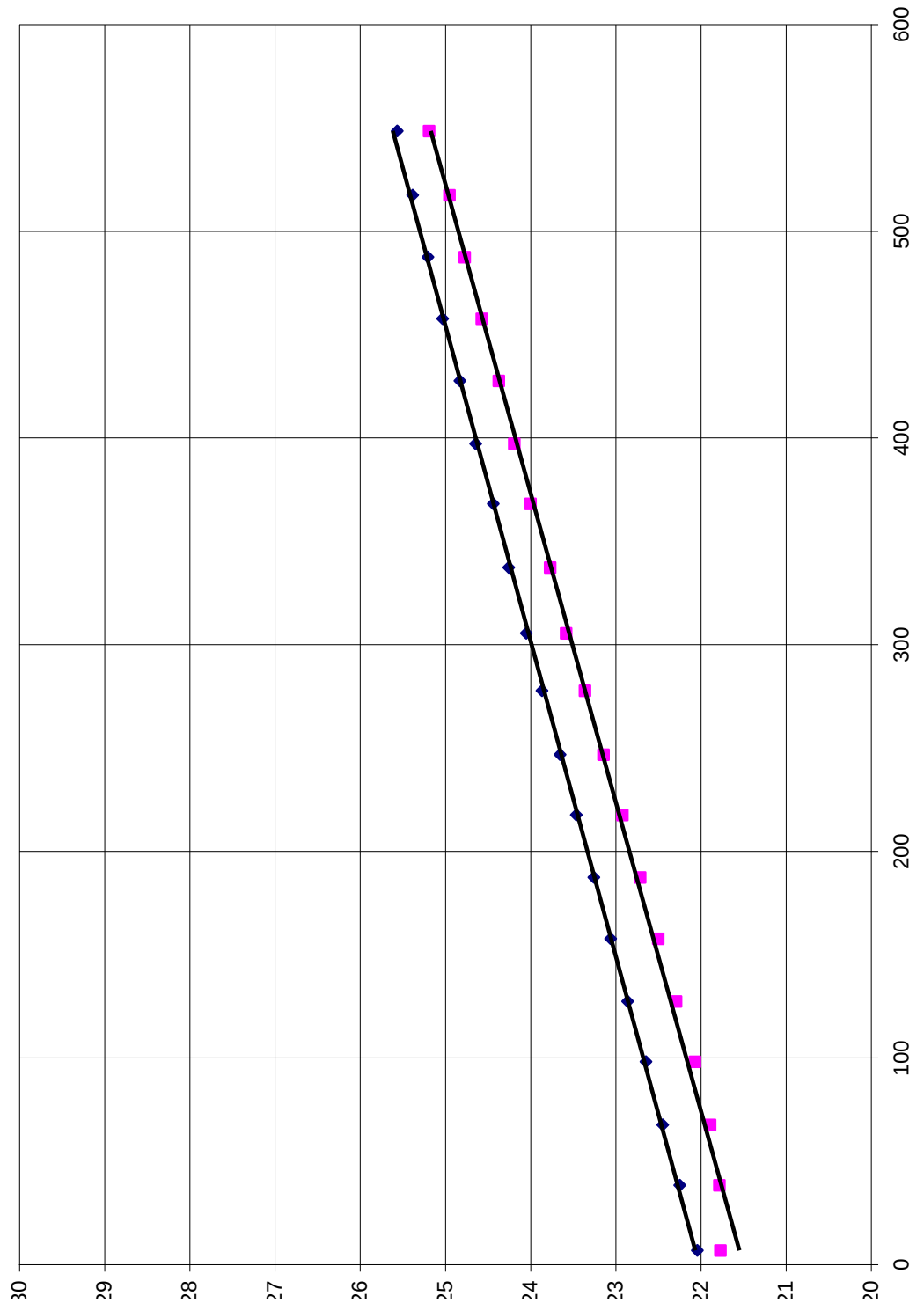
**Figuur 10-4. Lineaire regressie meting #1.**

Het bovenstaande figuur is de eerste meting uit de reeks behorende bij 7.3 voor 200Watt. Er zijn 9 pulsen gedaan bij deze meting. In het figuur zijn de temperaturen 3 seconden na het uitzetten van het vermogen weergegeven voor zowel de fiber als de thermokoppel probe.



