

Rekenaargesteunde instelling van gekoppelde-resoneerderfilters deur die gebruik van modelgebaseerde parameteronttrekking

A.P.E. van der Colff

Tesis ingelewer ter gedeeltelike voldoening aan die vereistes vir die graad van Magister in die
Ingenieurswese aan die Universiteit van Stellenbosch



Studieleiers :

Prof. P. Meyer

Dr. C. van Niekerk

Maart 2002

Verklaring

Ek, die ondergetekende, verklaar hiermee dat die werk in hierdie tesis vervat, my eie oorspronklike werk is en dat ek dit nie vantevore in die geheel of gedeeltelik by enige universiteit ter verkryging van 'n graad voorgelê het nie.

Handtekening:

Datum:

Opsomming

Die instelling van gekoppelde-resoneerderfilters is 'n essensiële deel van die vervaardiging daarvan. Dit is egter 'n tydsame en duur proses. Die gebruik van modelgebaseerde parameteronttrekking as 'n semi-geoutomatiseerde instellingsproses is ondersoek.

Hierdie tesis beskryf die ontwikkeling van so 'n prosedure. Verskillende modelle vir die filter is vergelyk. Die onttrekkingsalgoritme is gebaseer op die kleinste-kwadraatmetode. 'n Meer robuuste metode word voorgestel wat die parameteronttrekking moontlik maak, sonder dat daar goeie beginwaardes beskikbaar is.

Die algoritme word geëvalueer aan die hand van 'n vierde orde enkelmodus direkgekoppelde-resoneerderfilter met 'n senterfrekwensie van 10GHz. Die algoritme lewer goeie resultate en maak die instelling van hierdie tipe filter moontlik op 'n effektiewe wyse. Die metode kan ook gebruik word vir die diagnose van die filter wat 'n groot voordeel is bo meer konvensionele direkte instellingsmetodes.

Abstract

The tuning of coupled-resonator filters is an essential part of its production. It is, however, a time consuming and expensive process. The use of model-based parameter extraction algorithms as a semi-automated tuning procedure is examined.

This thesis describes the development of such a procedure. Different models for the filter are compared. The extraction algorithm is based on the least squares method. A more robust procedure is presented which makes the parameter extraction possible, without the availability of good starting values.

The algorithm is evaluated using a fourth order single mode direct coupled cavity filter with a centre frequency of 10GHz. The algorithm produces good results and makes the tuning of this type of filter possible in an effective way. It also allows for the diagnosis of the filter, which is a great advantage over the more conventional direct tuning methods.

Erkennings

Ek wil graag die volgende persone bedank sonder wie hierdie tesis nie moontlik sou gewees het nie:

Die Here, sonder wie se genade ek niks sou kon doen nie.

Ouma Visser en Tannie Bessie vir hulle besondere ondersteuning.

My ouers, my broers, die res van die familie, Lindie, Merchant Seal en al my vriende.

My studieleiers, Prof. P. Meyer en Dr. C. van Niekerk vir hulle leiding, finansiële en morele ondersteuning gedurende die projek.

Die mense van S255 en E251, Rodney, Willem, Jan Greyling en Thinus.

Die proeflesers: Tannie Bessie, Nico, my ouers, Lindie en Alla

Inhoudsopgawe

Hoofstuk 1	Inleiding	1
1.1	Pobleemstelling	1
1.2	Instellingsmetodes in die literatuur	3
1.2.1	Direkte metodes	3
1.2.2	Metodes wat gebruik maak van optimeringstegnieke	6
1.3	Studiedoelwitte	9
1.4	Uiteensetting van tesis	10
Hoofstuk 2	Modellering van die filter	11
2.1	Inleiding	11
2.2.	Die voorbeeldfilter	13
2.3.	Die klassieke model	16
2.4.	Cohn-model	20
2.4.1.	Modellering van resoneerders	20
2.4.2.	Modellering van impedansie-omkeerders	23
2.4.3.	Die berekening van die model se s-parameterverloop	25
2.5.	Marcuvitz-model	27
2.5.1.	Modellering van die resoneerders	28
2.5.2.	Modellering van die irisse	28
2.5.3.	Die berekening van die model se s-parameterverloop	31
2.6.	Simulering van die voorbeeldfilter	33
2.6.1.	Beskrywende parameters vir die irisse	33
2.6.2.	Beskrywende parameters vir die resoneerders	38

2.6.3.	Beskrywende parameters vir die golfleiers aan die ente	41
2.6.4.	Vergelyking van die verskillende modelle se simulاسie	42
2.7.	Gevolgtrekking	46
Hoofstuk 3	Die optimeringsalgoritme	47
3.1	Inleiding	45
3.2	'n Geskikte optimeringsmetode	49
3.3	Kleinste-kwadraatmetode	54
3.3.1	Afleidings vir Newton-metodes	54
3.3.2	Afleidings vir die kleinste-kwadraatmetode	57
3.4	'n Geskikte foutfunksie	60
3.5	Geskikte beginwaardes	64
3.6	Die gebruik van straffunksies	65
3.7	Numeriese akkuraatheid	67
3.8	Terminering van die optimeringsroetine	70
3.9	Robuustheid van die algoritme	71
3.9.1	Die geleidelike vermeerdering van die parameters	74
3.9.2	'n Meer robuuste foutfunksie	75
3.10	Die voorgestelde parameteronttrekkingsalgoritme	77
3.10.1	Die fyner onttrekkingsalgoritme	77
3.10.2	Die robuuste onttrekkingsalgoritme	78
3.11	Gevolgtrekking	83
Hoofstuk 4	Resultate	84
4.1	Voorbeelde met gesimuleerde data	84
4.1.1	Inleiding	84

4.1.2	Voorbeeld met die fyner onttrekkingsalgoritme	84
4.1.3	Voorbeeld met die robuuste onttrekkingsalgoritme	90
4.2	Voorbeelde met gemete data	99
4.2.1	Inleiding	99
4.2.2	Instelling van die voorbeeldfilter by 10GHz	102
4.2.3	Sinkroniese instelling van die resoneerders van die voorbeeldfilter	110
4.3	Gevolgtrekking	117
 Hoofstuk 5 Gevolgtrekking		 119
5.1	Inleiding	119
5.2	Toekomstige uitbreidingsmoontlikhede	121
 Verwysings		 122
 Bylae		 125
Bylae A	Die verband tussen impedansie-omkeerders en gemene-induktansie	125
Bylae B	<i>MATLAB</i> Programlyste	127
B3	Klassieke model	127
B2	Cohn-model	128
B3	Marcuvitz-model	130
B4	Kleinste-kwadraatmetode	131

Lys van afkortings

- TRL - *“Through Reflection Line”*
- FET - *“Field effect transistor”*
- SVD - *“Singular value decomposition”*

Hoofstuk 1

Inleiding

1.1 Probleemstelling

Die instelling van gekoppelde-resoneerderfilters is 'n essensiële deel van die vervaardiging daarvan. Toleransies in die vervaardiging en onsekerhede in die stroombaanmodel veroorsaak afwykings in die spesifikasies van die vervaardigde filter. Instelling is egter in die algemeen 'n tydsame en duur proses. Dit benodig meesal duur meetapparaat sowel as opgeleide en ervare operateurs. Volgens Macchiarella [29] sal die instelling van 'n filter meesal so veel as 30% van die totale koste van die filter uitmaak. Die vinnige groei in die telekommunikasiebedryf die afgelope paar jaar het veroorsaak dat mikrogolffilters in groot maat vervaardig word en dat die spesifikasies waaraan dit moet voldoen strenger is. Tydsame instellingsprosesse beperk die hoeveelhede wat vervaardig kan word en verhoog die eenheidskoste. Daar word dus voortdurend na beter instellingsmetodes gesoek.

Volgens die literatuur bestaan daar verskeie metodes wat poog om die instellingsproses van gekoppelde-resoneerderfilters meer effektief te maak. Baie metodes slaag egter nie daarin om 'n eenvoudige en robuuste metode daar te stel nie. Instelling word in een van *Agilent Technologies* se toepassingsnotas [31] beskryf as 'n kuns sowel as 'n wetenskap en die sukses daarvan is baie keer afhanklik van die ervaring van die operateur. Die gebruik van rekenaargesteuende instellingsmetodes, om gedeeltes van die proses te outomatiseer, het die afgelope paar jaar baie aandag in die literatuur geniet as gevolg van die toename in massa-vervaardiging van filters. Met behulp van hierdie metodes kan die instelling nou deur 'n onervare operateur, of selfs heeltemal deur die rekenaar, beheer word. Veral die gebruik van modelgebaseerde parameteronttrekking lyk na 'n belowende rekenaargesteuende metode. Modelgebaseerde parameteronttrekking onttrek die

parameters van 'n filter uit die gemete verloop daarvan. Ten einde die verstelling van die fisiese filter wat nodig is, voor te stel, kan hierdie parameters vergelyk word met die elementwaardes waarvoor die filter ontwerp is. In hierdie studie is dié instellingsmetode ondersoek en 'n algoritme is daarvoor ontwikkel.

1.2 Instellingsmetodes in die literatuur

Ten einde 'n agtergrondkennis in die gebruik van rekenaargesteunde instellingsmetodes te hê, is dit nodig om die instellingsmetodes wat daar in die literatuur bestaan, te bestudeer. Hierdie metodes kan ingedeel word in die groepe wat hieronder bespreek word.

1.2.1 Direkte metodes

Die metodes wat hier bespreek word, is almal direkte metodes. Dit beteken dat die instelling van die filter gedoen word aan die hand van 'n direkte meting. Dit is in teenstelling met metodes wat van optimeringstegnieke gebruik maak om die instellingsproses te fasiliteer. Direkte metodes kan onderverdeel word in metodes wat van metings in die frekwensiegebied gebruik maak en metodes wat van metings in die tydgebied gebruik maak. Eerstens word die alternerende-kortsluitingsmetode van Dishal, een van die oudste frekwensiegebiedmetodes, bespreek. Hierdie metode word uitgesonder aangesien dit 'n standaard instellingsmetode is en baie ander metodes daarop gebaseer is. Daarna word 'n aantal ander frekwensiegebiedmetodes bespreek en laastens word 'n tydgebiedmetode bespreek.

1.2.1.1 Dishal se alternerende-kortsluitingsmetode

Die alternerende-kortsluitingsmetode van Dishal [10] is een van die oudste, maar steeds een van die belangrikste metodes. Hier word die instelling van gekoppelde-resoneerderfilters beskou as die instelling van die resoneerders se resonante frekwensie, die koppelingswaardes tussen die resoneerders en die kwaliteitsfaktor van die onbelaste resoneerders van die filter. As gevolg van die lae verliese in golfleierresoneerders, waarop hierdie studie fokus, en die probleme daaraan verbonde om die kwaliteitsfaktor van die resoneerders verstelbaar te maak, is die instelling van laasgenoemde parameter nie ondersoek nie.

Die alternerende-kortsluitingsmetode waarmee die resoneerders opgestel word, behels die volgende. Al die resoneerders word so ver as moontlik uitgestel. 'n Generator word aan die een kant van die filter gekoppel en die uittree net na die eerste resoneerder word gemeet. Die stelskroef in die resoneerder word nou verstel sodat die uittree wat gemeet word 'n maksimum is. Die uittree na die tweede resoneerder word volgende gemeet en die stelskroef in hierdie resoneerder word verstel sodat die uittree wat gemeet word 'n minimum is. So word voortgegaan deur al die onewe resoneerders te verstel vir 'n maksimum uittree en al die ewe resoneerders vir 'n minimum uittree. Die metode wat Dishal voorstel om die koppeling tussen die resoneerders in te stel, vereis dat slegs die twee resoneerders wat gekoppel word op 'n slag beskou word. 'n Generator word aan die een resoneerder gekoppel en die verloop na die ander resoneerder word gemeet. Die koppeling word dan gestel sodat die frekwensieverskil tussen die twee pieke van die verloop 'n sekere waarde het, wat uit 'n grafiek in [10] gevind word.

Hierdie metode is baie effektief, maar dit het 'n paar beperkinge. Dit maak slegs voorsiening vir die instelling van direkgekoppelde-resoneerderfilters waarin al die resoneerders dieselfde resonante frekwensie het. Verder vereis die metode dat die resoneerders heeltemal uitgestel moet kan word. Aangesien dit nie altyd moontlik is om die resoneerders ver genoeg uit te stel deur die stelskroewe nie, is dit volgens Ness [2] nodig om die resoneerders fisies te kortsluit om akkurate resultate te verkry. Dit is vir baie mikrogolffilters onmoontlik om die generator of detektor aan enige resoneerder in die filter te koppel. Sommige golfleierfilters kan wel vervaardig word sodat dit uit mekaar gehaal kan word. Dit is egter tydsaam en aangesien die verstelling van die verskillende elemente van die filter afhanklik is van mekaar, is dit ook nie so akkuraat nie. Dit maak die instellingsmetode van die koppelingswaardes wat Dishal voorstel onprakties vir meeste mikrogolffilters. 'n Verdere probleem wat Ness [2] noem aangaande die instelling van resoneerders volgens Dishal se metode is dat daar aangeneem word dat die vorige resoneerder perfek ingestel is wanneer die volgende resoneerder ingestel word. Die foute wat gemaak word is akkumulatief en gevolglik word iteratiewe instelling vereis. Volgens Ness [2] kan die aantal iterasies nogal baie word indien die spesifikasies streng is en die filter kompleks.

1.2.1.2 Ander frekwensiegebiedmetodes

Verskeie frekwensiegebiedmetodes wat gebaseer is op Dishal se metode, het later van tyd gevolg. McDonald [32] en Atia [16] het gevind dat die koppelingswaardes bereken kan word uit die 0° - en 180° -fasekruising van die weerkaatskoëffisiënt van 'n kortgeslote filter. 'n Weerkaatsfase-metode wat gebruik maak hiervan is in [17] deur Chen voorgestel. 'n Probleem met hierdie metode is dat die metode van Atia [16], waarvolgens die koppeling bepaal word, slegs geld indien die resoneerders sinkronies ingestel is. Chen verbeter dus Dishal se metode in die opsig dat filters nou *in situ* ingestel kan word, maar die metode is steeds iteratief.

In [2] stel Ness 'n metode voor waar die koppelingsfaktore in die filter gedefinieer word in terme van die groepsvertraging. Die meting van die groepsvertraging kan direk gedoen word met behulp van 'n netwerkanaliseerder en daar word gewys dat hierdie metode die instelling van filters moontlik maak sonder dat 'n iteratiewe proses nodig is. Hierdie metode is tans slegs geskik om direkgekoppelde-filters te hanteer, maar daar word beweer dat dit moontlik is om die metode uit te brei om die instelling van filters met kruiskoppeling moontlik te maak.

Atia stel in [1] 'n metode voor, waarmee sy metode van [16] uitgebrei word, om die koppeling en individuele resonansiefrekwensie te bepaal van 'n filter waarin die resoneerders nie meer sinkronies ingestel hoef te wees nie. Hierdie metode is tans slegs geskik om direkgekoppelde-filters te hanteer, maar daar word ook beweer dat dit moontlik is om die metode uit te brei om ook die instelling van filters met kruiskoppeling moontlik te maak.

Daar is ook 'n rekenaargesteuende direkte metode in die literatuur aangetref, wat deur Marquardt [27] gepubliseer is. Hierdie metode is gebaseer op die metode van Atia [16]. In Marquardt se metode word die filter gekortsluit en die frekwensie waarby die weerkaatskoëffisiënt se fase 0° en 180° kruis, word gemeet. Marquardt meet daarby ook die frekwensies waarby die fase 90° en -90° kruis, sowel as die twee frekwensies waarby die grootte van die weerkaatskoëffisiënt 'n minimum is, in die omgewing van die filter se syband. Die verskil tussen hierdie gemete frekwensies en die ideale frekwensies word vermenigvuldig met 'n sensitiwiteitsmatriks om die verstelling aan die instellingselemente wat nodig is, te lewer. Hierdie sensitiwiteitsmatriks gee die sensitiwiteit wat

elk van die instellingselemente het op afwykings in die genoemde frekwensiepunte. Die berekening van hierdie matriks word ongelukkig nie in die artikel bespreek nie. Die rekenaar word gebruik om die gelyktydige vergelykings op te los wat die verstelling van die instellingselemente bepaal. Dit verbeter die iteratiewe aard van Dishal se metode, maar die metode werk slegs indien die uitstelling min genoeg is, sodat daar 'n lineêre verband tussen die instellingselemente en die afwyking in die gemete frekwensies bestaan.

1.2.1.3 Tydgebiedmetodes

Daar is so onlangs as 1999 deur *Agilent Technologies* ondersoek ingestel na die gebruik van tydgebiedmetings om filters in te stel [31]. Hierdie metode lyk belowend en maak die instelling van resoneerders en koppelingswaardes moontlik deur 'n eenvoudige metode wat die gemete tydgebiedverloop van die weerkaatskoeffisiënt van 'n uitgestelde filter pas op die ingestelde filter se verloop. Om die ingestelde filterverloop te vind is dit nodig om 'n akkurate simulatie daarvan in die tydgebied te maak, of vir massavervaardiging kan een van die filters deur 'n ander metode ingestel word en die meting van dié filter kan dan dien as 'n masker vir die ander filters wat vervaardig word. In [31] word daar van *Agilent Technologies* se *ADS*-sagteware gebruik gemaak om die filterverloop te simuleer.

Die metode is egter baie omslagtig indien die filter kruiskoppeling besit. Dit is ook nie geskik indien die resoneerders by verskillende frekwensies ingestel moet word nie. Hierdie metode slaag verder ook nie daarin om die instelling te doen deur slegs een verstelling van elke instellingselement te maak nie [31,7].

1.2.2 Metodes wat gebruik maak van optimeringstegnieke

In teenstelling met direkte metodes kan die instellingsprobleem ook as 'n optimeringsprobleem gedefinieer word. Die gebruik van optimering het sekere voordele. Die optimeringsalgoritme kan voorsiening maak vir moontlike tekortkominge in die model van die filter. Dit is maklik om die

metode te outomatiseer aangesien die instellingsmetode reeds deur 'n rekenaar beheer word. Die filter kan nou ook geanaliseer word in die vorm waarin dit gebruik gaan word en dit hoef nie van byvoorbeeld slegs die meting van die weerkaatskoëffisiënt van 'n kortgeslote filter, gebruik te maak nie. In die literatuur is daar twee tipes metodes geïdentifiseer waarin optimering gebruik word om die instellingsprobleem op te los.

1.2.2.1 Metodes waarin 'n sensitiviteitsanalise van die filterverloop met betrekking tot die instellingselemente gedoen word

Die benadering by hierdie tipe metode is om veranderinge in die instellingselemente se sensitiviteit op die verloop van die filter te bepaal en dit dan te gebruik om die verstelling wat nodig is voor te stel. Die metode van Marquardt [27], wat vroeër bespreek is, hou verband met hierdie metodes, maar daar is onderskeid getref omdat hier van optimeringsalgoritmes gebruik gemaak word. Hierdie metodes is nie geïnteresseerd in die parameterwaardes wat die uitgestelde filter sal voorstel nie. 'n Model van die filter word ook nie benodig nie.

In Bandler [6] word twee sulke metodes bespreek. Hier word die instellingsmetode egter nie op 'n filtervoorbeeld toegepas nie. In Marchall [28] word 'n metode bespreek wat wel op direkgekoppelde-filtervoorbeelde toegepas is. Die metode is slegs nuttig om die fyner instelling van die filter te behartig en daar word genoem dat daar van 'n meer robuuste vooraf-instellingsmetode gebruik gemaak is om 'n growwe instelling van die filter te verkry. Dishal se metode word hier genoem as 'n moontlike vooraf-instellingsmetode. 'n Verdere nadeel van hierdie metodes is dat dit nie 'n diagnose van die filter moontlik maak nie.

1.2.2.2 Metodes waarin modelgebaseerde parameteronttrekking gebruik word

Modelgebaseerde parameteronttrekking is die proses waarmee die parameterwaardes van 'n filtermodel, wat die naaste passing met die gemete verloop van die filter lewer, gevind word. Ideaal gesproke is daar 'n lineêre verband tussen elke parameterwaarde en een van die instellingselemente. Die verstelling wat nodig is, volg dus uit die vergelyking van die onttrekte

parameters en die ideale parameters. Daar is 'n hele aantal metodes in die literatuur wat onder hierdie tipe metode ressorteer [3,4,7,23,29,30]. Die metodes verskil hoofsaaklik ten opsigte van die tipe optimeringstegnieke waarvan dit gebruik maak, die tipe verloop waarop 'n passing verkry word en die wyse waarop die instellingselemente verstel word indien die parameterwaardes bekend is.

'n Groot voordeel van hierdie tipe metode is dat dit die diagnose van filters moontlik maak. Baie keer veroorsaak onakkuraatheid in die ontwerp- of vervaardigingsproses dat die filter nooit goed ingestel kan word nie. Aangesien hierdie metodes die parameters bepaal wat die gemete verloop van die filter voorstel, kan daar presies gesien word watter parameters foutief is. Hierdie metodes kom ook meer robuus voor as die metodes wat in afdeling 1.2.2.1 bespreek is. Die gemak waarmee hierdie tipe instellingsmetode die instellingsproses outomatiseer, is 'n verdere voordeel bo direkte metodes. In die literatuur het slegs hierdie tipe instellingsmetode voorbeelde gegee wat daarin slaag om filters met kruiskoppeling in te stel [3,7,29,30]. Dit lyk asof hierdie metode baie voordele inhou bo die ander metodes in die literatuur. Die voortgaande verbetering in rekenars se spoed beteken ook dat daar verwag kan word dat hierdie metodes filters al hoe vinniger sal instel.

Dit is hierdie tipe instellingsmetode wat verder in die tesis ondersoek is. Die verskillende aspekte waaruit hierdie metodes bestaan sal later in die tesis in diepte bespreek word en waar van toepassing sal daar verwys word na die relevante literatuurbronne.

1.3 Studiedoelwitte

Uit die bestudering van die literatuur in afdeling 1.2 kom dit voor asof die gebruik van 'n optimeringsalgoritme vir modelgebaseerde parameteronttrekking van gekoppelde-resoneerderfilters die effektiewe instelling daarvan moontlik maak. In afdeling 1.2.2.2. is 'n oorhoofse bespreking gevoer van metodes in die literatuur wat hiervan gebruik maak. In hierdie studie is 'n algoritme ontwikkel waarmee modelgebaseerde parameteronttrekking van gekoppelde resoneerderfilters gedoen kan word. Daar is reeds genoem dat modelgebaseerde parameteronttrekking die proses is waarmee die parameterwaardes van 'n filtermodel, wat die naaste passing met die gemete verloop van die filter lewer, gevind word. Dit volg dus dat die algoritme 'n geskikte model benodig. Die parameters wat die beste passing lewer word gevind deur 'n optimeringsalgoritme. Daar is baie moontlike optimeringstegnieke waarvan gebruik gemaak kan word en daar word ondersoek ingestel na 'n geskikte metode. Hierdie algoritme moet, ideaal gesproke, in staat wees om die parameters van enige uitgestelde filtermeting te vind. Die algoritme word dus so robuus moontlik gemaak. Daar word 'n algoritme ontwikkel waarmee konvergensie van die optimeringsroetine verkry kan word sonder dat die metode voorsien word van goeie beginwaardes.

Die ontwikkelde metode word geëvalueer aan die hand van 'n vierde-orde gekoppelde-resoneerderfilter. Die effektiwiteit van die ontwikkelde algoritme word beoordeel as rekenaargesteuende instellingsproses en diagnosehulpmiddel.

1.4 Uiteensetting van tesis

Die tesis is uiteengesit volgens die verskillende fasette waaruit die modelgebaseerde parameteronttrekkingsalgoritme bestaan. Die modellering van die filter word in Hoofstuk 2 bespreek. Drie moontlike modelle vir die filter is vergelyk ten einde 'n geskikte model vir die proses te vind. In Hoofstuk 3 is die optimeringsalgoritme waarvan gebruik gemaak is ondersoek. Die kleinste-kwadraat-metode is gekies as die geskikte optimeringsmetode en die werking van die metode is teoreties ondersoek. Die keuses betreffende die foutfunksie, straffunksies, ensovoorts is ondersoek en 'n algoritme is ontwikkel wat robuus genoeg is om die parameters van 'n filterverloop te onttrek, sonder die beskikbaarheid van goeie beginwaardes. Hoofstuk 4 toon die resultate van die algoritme op gesimuleerde sowel as gemete voorbeelde. Die gevolgtrekking van die studie en moontlike toekomstige uitbreidings word in Hoofstuk 5 uiteengesit.

Hoofstuk 2

Modellering van die filter

2.1 Inleiding

Die model waarmee die filter voorgestel word, speel 'n belangrike rol in die sukses van die parameteronttrekking. Die volgende aspekte is veral ter sprake in die keuse van 'n geskikte filtermodel: die model se akkuraatheid, spoed, algemeenheid en of dit deur geskikte parameters beskryf word.

Indien die model nie akkuraat genoeg is nie, sal die verloop daarvan nooit goed kan pas op die metings nie en die parameteronttrekkingsalgoritme sal nie goeie parameterwaardes kan vind nie. Indien die algoritme wel konvergeer tot sinvolle parameterwaardes, sal die waardes aangepas wees om te kompenseer vir die tekortkominge van die model. Die waardes wat so verkry word, sal waarskynlik minder of selfs heeltemal onbruikbaar wees.

Die gebruik van optimeringsalgoritmes vereis dat die filterverloop herhaaldelik bereken moet word. Die spoed waarmee die model geanaliseer word, is dus belangrik. Vanweë die kompleksiteit en lae spoed van elektromagnetiese analyses, is dit nie moontlik om dit te gebruik nie. Daar is dus gekyk na akkurate ekwivalente stroombaanmodelle.