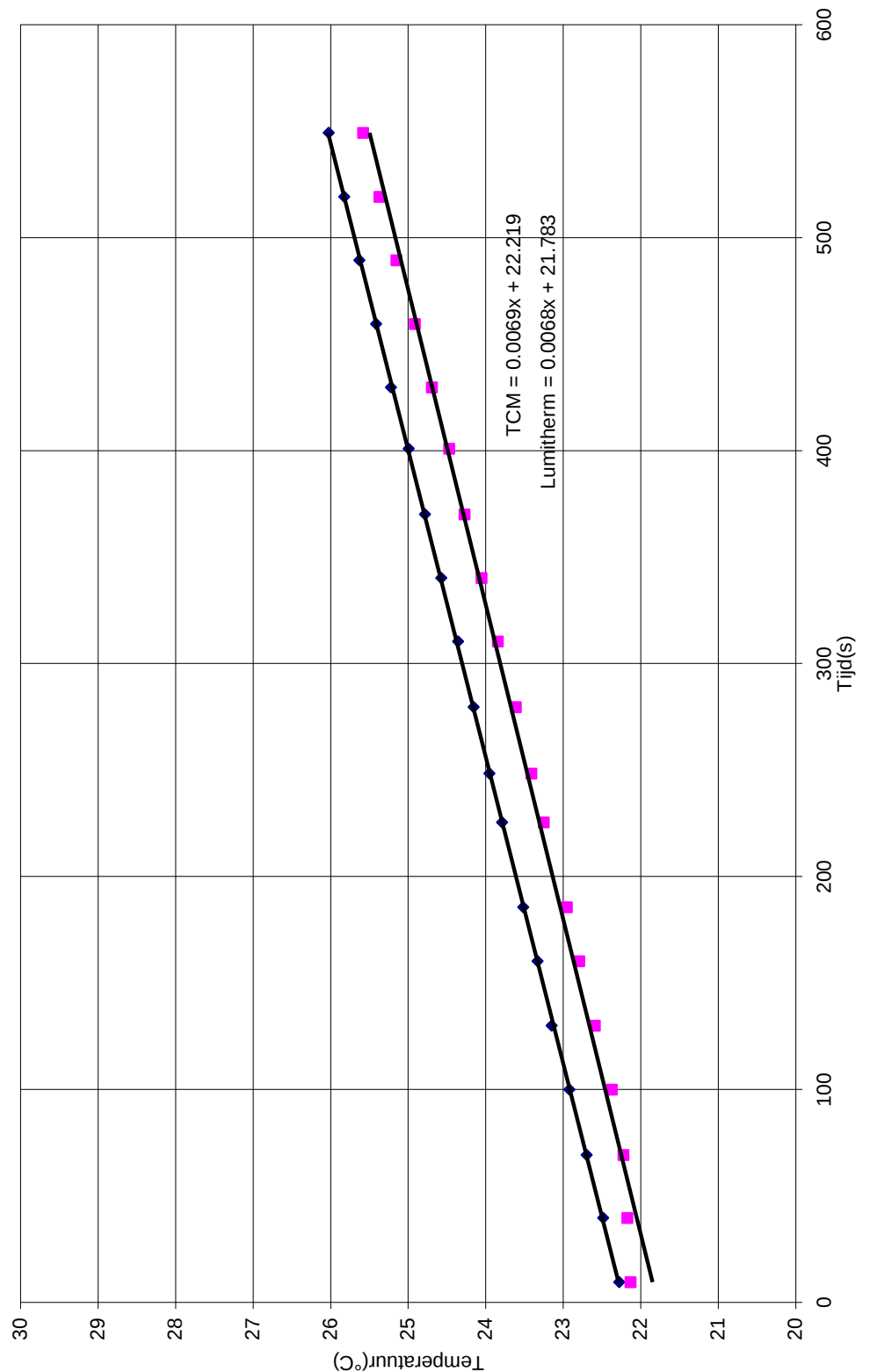
**Figuur 10-5. Lineaire regressie meting #2.**

Het bovenstaande figuur is de tweede meting uit de reeks behorende bij 7.3 voor 200Watt. Er zijn 18 pulsen gedaan bij deze meting. In het figuur zijn de temperaturen 3 seconden na het uitzetten van het vermogen weergegeven voor zowel de fiber als de thermokoppel probe.