Hoe meer parameters varieerbaar gemaak word, hoe meer inligting omtrent die filter raak bekend deur die parameteronttrekkingsproses en hoe beter sal die model se verloop op die gemete verloop kan pas. Te veel parameters veroorsaak egter dat die probleem, wat deur die optimeringsalgoritme opgelos moet word, te kompleks raak. Dit kan daartoe lei dat die algoritme sukkel om te konvergeer tot die globale minimum. Die hoeveelheid parameters waarmee die model beskryf

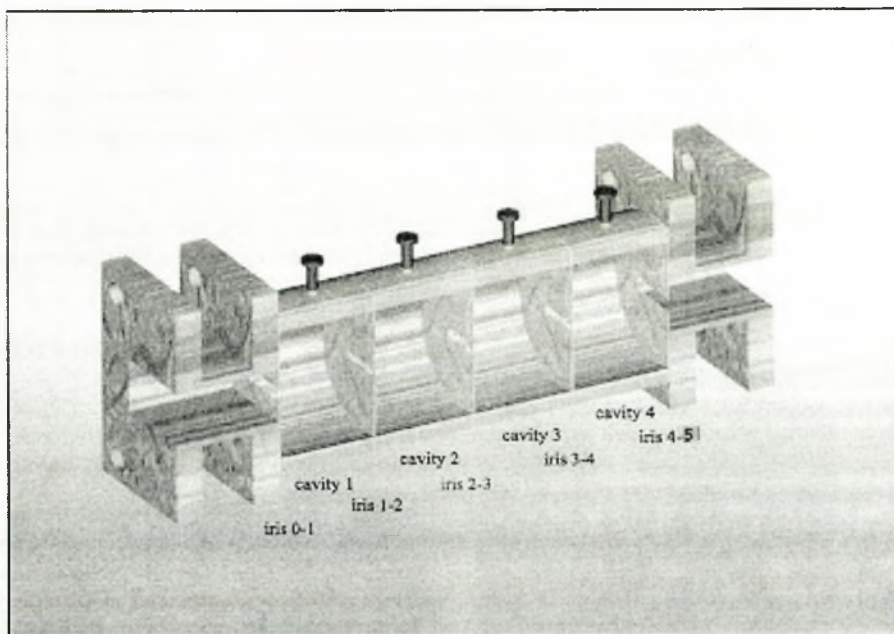
moet word, moet so min as moontlik wees, maar nogtans genoeg sodat die filter akkuraat en uniek voorgestel kan word. Volgens Dishal [10] kan enige filter deur drie basiese tipes parameters voorgestel word, naamlik die resoneerders se resonante frekwensie, die koppeling tussen die resoneerders en die onbelaste kwaliteitsfaktor van die onderskeie resoneerders. As gevolg van die lae verliese in golfleierresoneerders is besluit om die kwaliteitsfaktor daarvan as oneindig groot te benader. Die hoeveelheid parameters waarmee 'n filter voorgestel moet word, raak natuurlik ook meer soos die orde van die filter toeneem.

Ideaal gesproke moet die model akkuraat wees vir enige tipe gekoppelde-resoneerderfilter. Daar is in hierdie studie gefokus op golfleierfilters. Meer spesifiek is daar as voorbeeld gekyk na direkgekoppelde-resoneerderfilters wat bestaan uit silindriese golfleierresoneerders en reghoekige irisse tussen die resoneerders. As basis is 'n vierde-orde Chebyshev-filter gebruik. Die filter se afmetings en spesifikasies word in afdeling 2.2 bespreek. Alhoewel hierdie tipe filter eenvoudig genoeg is om met konvensionele instellingsmetodes in te stel, is dit 'n goeie beginpunt vir die studie. Daar word gehoop dat die proses later uitgebrei sal kan word om ook ander, meer komplekse tipe filters te kan instel. Filters wat van kruiskoppeling gebruik maak, is hier veral van belang, aangesien hierdie filters besonder moeilik ingestel word. Golfleierfilters verskil verder ten opsigte van die tipe golfleier en die golf-modusse wat dit ondersteun, asook die manier waarmee koppeling tussen die resoneerders gerealiseer word.

Die model wat die filter beskryf, is gewoonlik die enigste komponent van die parameteronttrekkingsalgoritme wat van filter tot filter moet verander. Daar word in hierdie hoofstuk drie moontlike modelle bespreek. In afdeling 2.3 word die klassieke model bespreek, wat bestaan uit puntelement-resoneerders en gemene-induktansiekoppelings. In afdeling 2.4 word die Cohn-model bespreek wat bestaan uit halfgolflengte-golfleierresoneerders en impedansie-omkeerders. In afdeling 2.5 word die Marcuvitz-model wat bestaan uit golfleierresoneerders en reghoekige irisse. In afdeling 2.6 word die voorbeeldfilter gesimuleer met die verskillende modelle en die resultate word vergelyk. In afdeling 2.7 word 'n gevolgtrekking gemaak waarin die voor- en nadele van die verskillende modelle teen mekaar opgeweeg word.

2.2 Die voorbeeldfilter

Die filter wat in hierdie studie as voorbeeld gebruik is, word in figuur 2-1 getoon.



Figuur 2-1: 'n Deursnit-aansig van die voorbeeldfilter [15]

In figuur 2-1 kan gesien word dat die filter bestaan uit silindriese golfleierseksies wat gekoppel is deur reghoekige irisse. Die gemete dimensies van die irisse word in tabel 2-1 gegee, waar die irisse genummer word soos in figuur 2-1.

Iris	Lengte[mm]	Hoogte[mm]	Dikte[mm]
0-1 en 4-5	10.9	2.62	0.125
1-2 en 3-4	8.5	1.53	0.125
2-3	7.6	1.75	0.125

Tabel 2-1: Die afmetings van die irisse van die voorbeeldfilter

Die gemete afmetings van die silindriese golfleierseksies, wat die resoneerders is, word gegee in tabel 2-2, waar die seksies genummer word soos in figuur 2-1. In figuur 2-1 word getoon dat daar 'n instellingskroef in elk van die seksies is, waarmee die resonante frekwensie van die resoneerder gevarieer kan word.

Resoneerder	Deursnee [mm]	Lengte[mm]
1 en 4	26.8	18.3
2 en 3	26.8	19

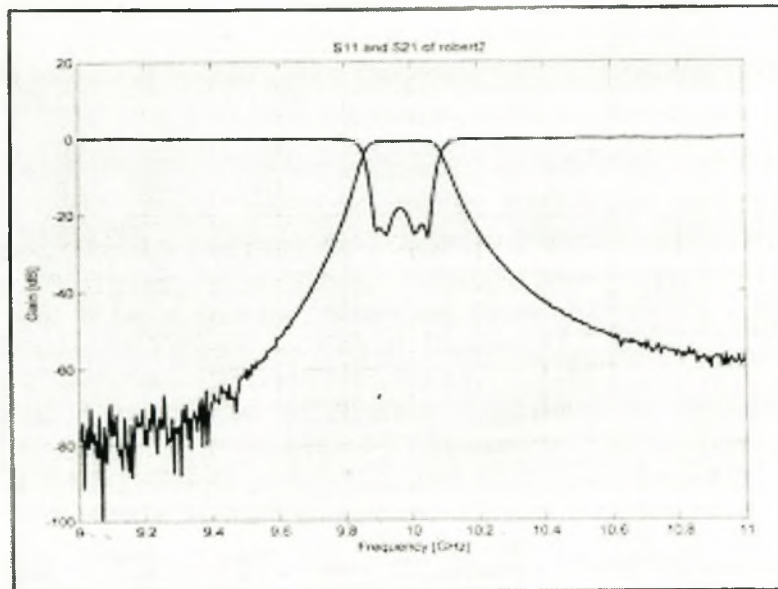
Tabel 2-2: Die afmetings van die resoneerder-ruimtes van die voorbeeldfilter

Die gemete afmetings van die reghoekige golfleierseksies aan beide ente van die filter wat in figuur 2-1 getoon is, word gegee in tabel 2-3.

Lengte [mm]	Breedte [mm]	Hoogte[mm]
55	22.86	10.16

Tabel 2-3: Die afmetings van die reghoekige golfleierseksies aan die ente van die voorbeeldfilter

In figuur 2-2 word 'n meting van die filter getoon, na die filter deur 'n konvensionele metode ingestel is.



Figuur 2-2: Gemete verloop van S_{21} en S_{11} se grootte vir voorbeeldfilter, soos gemeet deur van Zyl [15]

Die resultate van die meting word ook getoon in tabel 2-4 en dit word vergelyk met die spesifikasies waarvoor die filter ontwerp is.

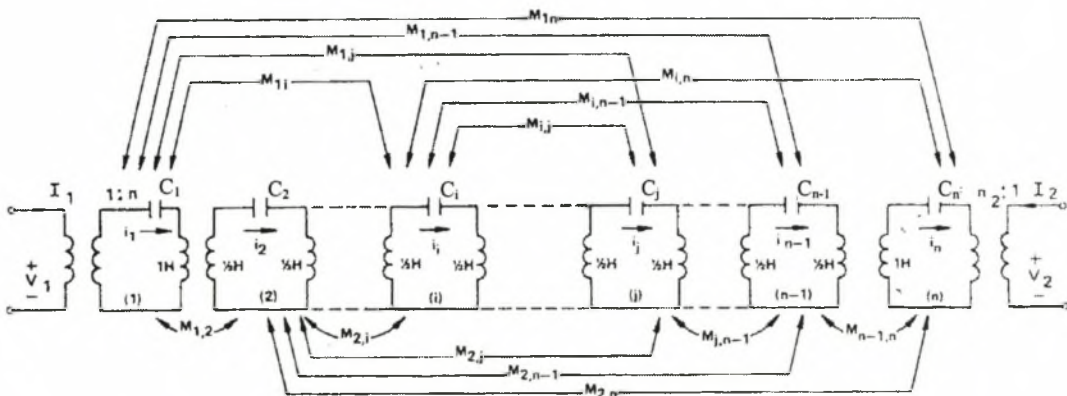
	Ontwerpte waardes	Gemete waardes
Senterfrekwensie	10GHz	9.96GHz
Bandwydte	2%	1.8%
Weerkaatskoeffisiënt in die deurlaatband	-26dB	-20dB

Tabel 2-4: Die gemete en ontwerpte spesifikasies van die voorbeeldfilter

In die afdelings wat volg word moontlike modelle bespreek wat gebruik kan word om die filter wat hierbo bespreek is, te beskryf. Die verskillende modelle word in afdeling 2.6 met mekaar vergelyk om die mees geskikte model te vind.

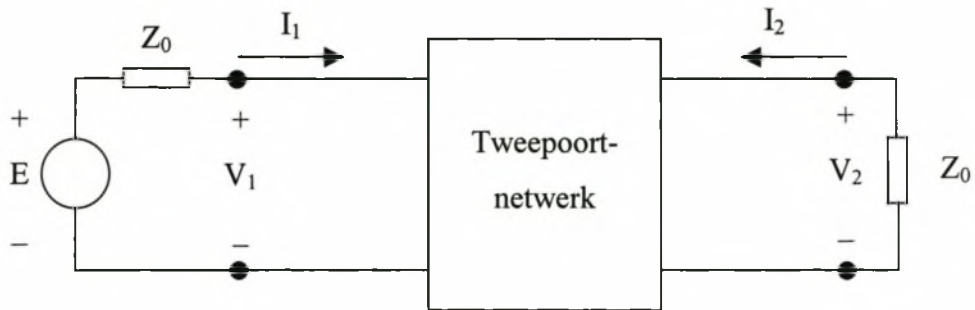
2.3 Die klassieke model

Hierdie model is die oudste, maar steeds die mees algemeen gebruikte model vir gekoppelde-resoneerderfilters. Die model word in figuur 2-3 getoon vir 'n filter van orde n wat genormaliseer is by $Z_0 = 1$ en $\omega_0 = 1$. Die kapasitor en induktansieblokke stel die resoneerders voor en die gemene-induktansies stel die koppeling tussen die resoneerders voor. Die model beskryf ook moontlike kruiskoppeling wat tussen die resoneerders voorkom. Aangesien die voorbeeldfilter slegs direkgekoppel is, kan die kruiskoppelings geïgnoreer word. Deur die kapasitansiewaardes veranderlik te maak, kan die resonante frekwensie van die resoneerders varieerbaar word. Verder is die gemene-induktansiewaardes tussen naasliggende resoneerders veranderlik gemaak, om die koppeling tussen die resoneerders te beskryf. Die ideale-transformators op die ente stel die eksterne koppeling voor wat die filter met die las en die generator van die stroombaan het.



Figuur 2-3: Die klassieke model vir 'n algemene gekoppelde-resoneerderfilter van orde n , met $\omega_0 = 1$ en $Z_0 = 1$ [25]

Daar is 'n paar aannames in hierdie model, wat dit slegs geskik maak vir nouband golfleierfilters. Eerstens word die resoneerderuimtes voorgestel deur puntelementmodelle en tweedens word die koppeling tussen die resoneerders voorgestel deur 'n impedansiematriks wat slegs imaginêre, frekwensie-onafhanklike gemene-induktansies bevat [25]. Hierdie benaderings raak minder akkuraat soos wat daar weg beweeg word vanaf die senterfrekwensie. Die model het die voordeel dat dit maklik uitgebrei kan word om kruiskoppelings te kan hanteer.



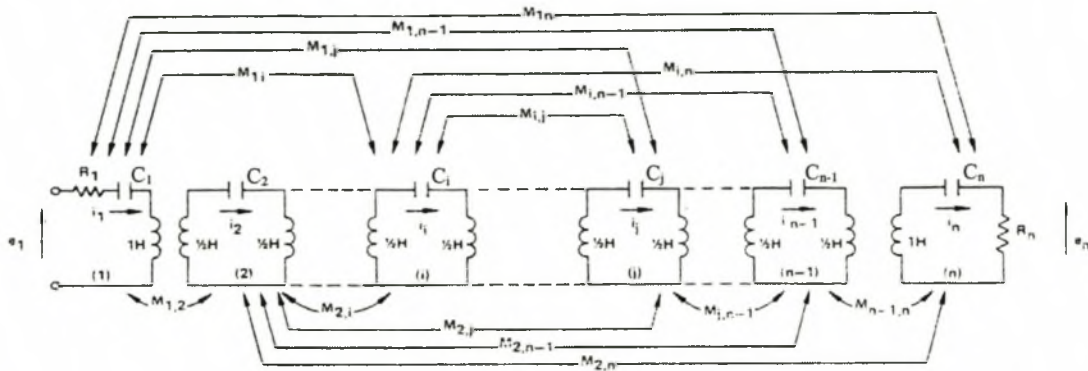
Figuur 2-4: 'n Algemene twee-poort-netwerk

Die model se s-parameters kan bereken word deur die model as 'n twee-poort-netwerk te beskou. In figuur 2-4 word 'n algemene twee-poort-netwerk getoon en die rigtings van die strome en spannings op die ente van die netwerk word gedefinieer. Indien hierdie spannings en strome gevind kan word, kan die s-parameters van die twee-poort netwerk volgens Yip [12] bereken word deur middel van vergelyking (2-1).

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{V_1 + I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \\ \frac{V_2 + I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_1 - I_1 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \\ \frac{V_2 - I_2 Z_0}{2\sqrt{Z_0}} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Die model in figuur 2-3 is genormaliseer is by $Z_0 = 1$ en $\omega_0 = 1$, maar die s-parameters se verloop wat verkry word, kan geskaal word tot die verlangde sentrefrekwensie van die filter.

Die spannings en strome op die ent van die model in figuur 2-3 kan verkry word deur eers die model te transformeer tot die model in figuur 2-5. In hierdie model is $R_1 = n_1^2$ en $R_n = n_2^2$ en $e_1 = n_1 E$. Dit volg uit Thevenin-analises van die ente van die model indien 'n generator en las bygevoeg word by die twee-poort-netwerk, soos in figuur 2-4.



Figuur 2-5: Die getransformeerde klassieke model vir 'n algemene gekoppelde-resoneerderfilter van orde n , vir $\omega_0 = 1$ [16]

Die lusvergelykings van die stroombaan van figuur 2-5 dien as 'n stel gelyktydige vergelykings, wat deur die matriksvoorstelling daarvan in vergelyking (2-2) opgelos kan word.

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ 0 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_n + R_1 & jM_{12} & jM_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & jM_{1n} \\ jM_{21} & S_n & jM_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ jM_{31} & jM_{32} & S_n & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & S_n & jM_{n-1,n} \\ jM_{n1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & jM_{n,n-1} & S_n + R_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ i_{n-1} \\ i_n \end{bmatrix} \tag{2-2}$$

waar $S_n = j(\omega - \frac{1}{\omega C_n})$ en verder is $L_n = 1$ en $jM_{ij} \approx j\omega M_{ij} \approx j\omega_0 M_{ij}$ waar $\omega_0 = 1$.

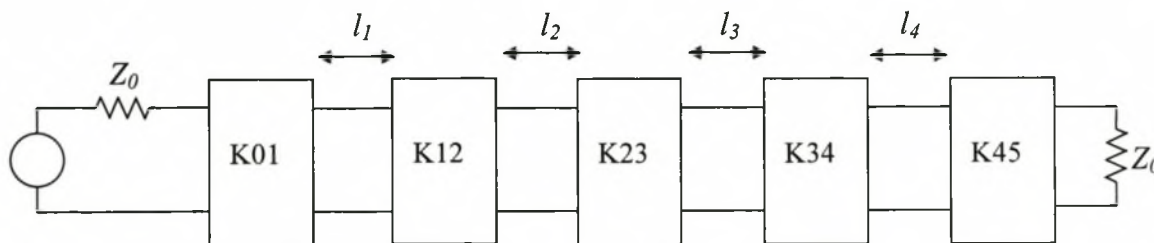
Deur nou byvoorbeeld $e_1 = 1$ te neem, kan die spanning en strome op die ente van die model van figuur 2-5, i_1 , e_n en i_n , as 'n funksie van die frekwensie bepaal word met behulp van vergelyking (2-2). Die entspannings en -strome van die model van figuur 2-3 wat gesoek word, kan nou weer verkry word deur die transformasie wat die ideale-transformators daarop het, in ag te neem. Hierdie verwantskappe word gegee in vergelyking (2-3).

$$\begin{aligned}I_1 &= n_1 i_1 \\V_1 &= E - Z_0 I_1 \\I_2 &= -n_2 i_n \\V_2 &= -Z_0 I_2\end{aligned}\tag{2-3}$$

Die strome en spannings wat met vergelyking (2-3) bereken word, word nou gebruik om die s-parameters te bereken met behulp van vergelyking (2-1). Die s-parameter-verloop word dan in frekwensie geskaleer, vanaf $\omega_0 = 1$, tot by die verlangde sentrefrekwensie.

2.4 Cohn-model

Die model word deur figuur 2-6 geïllustreer. Hierdie model modelleer die resoneerders as halfgolflengte golfleierseksies en maak van impedansie-omkeerders gebruik om die koppeling tussen die resoneerders voor te stel. Die komponente van die hierdie model is in Cohn [24] bespreek. Die impedansie-omkeerders word voorgestel deur 'n stroombaan wat voorsiening maak vir die frekwensie-afhanklikheid van die koppeling. Dit is 'n belangrike verskil tussen hierdie model en die model wat in afdeling 2.3 bespreek is, aangesien laasgenoemde model van frekwensie-onafhanklike gemene-induktansies gebruik maak om die koppeling voor te stel. Die resoneerders word ook meer akkuraat gemodelleer as golfleiersseksies as deur die puntelement-resoneerders van die model in afdeling 2.3.



Figuur 2-6: Die model met golfleierresoneerders en impedansie-omkeerders

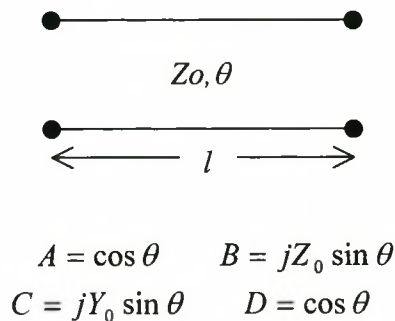
In hierdie model is die lengtes van die golfleierresoneerders veranderlik om die resonante frekwensie van die resoneerder varieerbaar te maak. Die K -waardes van die impedansie-omkeerders is ook veranderlik en modelleer die hoeveelheid koppeling tussen die resoneerders.

2.4.1 Modelling van die resoneerders

Die voorbeeldfilter maak van silindriese golfleierseksies gebruik om die resoneerders te realiseer. In hierdie model sal die lengtes van die resoneerders 'n halfgolflengte van die golflengte by die sentrefrekwensie in die resoneerder wees, indien die filter korrek ingestel is. In die voorbeeldfilter

sal die irisse egter 'n ladingseffek op die resoneerders hê en die lengte van die golfleierseksies in die filter word verkort om te kompenseer hiervoor. Die gemete lengte van die golfleierseksies in die fisiese filter is dus effens korter as 'n halfgolflengte. In hierdie model word die irisse beskryf deur impedansie-omkeerders wat slegs die koppeling modelleer en nie die iris se ladingseffek nie.

Golfleierseksies kan goed gemodelleer word deur verlieslose transmissielynmodelle waarvan die frekwensie en karakteristieke impedansie getransformeer word. Die ABCD-parameters van 'n ideale-transmissielyn word in figuur 2-7 gegee [20].



Figuur 2-7: Die ABCD-parameters van 'n transmissielyn

Die elektriese lengte van die transmissielyn word deur θ voorgestel en Z_0 stel die karakteristieke impedansie van die lyn voor. Volgens Ramo [18] kan die elektriese lengte van 'n golfleierseksie beskryf word deur vergelyking (2-4).

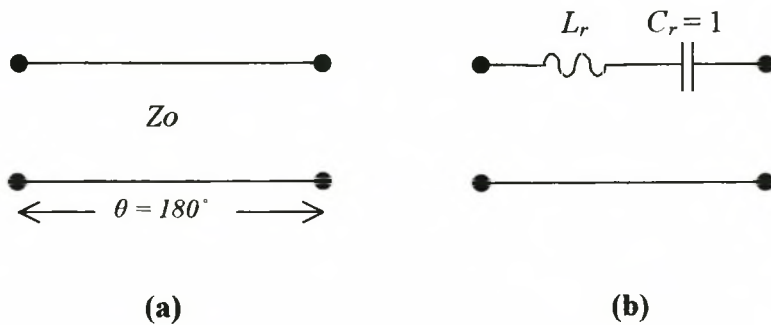
$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad (2-4)$$

In vergelyking (2-4) is l die lengte van die resoneerder voor kompensasië vir die irisse se ladingseffek en λ_g is die golflengte van 'n golf in die golfleier soos bereken deur vergelyking (2-5) [18]. Vergelyking (2-5) veroorsaak 'n frekwensie transformasie van die ideale transmissielynverloop sodat dit die golfleierseksie korrek beskryf.

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{3.412R}\right)^2}} \quad (2-5)$$

waar R die radius van die silindriese golfleier is, en $\lambda = \frac{c}{f}$.

Dit is verder nodig om die karakteristieke impedansie van die transmissielynmodel te bepaal wat nodig is om die resoneerders korrek te modelleer. Dit is gedoen deur die puntelementvoorstelling van 'n resoneerder te vergelyk met die halfgolflengte transmissielynvoorstelling daarvan. Die uitdrukking in vergelyking (2-6) word deur Cohn [24] gevind, om die verband tussen die twee resoneerdervoorstellings in figuur 2-8 te gee.



Figuur 2-8: Transmissielynvoorstelling (a) en puntelementvoorstelling (b) van 'n halfgolflengte golfleierresoneerder

$$L_r = \frac{\pi Z_0}{2\omega_0 w} \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_{g2}} - \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_{g1}} \right) \quad (2-6)$$

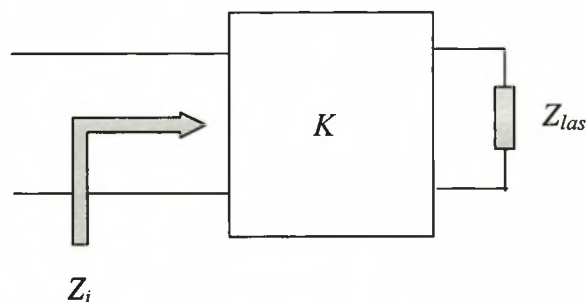
In vergelyking (2-6) is w die relatiewe bandwydte van die filter, λ_{g2} en λ_{g1} die golflengtes in die golfleier by die ente van die deurlaatband en λ_{g0} die golflengte by die sentrefrekwensie van die filter. Laasgenoemde lengtes word met behulp van vergelyking (2-5) bereken. Vir die

puntelementvoorstelling van die filter sal $Z_0 = L_r$. Dit volg dus dat die modellering van die resoneerders deur die transmissielynmodel vereis dat die karakteristieke impedansie van die puntelementmodel vermenigvuldig word met die faktor in vergelyking (2-7).

$$\frac{Z_0|_{T\text{-lyn}}}{Z_0|_{\text{puntelement}}} = \frac{2}{\pi \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_{g2}} - \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_{g1}} \right)} = 0.36289 \quad (2-7)$$

2.4.2 Modellering van die impedansie-omkeerders

Dit is baie algemeen om die koppeling tussen die resoneerders van 'n gekoppelde-resoneerder filter deur 'n impedansie-omkeerder voor te stel. 'n Algemene impedansie-omkeerderstroombaan word in figuur 2-9 getoon.

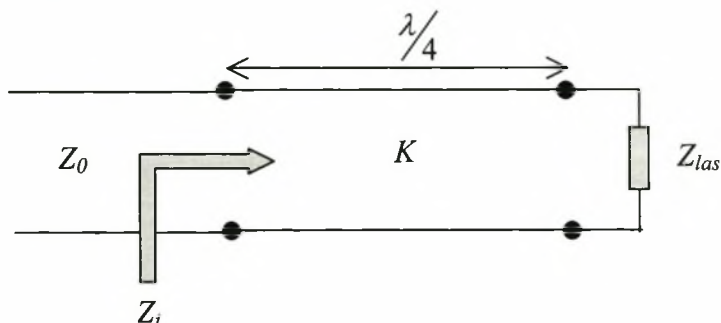


Figuur 2-9: 'n Algemene impedansie-omkeerderstroombaan

'n Impedansie-omkeerder is 'n stroombaan wat die verhouding in vergelyking (2-8) laat geld.

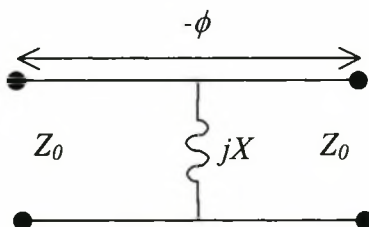
$$Z_i = \pm \frac{K^2}{Z_{las}} \quad (2-8)$$

In vergelyking (2-8) is K 'n konstante wat die koppeling beskryf, Z_i is die intree-impedansie en Z_{las} die impedansie van die las. Hierdie eenhede word deur figuur 2-9 verduidelik. Die bekendste impedansie-omkeerderstroombaan is die kwartgolf lengte transmissielyn, soos in figuur 2-10 getoon is. Vir die stroombaan is die waarde van K gelyk aan die karakteristieke impedansie van die kwartgolf lengte transmissielyn.