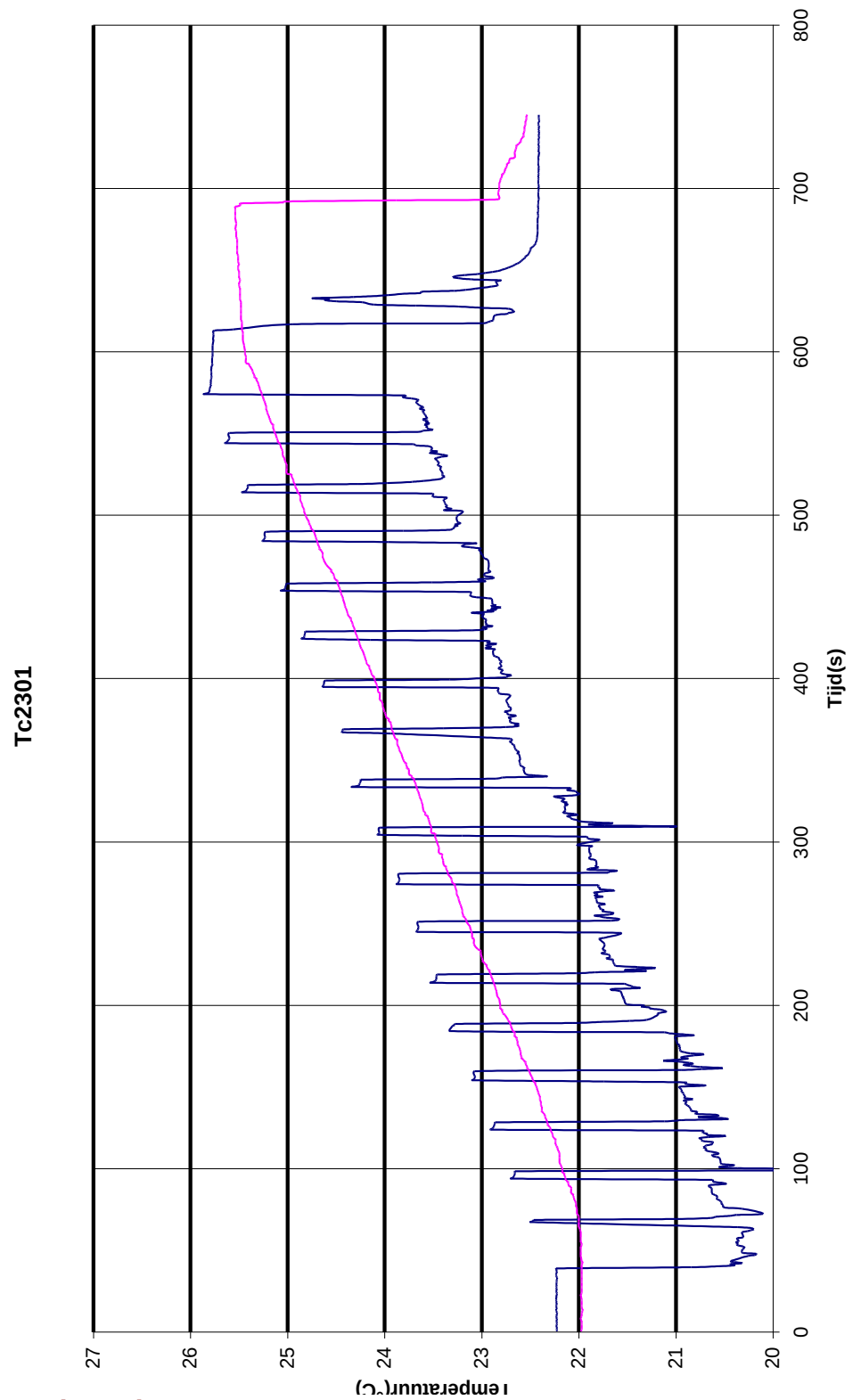
**Figuur 10-6. Lineaire regressie meting #3.**

Het bovenstaande figuur is de derde meting uit de reeks behorende bij 7.3 200Watt. Er zijn 18 pulsen gedaan bij deze meting. In het figuur zijn de temperaturen 3 seconden na het uitzetten van het vermogen weergegeven voor zowel de fiber als de thermokoppel probe.