Figuur 2-10: Die impedansie-omkerende effek van 'n kwartgolf lengte transmissielyn

Daar is verskeie stroombane wat die impedansie-omkerende eienskap van 'n kwartgolf-transformator oor 'n breë bandwydte het. Die stroombaan in figuur 2-11 is so 'n stroombaan wat deur Cohn [24] gegee word en wat in hierdie model gebruik is. Hierdie stroombaan werk ook goed saam met transmissielynstroombane.



Figuur 2-11: Die impedansie-omkeerderstroombaan wat gebruik is

In Cohn [24] word vergelykings (2-9) afgelei vir hierdie stroombaan. Let op dat hierdie model 'n negatiewe fasebydrae het. Die Z_0 wat in hierdie model gebruik word, sal dieselfde gekies word as die Z_0 van die resoneerders wat die impedansie-omkeerders begrens.

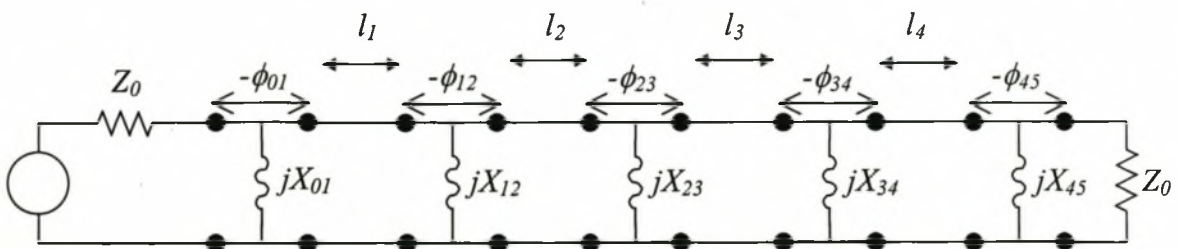
$$Z_i = -\frac{K^2}{Z_{las}}, \quad \frac{X}{Z_0} = \frac{\frac{K}{Z_0}}{1 - \left(\frac{K}{Z_0}\right)^2} \quad \text{en} \quad \phi = \tan^{-1}\left(2\frac{X}{Z_0}\right) \quad (2-9)$$

Cohn [24] noem dat 'n induktiewe iris of pen in 'n golfleier 'n reaktansie het wat proporsioneel aan $\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g}$ varieer. So word die koppeling van hierdie model frekwensie-afhanklik gemaak deur die X' waarde wat in vergelyking (2-10) getoon word, te gebruik.

$$X' = \frac{\lambda_{g0}}{\lambda_g} X \quad (2-10)$$

2.4.3 Die berekening van die model se s-parameterverloop

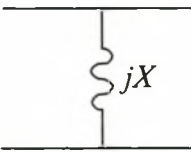
Die stroombaan wat verkry word indien die impedansie-omkeerdermodel in figuur 2-11 die K -blokke in figuur 2-6 vervang, word in figuur 2-12 getoon.



Figuur 2-12: Die model met golfleierresoneerders en frekwensie-afhanklike impedansie-omkeerders

Die negatiewe elektriese lengte van die impedansie-omkeerdermodel, $-\phi_{ij}$, kan afgetrek word van die elektriese lengte van die resoneerders, θ_i , weerskante van die impedansie-omkeerder. Die

elektriese lengte van die resoneerders word bereken deur vergelyking (2-4), maar elke resoneerder se elektriese lengte word verminder met die helfte van die elektriese lengte van die omkeerders, aan beide kante van die resoneerder. Die ABCD-parameters van die golfleierresoneerders met die verminderde elektriese lengte kan nou bereken word, soos beskryf is in afdeling 2.4.1. Die reaktansie van die impedansie-omkeerders se ABCD-parameters kan ook maklik bepaal word met die vergelykings in figuur 2-13 [20].



$$\begin{aligned}
 A &= 1 & B &= 0 \\
 C &= -j\frac{1}{X} & D &= 1
 \end{aligned}$$

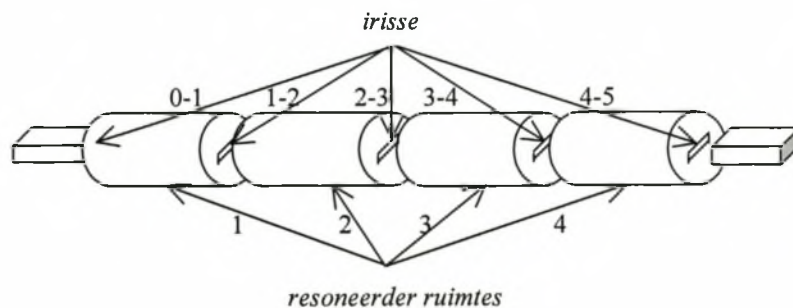
Figuur 2-13: Die ABCD-parameters van 'n induktor

Die ABCD-parameters van die hele filter word nou bereken deur al die resoneerders met die verminderde elektriese lengtes se ABCD-matrikse in volgorde te vermenigvuldig met die reaktansie van die impedansie-omkeerders se ABCD-matrikse. Die ABCD-parameters van die filter kan nou na s-parameters getransformeer word deur vergelykings (2-11) [20].

$$\begin{aligned}
 S_{11} &= \frac{A + B/Z_0 - CZ_0 - D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \\
 S_{12} &= \frac{2(AD - BC)}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \\
 S_{21} &= \frac{2}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D} \\
 S_{22} &= \frac{-A + B/Z_0 - CZ_0 + D}{A + B/Z_0 + CZ_0 + D}
 \end{aligned} \tag{2-11}$$

2.5 Marcuvitz-model

Met hierdie model is daar gepoog om die modellering so na as moontlik aan die fisiese afmetings van die filter te hou. Hierdie model is minder algemeen as die modelle wat vroeër bespreek is, aangesien dit slegs 'n spesifieke tipe koppeling en 'n spesifieke tipe resoneerder beskryf. Soos in afdeling 2.2 getoon is, word die koppeling in die voorbeeldfilter gerealiseer deur irisse. In die algemeen kan irisse baie verskillende vorms aanneem, maar in die voorbeeldfilter is daar spesifiek van reghoekige irisse gebruik gemaak. Daar word verder van golfleierseksies van effens minder as 'n halfgolflengte lank gebruik gemaak om die resoneerders te realiseer. Soos reeds genoem, is die fisiese resoneerders effens korter as 'n halfgolflengte vanweë die ladingseffek van die irisse. Die model maak van ekwivalente modelle vir die irisse en golfleierseksies gebruik om die filter voor te stel. In figuur 2-14 is 'n skets van die voorbeeldfilter met die resoneerders uit mekaar getrek om die irisse te toon.



Figuur 2-14: Die voorbeeldfilter met die resoneerderseksies uit mekaar getrek om die reghoekige irisse te toon

2.5.1 Modelling van die resoneerders

Die resoneerders word op dieselfde wyse gemodelleer as die resoneerders wat in afdeling 2.4.1 bespreek is. Die ABCD-parameters van die golfleier word bereken met die vergelykings vir 'n ideale-transmissielyn soos in figuur 2-7, waarvan die karakteristieke impedansie getransformeer word met vergelyking (2-7) en waarin die elektriese lengte bereken word deur vergelyking (2-12).

$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda_g} l \quad (2-12)$$

waar l die lengte van die spesifieke golfleierseksie is, na kompensasie vir die irisse se ladingseffek, en λ_g bereken word deur vergelyking (2-5).

Hierdie model verskil van die model in afdeling 2.4 in die opsig dat die resoneerders nie almal die model van afdeling 2.4, wat die koppeling deur middel van impedansie-omkeerders modelleer, modelleer hierdie model die irisse volledig. Die lengtes van die golfleierseksies wat fisies gemeet word, is dus gebruik.

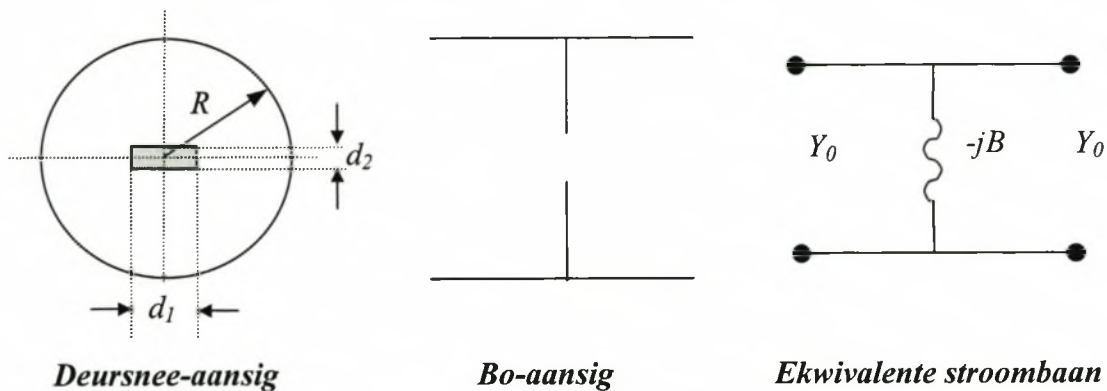
2.5.2 Modelling van die irisse

Die model van die iris hang af van die tipe golfleier wat weerskante van die iris is, die posisie van die iris in die golfleier en die magnetiese polariseerbaarheid, M_p , van die iris. In Marcuvitz [19] is modelle vir irisse tussen twee silindriese golfleiers asook vir irisse tussen 'n silindriese en 'n reghoekige golfleier, in terme van die magnetiese polariseerbaarheid van die iris en die posisie van die iris. Hierdie irisse kan gemodelleer word as 'n induktor in parallel soos in figure 2-15 en 2-16 getoon word. Vir die voorbeeldfilter is die iris se posisie in die middel van die golfleier en die modelle wat hier getoon word, aanvaar dit ook. M_p word dus as die parameter gebruik waarmee die koppeling beskryf word. In Matthaai [11] is grafieke gegee wat die M_p van 'n dun reghoekige

iris in verband bring met sy afmetings. Dit word verder bespreek in afdeling 2.6 waar die voorbeeldfilter geanaliseer word.

2.5.2.1 Iris tussen twee silindriese golfleiers

Figuur 2-15 toon die model wat in Marcuvitz [19] gegee is vir irisse tussen twee silindriese golfleiers getoon.



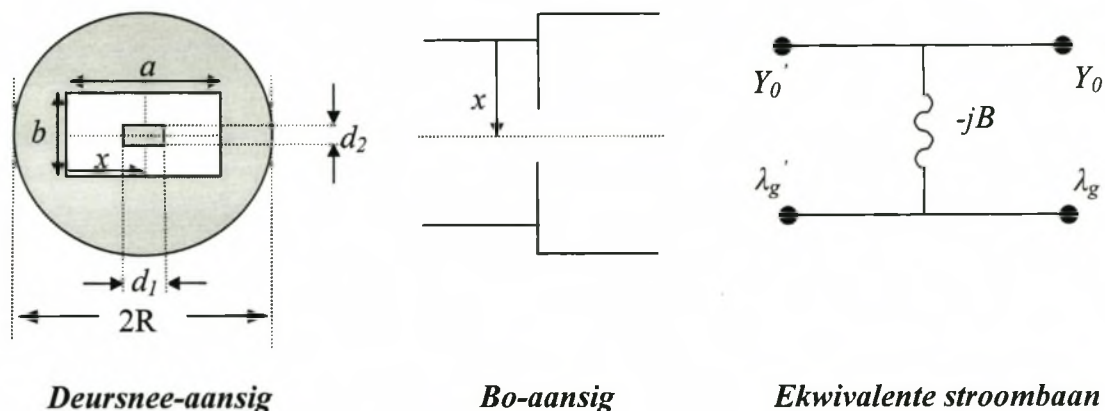
Figuur 2-15: Die irismodel wat in Marcuvitz [19] voorgestel word vir 'n iris tussen twee silindriese golfleiers

Die induktor van die ekwivalente stroombaan se waarde kan nou bepaal word deur vergelyking (2-13) waar Mp die magnetiese polarisasie is, λ_g die golflengte in die golfleier is wat deur vergelyking (2-5) bereken word en al die ander veranderlikes verduidelik word in figuur 2-15.

$$\frac{B}{Y_0} = \frac{\lambda_g}{4R} \left[\frac{(2R)^3}{8.40Mp} - 2.344 \right] \quad (2-13)$$

2.5.2.2 Iris tussen reghoekige en silindriese golfleier

Die model van hierdie iris wat in Marcuvitz [19] voorkom, word deur figuur 2-16 beskryf. Die induktor van die ekwivalente stroombaan se waarde kan bepaal word deur vergelyking (2-14).



Figuur 2-16: Die irismodel wat in Marcuvitz [19] voorgestel word vir 'n iris tussen 'n silindriese en 'n reghoekige golfleier

$$\frac{B}{Y_0'} = \frac{\lambda_g' ab}{4\pi} \left\{ \frac{1}{Mp} - \left[\frac{2\pi}{a^2 b} + \frac{7.74}{2\pi R^3} \right] \right\} \quad (2-14)$$

In vergelyking (2-14) is Mp die magnetiese polariseerbaarheid van die iris, Y_0' is die karakteristieke admittansie van die reghoekige golfleier wat deur vergelyking (2-15) bereken word en λ_g' is die golflengte in die reghoekige golfleier wat deur vergelyking (2-16) bereken word. Die ander veranderlikes het te doen met die afmetings van die golfleiers en word in figuur 2-16 verduidelik.

$$Y_0' = Y_0 \frac{0.952 \lambda_g \pi R^2}{\lambda_g' ab} \quad (2-15)$$

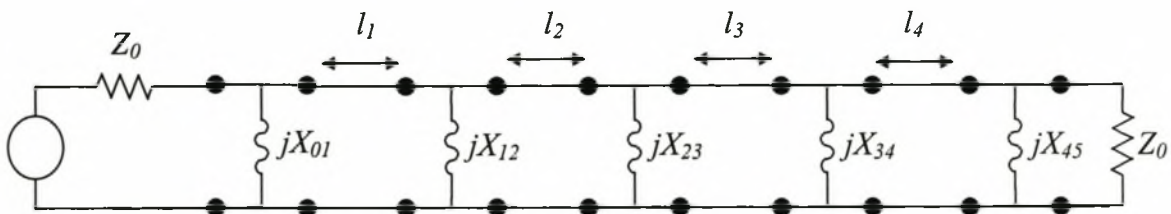
In vergelyking (2-15) is Y_0' is die karakteristieke admittansie van die reghoekige golfleier, Y_0 is die karakteristieke admittansie van die silindriese golfleier, λ_g' is die golflengte in die reghoekige golfleier wat deur vergelyking (2-16) bereken word en λ_g is die golflengte in die silindriese golfleier wat deur vergelyking (2-5) bereken word. Die ander veranderlikes het te doen met die afmetings van die golfleiers en word in figuur 2-16 verduidelik.

$$\lambda_g' = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}} \quad (2-16)$$

waar a die breedte van die reghoekige golfleier is, soos in figuur 2-16 en $\lambda = \frac{c}{f}$.

2.5.3 Die berekening van die model se s-parameterverloop

Die stroombaan wat verkry word indien die iris-modelle en die transmissielyne saamgevoeg word, word in figuur 2-17 getoon.



Figuur 2-17: Die stroombaan van die Marcuvitz-model

Die model word op presies dieselfde wyse opgelos as die model van afdeling 2.4. Hier word egter geen elektriese lengte van die resoneerder afgetrek nie. Die ABCD-parameters van die resoneerders word bereken soos beskryf in afdeling 2.5.1. Verder word die induktor-model van die irisse se ABCD-parameters bepaal met die vergelykings in figuur 2-13. Die induktorwaardes word

bereken deur die vergelykings in afdeling 2.5.2. Die ABCD-parameters van die hele filter word nou bereken deur al die resoneerders se ABCD-matrikse in volgorde te vermenigvuldig met die induktore se ABCD-matrikse. Die ABCD-parameters van die filter kan nou na s-parameters getransformeer word deur vergelykings (2-11).

2.6 Simulering van die voorbeeldfilter

Ten einde die voorbeeldfilter te kan simuleer met die bespreekte modelle is dit nodig om die parameterwaardes vir elk van die modelle in verband te bring met die fisiese afmetings van die filter. Die bespreking hieronder word onderverdeel in die vind van beskrywende parameters vir die irisse, die golfleierresoneerders en die golfleierseksies aan die ente van die filter. Die voorbeeldfilter word daarna deur die verskillende modelle in afdeling 2.6.4 gesimuleer en die verlope wat verkry word, word met mekaar vergelyk.

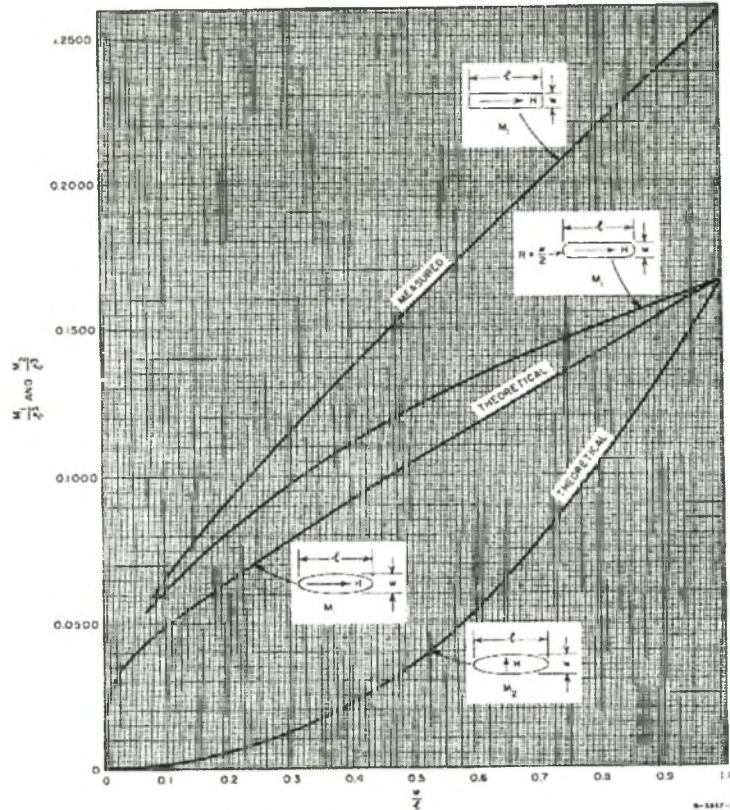
2.6.1 Beskrywende parameters vir die irisse

In tabel 2-1 word die afmetings van die reghoekige irisse van die voorbeeldfilter getoon. Die eerste stap in die vind van beskrywende parameters vir hierdie irisse is om die magnetiese polariseerbaarheid daarvan te vind. Figuur 2-18, uit Matthaei [11, p. 234], gee 'n verband tussen die gemete magnetiese polariseerbaarheid van 'n dun reghoekige iris en die iris se lengte en hoogte afmetings. Hierdie grafiek is egter net geldig indien die iris se dimensies baie klein is in vergelyking met die golflengte en dit neem ook nie die eindige dikte van die iris in ag nie. As hierdie faktore 'n beduidende bydrae lewer, moet die korreksierme wat deur Cohn in [21] voorgestel is en in vergelyking (2-17) saamgevat word, gebruik word om die korrekte waarde vir die magnetiese polariseerbaarheid te vind.

$$Mp'_{mn} = \frac{Mp_{mn}}{1 - \left(\frac{\lambda_{ca}}{\lambda}\right)^2} 10^{-\left(\frac{2.73tA}{\lambda_{ca}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{ca}}{\lambda}\right)^2}\right)} \quad (2-17)$$

In vergelyking (2-17) is Mp'_{mn} die gekompenseerde magnetiese polariseerbaarheid en Mp_{mn} is die ongekompenseerde magnetiese polariseerbaarheid wat afgelees word van die grafiek in figuur 2-18. Die vrye-ruimte golflengte by die afsnyfrekwensie van die laagste orde in die golfleier

word deur λ_{ca} voorgestel. Dit kan benader word as $\lambda_{ca} = 2l_i$ waar l_i die lengte van die iris is. Verder is t die dikte van die iris en A 'n empiriese konstante wat benader kan word as $A = 3$, indien $t < 0.02l_i$, en $\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{c}{10GHz} = 30mm$.



Figuur 2-18: Die magnetiese polariseerbaarheid van reghoekige, geronde-ente en elliptiese irisse as 'n funksie van die iris se hoogte(w) en lengte(l) afmetings [11]

Die gekompenseerde en ongekompenseerde magnetiese polariseerbaarheid wat so gevind is vir die irisse van die voorbeeldfilter word in tabel 2-5 getoon.

Iris	Afmetings [mm]	Ongekompenseerde magnetiese polariseerbaarheid	Gekompenseerde magnetiese polariseerbaarheid
0-1 en 4-5	10.9×2.62×0.125	1.3013×10 ⁻⁷	2.5640×10 ⁻⁷
1-2 en 2-3	8.5×1.53×0.125	5.2578×10 ⁻⁸	6.9133×10 ⁻⁸
3-4	7.6×1.75×0.125	4.3134×10 ⁻⁸	5.0794×10 ⁻⁸

Tabel 2-5: Die gekompenseerde en ongekompenseerde magnetiese polarisasie van die irisse in die voorbeeldfilter

Die K -waarde van 'n impedansie-omkeerderstroombaan kan ook in terme van die gekompenseerde magnetiese polariseerbaarheid, Mp , van die iris beskryf word deur die uitdrukkings van Williams [22] wat in vergelykings (2-18) en (2-19) gegee word. Vir koppeling tussen die twee silindriese golfleiers van die interne irisse geld vergelyking (2-18).

$$K_{mn} = \frac{Mp_{mn} \lambda_0^2}{l_c^3 3R^2} \quad (2-18)$$

In vergelyking (2-18) is Mp die magnetiese polariseerbaarheid van die iris en l_c is die ongekompenseerde lengte van die resoneerders met $l_c = \frac{\lambda_{g0}}{2}$ waar λ_{g0} uit vergelyking (2-5) volg.

Verder is $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$ en R is die radius van die silindriese golfleier. Vir die buitenste twee irisse, wat na die reghoekige golfleier aan die buitekant van die filter koppel, geld vergelyking (2-19).

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{Mp_{mn}^2 4\pi\lambda_0^2}{abl_c^3 \lambda_{rect} 3R^2} \quad (2-19)$$

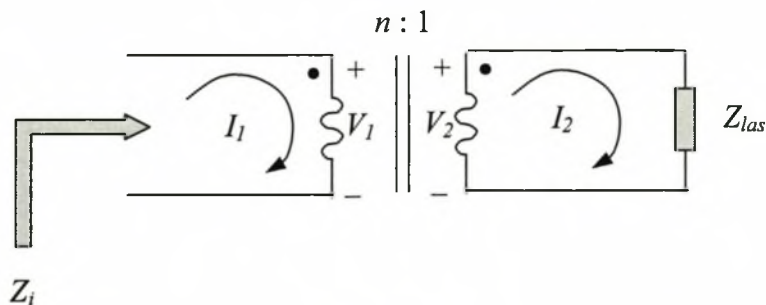
In vergelyking (2-19) is die ongekompenseerde lengte van die resoneerders weer $l_c = \frac{\lambda_{g0}}{2}$. Verder

is $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$, R is die radius van die silindriese golfleier, a en b is die afmetings van die reghoekige

golfleier, λ_{rect} is die golflengte in die reghoekige golfleier en Q_e is die eksterne kwaliteitsfaktor van die filter. Volgens Williams [22] kan die eksterne kwaliteitsfaktor, Q_e , van die filter deur 'n lasweerstand, R_L , aan die genormaliseerde stroombaanmodel van die filter voorgestel word, waar $R_L = \frac{1}{Q_e}$. Die stroombaanmodel waarna Williams [22] hier verwys, is die klassieke model van die

filter wat in figuur 2-5 getoon is. Die waarde wat so vir R_L gevind is, vir M_{01} en M_{45} wat in tabel 2-5 getoon word, is $R_L = 0.0191\Omega$.

Hierdie lasweerstand kan ook voorgestel word deur ideale-transformators soos in die klassieke model van figuur 2-3. Uit Nilsson [34] weet ons dat die impedansie-aanpassing wat deur 'n ideale-transformator, soos in figuur 2-19, veroorsaak word deur die verhouding in vergelyking (2-20) gegee word. Hieruit volg dat die ideale-transformator se verhouding bepaal word deur $n = \sqrt{R_L}$ vir 'n genormaliseerde stroombaan met $Z_0 = 1$. Die ideale-transformator se verhouding wat so vir beide kante van die filter bepaal is, word in tabel 2-6 getoon.



Figuur 2-19: Impedansie-omkering deur 'n ideale-transformator

$$Z_i = n^2 Z_{las} \tag{2-20}$$

Die lasweerstand kan ook voorgestel word deur 'n impedansie-omkeerder. Daar moet in ag geneem word dat die Cohn-model, wat van impedansie-omkeerders gebruik maak, 'n

$Z_0 = 0.3629$ gebruik om die resoneerders voor te stel. Die stroombaan is dus by $Z_0 = 0.3629$ aangepas en nie by $Z_0 = 1$, soos vir die klassieke model nie. Die K -waarde van die impedansie-omkeerder word deur vergelyking (2-21) bereken, wat direk volg uit die definisie van impedansie-omkeerders en deur figuur 2-9 en vergelyking (2-9) saamgevat word.

$$K = \sqrt{Z_0 R_L} \quad (2-21)$$

Die K -waardes wat ooreenstem met elk van die irisse word bereken deur vergelykings (2-18) en (2-21) vir die interne en eksterne irisse onderskeidelik en word in tabel 2-6 getoon.

Die klassieke model wat in afdeling 2.3 bespreek is, maak van gemene-induktansie gebruik om die interne koppeling voor te stel. Daar word in Bylae A getoon dat die voorstelling van koppeling deur middel van impedansie-omkeerders of gemene-induktansiestroombane ekwivalent is. Die gemene-induktansies wat van toepassing is op die klassieke model kan dus gelyk geneem word aan die K -waardes en dit word ook in tabel 2-6 getoon.