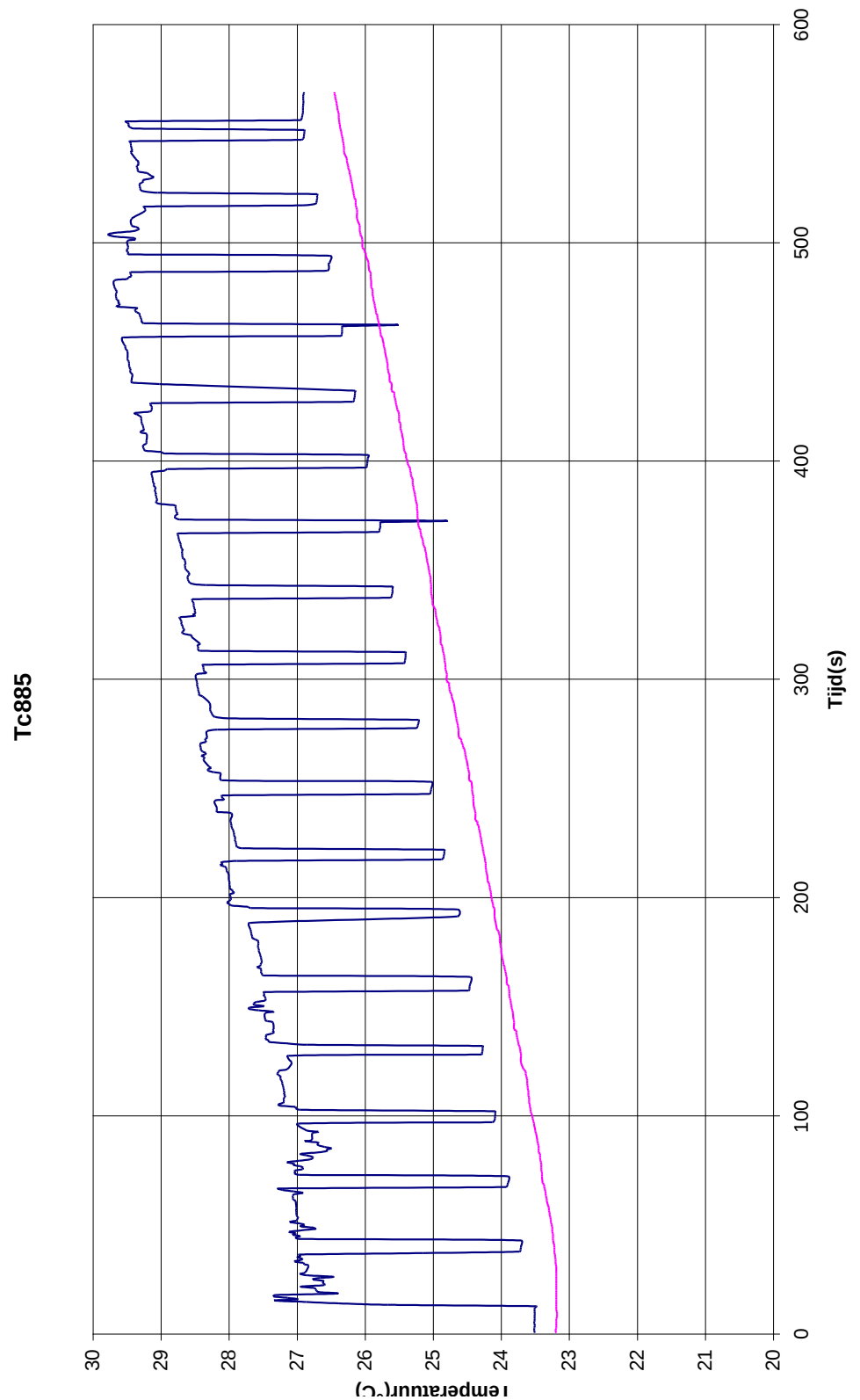
**Figuur 10-7. Lineaire regressie meting #4.**

Het bovenstaande figuur is de vierde meting uit de reeks behorende bij 7.3 200Watt. Er zijn 18 pulsen gedaan bij deze meting. In het figuur zijn de temperaturen 3 seconden na het uitzetten van het vermogen weergegeven voor zowel de fiber als de thermokoppel probe.