Iris	Koppeling	Gemene-induktansie	Ideale-transformator-verhouding
0-1 en 4-5	0.08325	—	0.13820
1-2 en 3-4	0.01474	0.01474	—
2-3	0.01083	0.01083	—

Tabel 2-6: Die K -waardes van die impedansie-omkeerders, gemene-induktansiewaardes en ideale-transformator-verhoudings wat van toepassing is op die irisse van die voorbeeldfilter

2.6.2 Beskrywende parameters vir die resoneerders

Die afmetings van die golfleierseksies wat die resoneerders van die filter voorstel, is gegee in tabel 2-2. Die golflengte in die golfleier van die filter, λ_g , kan bepaal word met behulp van vergelyking (2-5). By die sentrefrekwensie sal $\lambda = \lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{c}{10GHz} = 30\text{mm}$ en $R = 13.4\text{mm}$, soos gegee in tabel 2-2. Dit lewer 'n golflengte van $\lambda_{g0} = 39.71\text{mm}$ by die sentrefrekwensie van die filter. Die lengte van 'n halfgolflengte-resoneerder sal dus 19.86mm wees. Daar is in afdelings 2.4.1 en 2.5.1 genoem dat die resoneerderlengtes verkort moet word om te kompenseer vir die ladingseffek van die irisse. Hierdie lengtes word dus die gekompenseerde resoneerderlengtes genoem en die halfgolflengte die ongekompenseerde lengtes. Verder is die ideale ongekompenseerde waarde nie gelyk aan die fisiese meting van die resoneerderseksies nie, aangesien die lengtes ook met 'n verdere 2% verkort is om die instelling moontlik te maak. Die ongekompenseerde resoneerderlengtes word in tabel 2-7 getoon.

l_1	l_2	l_3	l_4
19.86mm	19.86mm	19.86mm	19.86mm

Tabel 2-7: Die ongekompenseerde resoneerderlengtes van die voorbeeldfilter

Om die gekompenseerde resoneerderlengtes te bereken is dit nodig om die ladingseffek van elk van die irisse te gaan bepaal. Dit kan gedoen word deur die iris te vergelyk met 'n impedansie-omkeerderstroombaan. In figuur 2-11 is 'n impedansie-omkeerderstroombaan getoon wat bestaan uit 'n parallelle induktor met 'n negatiewe elektriese lengte. Verder toon afdeling 2.5.2 dat 'n iris voorgestel kan word deur 'n parallelle induktor. Die negatiewe elektriese lengte van die impedansie-omkeerderstroombaan stel dus die lengte voor waarmee die halfgolflengte-resoneerders verkort moet word om die ladingseffek van die irisse te beskryf. Die elektriese lengte van hierdie stukkie lyn kan gevind word as 'n funksie van die iris se reaktansie soos in vergelyking (2-9) getoon word. Die verband tussen 'n golfleierseksie se elektriese lengte en fisiese lengte word deur vergelyking (2-4) gegee. Verder toon vergelyking (2-9) hoe die reaktansie van

die iris gevind kan word indien die koppelingswaarde bekend is. Bogenoemde kan saamgevat word in vergelyking (2-22).

$$\Delta l = \frac{\lambda_{g0}}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{2 \frac{K}{Z_0}}{1 - \left(\frac{K}{Z_0} \right)^2} \right) \quad (2-22)$$

In vergelyking (2-22) is Δl die lengte waarmee 'n resoneerder verkort moet word, K is die koppelingswaarde van die impedansie-omkeerder en λ_{g0} is golflengte by die sentrefrekwensie. Die waarde van Δl kan ook bepaal word deur die reaktansie van die iris vanuit die Marcuvitz-model vir die filter, wat in afdeling 2.5 bespreek is, te bereken. Hier sal vergelyking (2-23) gebruik word.

$$\Delta l = \frac{\lambda_{g0}}{\pi} \tan^{-1} \left(2 \frac{Y_0}{B} \right) \quad (2-23)$$

Al wat verander in hierdie vergelyking is dat B bereken word vanuit die iris-modelle in afdeling 2.5.2. Die waarde van Δl vir elk van die irisse in die voorbeeldfilter is bereken en word in tabel 2-8 getoon. Die waarde wat vir Δl in die ontwerpverslag van die filter bereken is, word ook getoon [15]. Die vergelyking van die waardes toon dat die waarde van Δl wat vir irisse 0-1 en 4-5 in die ontwerp van die filter gebruik is, heelwat minder is as die waardes wat deur die ander metodes bereken is.

	Irisse 0-1 en 4-5	Irisse 1-2 en 3-4	Iris 2-3
Δl uit K bepaal	1.428 mm	0.258 mm	0.189 mm
Δl uit Marcuvitz-model	1.555 mm	0.278 mm	0.199 mm
Δl in ontwerpverslag	0.95 mm	0.29 mm	0.21 mm

Tabel 2-8: Die kompensasielengte Δl waarmee aangrensende resoneerders verklein moet word vir elke iris van die voorbeeldfilter

Die Marcuvitz-model het die mees ideale verloop gehad met die lengtes wat bereken is volgens die Marcuvitz-irismodelle. Daar is dus verder gebruik gemaak van hierdie Δl -waardes wat deur vergelyking (2-23) bereken is en die gekompenseerde lengtes van die resoneerders word in tabel 2-9 gegee. Om die instelling met die stelskroewe moontlik te maak is elke ruimte ook met 'n verdere 0.4mm verkort. Vir die simulering van die ingestelde filter word hierdie 0.4mm egter nie afgetrek nie.

l_1	l_2	l_3	l_4
18.02 mm	19.38 mm	19.38 mm	18.02 mm

Tabel 2-9: Die gekompenseerde resoneerderlengtes van die voorbeeldfilter

Die Cohn-model in afdeling 2.4 maak van die ongekompenseerde lengtes gebruik en die Marcuvitz-model in afdeling 2.5 maak van die gekompenseerde resoneerderlengtes gebruik. Die klassieke model in afdeling 2.3 maak van 'n puntelementresoneerder gebruik. In laasgenoemde model kan die resoneerder se impedansie van die genormaliseerde stroombaan geskryf word soos in vergelyking (2-24) en resonansie sal voorkom by die frekwensie waar $S_n = 0$.

$$S_n = j\left(\omega - \frac{1}{\omega C_n}\right) \quad (2-24)$$

Hieruit volg dat die resonansiefrekwensie van die ingestelde filter gaan voorkom indien $C_n = 1$ vir al die resoneerders.

Verder is daar in afdeling 2.4.1 gewys dat indien daar van 'n transmissielynvoorstelling van die resoneerder gebruik gemaak word dat dit nodig is om die regte Z_0 daarvoor te gebruik. Daar is met behulp van vergelyking (2-7) gevind dat die Z_0 van die puntelementvoorstelling vermenigvuldig moet word met 0.36289 om die Z_0 van die transmissielynvoorstelling te vind wat dieselfde bandwydte sal realiseer.

2.6.3 Beskrywende parameters vir die golfleiers aan die ente

Die modelle in afdelings 2.4 en 2.5 modelleer die resoneerders reeds as golfleierseksies en daar kan dus sonder veel moeite nog twee golfleierseksies aan die ente van die model gevoeg word. Die klassieke model modelleer egter nie golfleierseksies nie. In hierdie model is 'n fase afgetrek van die uiteindelijke s-parameters. Dit kan gedoen word omdat die golfleiers aan die ente van die filter slegs 'n fase bydrae het.

Die manier waarmee die fase van die s-parameters aangepas word, word beskryf in Pozar [20]. Die aanpassing kan gedoen word met vergelyking (2-25), waar die lengtes van die golfleierseksies aan beide ente van die filter ewe lank is.

$$S'_{nm} = e^{-2j\beta l} S_{nm} \quad (2-25)$$

In vergelyking (2-25) is S'_{nm} die aangepaste s-parameters en S_{nm} die oorspronklike s-parameters. Die lengte van elk van die golfleierseksies word deur l voorgestel en β word bereken deur vergelyking (2-26).

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (2-26)$$

waar $\lambda = \frac{c}{f}$, en a die breedte van die reghoekige golfleier.

Die lengte van die golfleier aan die ente van die filter is aan beide kante fisies gemeet as 55mm. Die naasliggende irisse belas egter hierdie golfleiers met die gevolg dat hulle langer gaan voorkom. Hierdie lengte waarmee die resoneerder langer gaan voorkom word bereken deur vergelyking (2-23). Die waarde vir Y_0 wat hier gebruik word, is egter die Y_0 van die reghoekige golfleier en kan gevind word deur vergelyking (2-15). Hieruit word bereken dat die lengte wat kompenseer vir die

lading van die buitenste irisse is 2.6mm. Die effektiewe lengte van elk van die golfleiers wat gemodelleer moet word, is dus 57.6mm.

2.6.4 Vergelyking van die verskillende modelle se simulاسie

Die parameters wat nodig is in die verskillende modelle is in die vorige gedeelte van afdeling 2.6 afgelei vanaf die fisiese afmetings van die filter. Die elementwaardes van die ingestelde voorbeeldfilter is vir elk van die modelle in tabel 2-9 getoon.

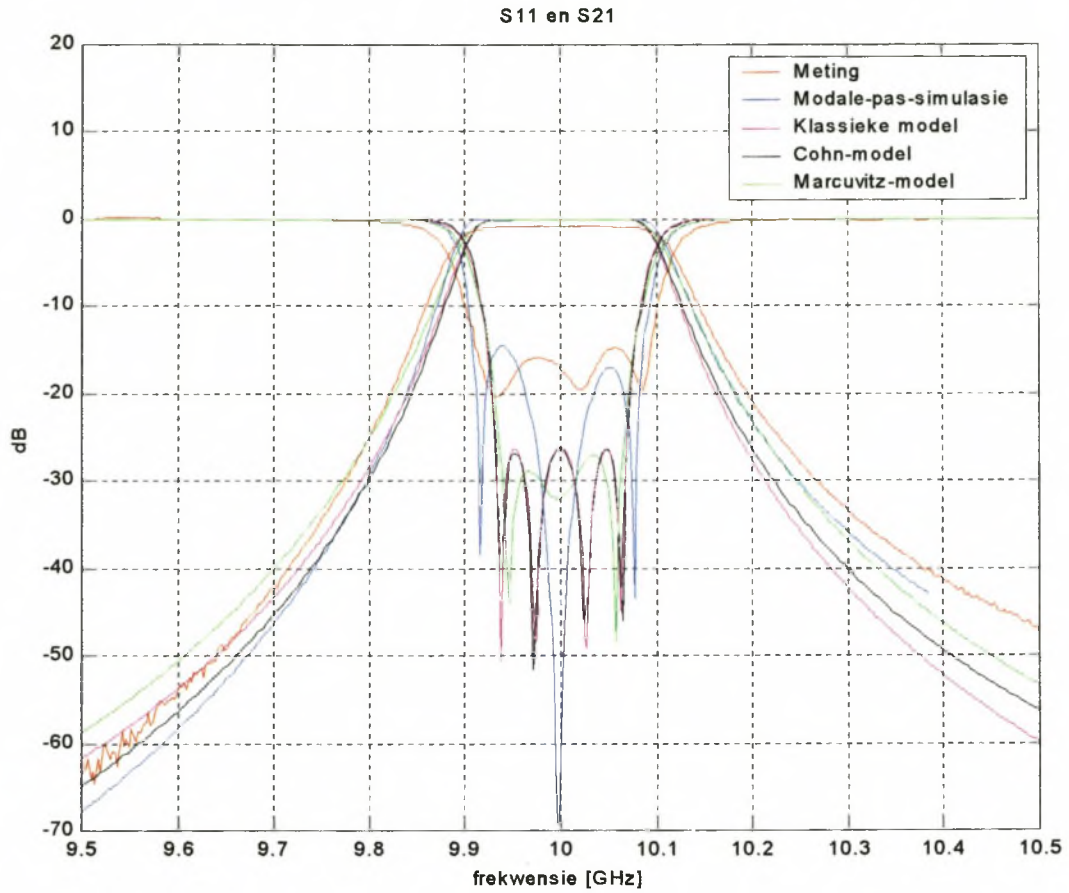
Die modelle se verlope word getoon saam met 'n redelike ingestelde gemete verloop van die filter en 'n gesimuleerde verloop wat deur 'n modale-pas-metode ("*mode-matching*") gevind is. Hierdie verlope is in frekwensie genormaliseer sodat al die kurwes makliker vergelyk kan word. Die senterfrekwensie van die oorspronklike meting was 9.99915GHz en dié van die modale-pas-simulasie was 10.110GHz. Vergelykende verlope word getoon vir die grootte, fase en polêre verband tussen grootte en fase van S_{21} en S_{11} van al die modelle, die meting en die modale-pas-simulasie. Die grootte-kurwes is in figuur 2-20, die fase in figuur 2-21 en die polêre verband tussen die grootte en fase in figuur 2-22.