**Figuur 10-8 . Lineaire regressie meting 600 Watt van Tc2301.**

Het bovenstaande figuur is een volledige meting voor een klinische probe bij een vermogen van 600 Watt behorende bij 7.3. Er zijn 18 pulsen gebruikt.



**Figuur 10-9. Lineaire regressie meting 600 Watt van Tc2301.**

Het bovenstaande figuur is een volledige meting voor een klinische probe bij een vermogen van 600 Watt behorende bij 7.3. Er zijn 18 pulsen gebruikt.

## 11. Bijlage B

LUMITHERM® X5-TRUE TEMPERATURE SENSOR



Measurement  
Where Accuracy Counts

±0.2°C

**HIGHLIGHTS**

- ±0.2°C Accuracy or Better
- EMI/RF/MW Immune
- Low Thermal Mass
- Miniature
- Intrinsically Safe
- LumiSmart® Connector

**Description**  
The X5-True is the most accurate sensor in the LumiTherm X5 line of EMI, RF and MW immune fiber optic thermometers. Radio Frequencies and Microwaves are present in a broad variety of applications, and the X5 line of fiber optic sensors gets along very well with this portion of the electromagnetic spectrum.

**Applications**

- MRI Scanner, Research
- Hyperthermia with Radiation Oncology and Chemotherapy
- RF Ablation
- Microwave and RF thermotherapy
- Microwave processes

**Other Models**  
The X5 line of sensors offers different models with complementary specifications to suit your distinctive needs.

To suit a broad variety of different applications, other X5 standard and custom sensors are available. Visit our website or contact us for details.

**Accurate**  
X5 sensors use the recognized fluorescence decay temperature sensing principle to provide Fast, Accurate and Consistent temperature measurement in harsh environments. Our sensors are the most accurate fiber optic sensors on the market today.

**Affordable**  
The X5 line has benefitted from recent improvements in components manufacturing. Because of this, IPITEK was able to design an extremely high-quality product with one idea in mind: Your Budget. Many applications that would benefit from the use of optical sensors cannot justify the investment in high-priced equipment offered by legacy vendors. IPITEK's LumiTherm X5 addresses just that issue.

**Simple**  
There's no reason for it to be complicated, after all, it's just a thermometer. With its LumiSmart connector, the X5 sensor is easier to use than a thermocouple and ready to use in just three simple steps:

**Unwrap it - Plug it in - Read**



**IPITEK**  
INTEGRATED PHOTONICS TECHNOLOGY

**Figuur 11-1. Ipitek technische specificaties**  
De datasheet van de gebruikte optische fibers.

## DM 852

### Technical Specifications

|                                   |                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Measuring Range:</b>           | -1.0 to +50.0°C                           |
| <b>Resolution:</b>                | 0.1°C                                     |
| <b>Measuring Accuracy:</b>        | ±0.1°C                                    |
| <b>Capacity:</b>                  | 2 Channels                                |
| <b>Power Supply:</b>              | 1 Piece 6LR61 9.0 V Battery               |
| <b>Battery Lifetime:</b>          | 650 Hours                                 |
| <b>Battery Test:</b>              | Indicator Lights                          |
| <b>Patient Safety:</b>            | Blank Display Before Battery is Exhausted |
| <b>Display:</b>                   | 13 mm. LCD                                |
| <b>Calibration Control:</b>       | Test Position to Simulate 50.0°C          |
| <b>Response Time:</b>             | 2 Seconds                                 |
| <b>Ambient Temperature Range:</b> | +5 to +40°C                               |
| <b>Dimensions (WxHxD):</b>        | 70 mm. x 110 mm. x 35 mm.                 |
| <b>Weight:</b>                    | 200 Grams incl. Battery                   |
| <b>Optional Mounting:</b>         | Rail System                               |

Please note: Due to regulatory requirements not all products are available in all countries.  
Please contact your local office for availability.

ELLAB A/S • Trollesmindealle 25 • DK-3400 Hillerød • Tel. +45 4452 0500 • Fax +45 4453 0505 • E-Mail: info@ellab.com

### Figuur 11-2. Ellab technische specificaties

De data sheet van de gebruikte losse thermokoppel thermometer.