Die afkortings wat vir die parameters gebruik is in tabel 2-10, en verder in die tesis, verwys na die volgende:

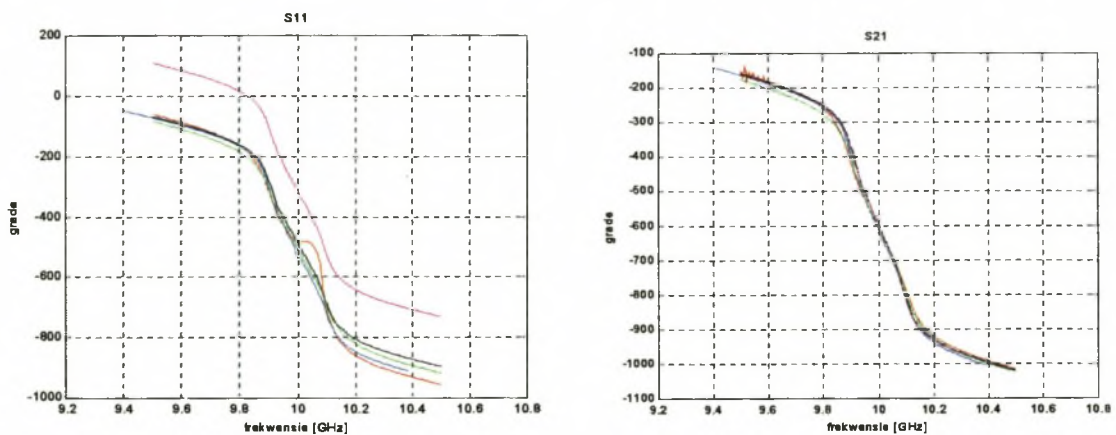
- g_1 en g_2 is die lengte van die golfleiers aan die ente
- C_i is die kapasitorwaarde van puntelementresoneerder i
- l_i die resoneerderlengte van resoneerder i
- M_{ij} gemene-induktansie tussen resoneerders i en j
- n_1 en n_2 is die ideale-transformator se verhouding
- K_{ij} koppelingswaardes tussen resoneerders i en j
- $M_{p_{ij}}$ magnetiese polariseerbaarheid van iris i - j

Klassieke model	g₁	g₂	C₁	C₂	C₃	C₄
	57.6mm	57.6mm	1F	1F	1F	1F
	n₁	M₁₂	M₂₃	M₃₄	n₂	
	0.13841	0.01474 H	0.01083 H	0.01474 H	0.13841	
Cohn-model	g₁	g₂	l₁	l₂	l₃	l₄
	57.6mm	57.6mm	19.86mm	19.86mm	19.86mm	19.86mm
	K₀₁	K₁₂	K₂₃	K₃₄	K₄₅	
	0.08325	0.01474	0.01083	0.01474	0.08325	
Marcuvitz-model	g₁	g₂	l₁	l₂	l₃	l₄
	57.6mm	57.6mm	18.02mm	19.38mm	19.38mm	18.02mm
	Mp₀₁	Mp₁₂	Mp₂₃	Mp₃₄	Mp₄₅	
	2.5640×10^{-7}	6.9133×10^{-8}	5.0794×10^{-8}	6.9133×10^{-8}	2.5640×10^{-7}	

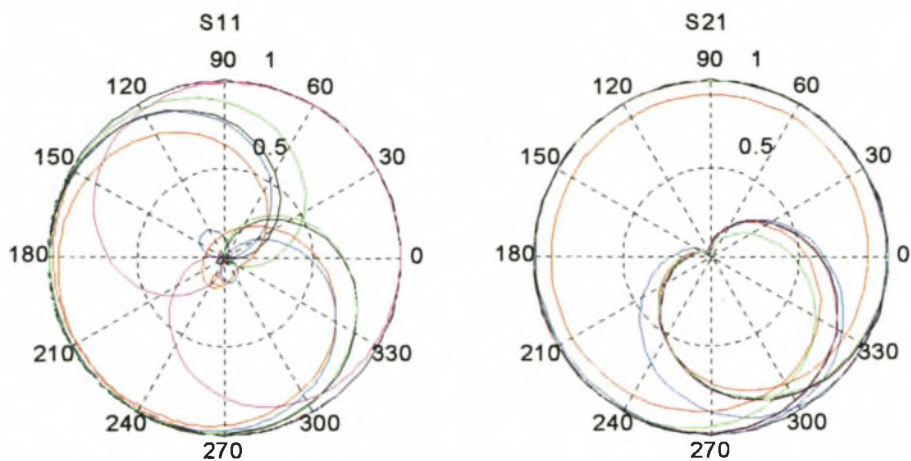
Tabel 2-10: Opsomming van die elementwaardes van die voorbeeldfilter vir die verskillende modelle



Figuur 2-20: Ideale verloop van S_{21} en S_{11} se grootte vir die voorbeeldfilter



Figuur 2-21: Ideale verloop van S_{21} en S_{11} se fase vir die voorbeeldfilter



Figuur 2-22: Polêre verband tussen die ideale grootte- en faseverloop van S_{21} en S_{11} vir die voorbeeldfilter

Al bogenoemde modelle stem baie goed ooreen met die gemete en modale-pas-gesimuleerde verloop van die filter. S_{11} se fase van die klassieke model is egter met 180° uit. Dit kan verwag word aangesien die puntelementvoorstelling van die golfleierresoneerder nie die 180° fasebydrae daarvan in ag neem nie. Verder word die koppeling na die generator en las in hierdie model voorgestel deur 'n ideale-transformator. Die ideale-transformator modelleer nie die fase-effek van hierdie koppeling nie.

2.7 Gevolgtrekking

In hierdie hoofstuk is moontlike modelle vir die voorbeeldfilter bespreek. Daar is drie moontlike ekwivalente stroombaanmodelle ondersoek. Al drie modelle lewer goeie resultate vir die voorbeeldfilter.

Die klassieke model, in afdeling 2.3, se grootste voordeel is die feit dat dit 'n baie algemene model is. Veral die gemak waarmee dit filters kan voorstel wat kruiskoppeling bevat, is van groot waarde. Daar is egter vasgestel dat die klassieke model se faseverloop nie noodwendig akkuraat is nie. Dit is wel moontlik om die model sonder veel moeite aan te pas sodat dit die fase akkuraat kan simuleer.

Dit lyk of die Cohn-model, in afdeling 2.4, wel 'n beter passing op die gemete en gesimuleerde verloop van die voorbeeldfilter lewer. Die verloop van hierdie model verskil egter nie veel van die klassieke model se verloop vir die voorbeeldfilter nie. Die voorbeeldfilter het maar 'n bandwydte van 2%, en moontlik sal die Cohn-model se groter akkuraatheid, eers belangrik word indien na filters met 'n breër bandwydte gekyk word. Die voorbeeldfilter is wel vinniger gesimuleer deur hierdie model. 'n Simulasie van al vier s-parameters vir die voorbeeldfilter by dieselfde aantal punte het ongeveer 3 maal langer geneem met die klassieke model as met die ander twee modelle.

Die grootste nadeel van die Marcuvitz-model, in afdeling 2.5, is dat dit nie 'n baie spesifieke model is nie. Dit werk tans slegs vir die voorbeeldfilter en dit kan nie maklik gebruik word om ander tipe filters te modelleer nie. Die spoed van hierdie model is vergelykbaar met die van die Cohn-model.

Dit sou moontlik wees om enige van die bespreekte modelle suksesvol te gebruik in die parameteronttrekkingsalgoritme van hierdie studie. Daar is besluit om die Cohn-model in die res van die studie te gebruik. Hierdie model modelleer die fase akkuraat en voer ook die vinnigste uit. Die model is ook nie so spesifiek soos die Marcuvitz nie.

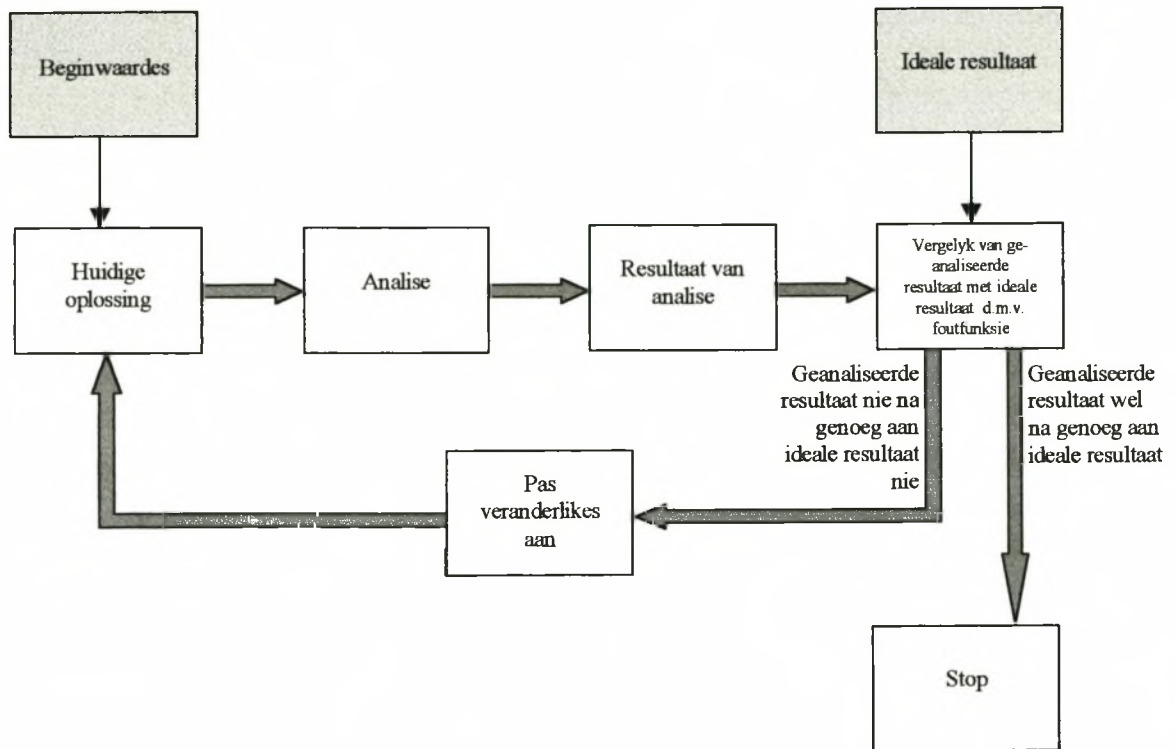
Hoofstuk 3

Die optimeringsalgoritme

3.1 Inleiding

'n Optimeringsalgoritme is 'n prosedure wat die minimum van 'n funksie op 'n numeriese wyse vind. Dit word veral gebruik om die oplossing vir multi-veranderlike probleme te vind waarvoor daar nie geskikte analitiese oplosmetodes bestaan nie. In figuur 3-1 word die werking van 'n algemene optimeringsalgoritme diagrammaties verduidelik. Die beginwaardes en ideale resultaat word deur die operateur van die proses verskaf en die lus herhaal totdat 'n oplossing gevind word waarvoor die geanaliseerde resultaat na genoeg aan die ideale resultaat is. Die vergelyking van die geanaliseerde resultaat met die ideale resultaat word gedoen met 'n foutfunksie wat die verskil tussen die twee resultate op 'n vasgestelde wyse bereken.

Deur te kyk na die diagram in figuur 3-1 kan daar gesien word dat modelgebaseerde parameteronttrekking van 'n filter maklik as 'n optimeringsalgoritme gedefinieer kan word. Dit behels die vind van die model se parameters sodat die gesimuleerde verloop en die gemete verloop van die filter so na as moontlik aan mekaar kom. Die analise-blok is die modellering van die filter wat reeds in Hoofstuk 2 bespreek is. Dit lewer 'n gesimuleerde filterverloop (resultaat van analise) wat met behulp van 'n foutfunksie vergelyk word met die gemete filterverloop (ideale resultaat). Die aanpas van die veranderlikes word deur 'n spesifieke optimeringsmetode gedoen. Die beginwaardes word deur die operateur verskaf en die roetine termineer sodra die passing van die gesimuleerde verloop na genoeg aan die meting is. Die verskillende dele van die proses word verder in hierdie hoofstuk bespreek.



Figuur 3-1: 'n Diagrammatiese voorstelling van 'n algemene optimeringsalgoritme

3.2 'n Geskikte optimeringsmetode

Daar is baie verskillende algemene optimeringsmetodes in die literatuur beskikbaar wat in hierdie probleem gebruik kan word. Die keuse van die algemene optimeringsmetode wat gevolg word, sal natuurlik deurslaggewend wees in die sukses van die uiteindelijke proses. Dit is moeilik om 'n goeie keuse te maak, aangesien die sukses van 'n metode baie afhanklik is van die spesifieke probleem. Dit hang ook af van presies hoe die metode geïmplementeer word. Verder is dit moontlik om van meer as een verskillende optimeringsmetode gebruik te maak om verskillende fases van die optimering te behartig. In die meeste gevalle kan daar slegs 'n ingeligte keuse tussen moontlike metodes gemaak word deur die verskillende metodes te implementeer en die resultate te vergelyk. Om al die opsies te implementeer sou baie tydrowend wees. Daar is dus ondersoek ingestel na die moontlike optimeringsmetodes om vas te stel watter metodes hulle leen tot die spesifieke probleem. Verder is daar gekyk na die optimeringsmetodes, wat in verwante probleme in die literatuur gebruik is.

Die optimeringsmetode waarna gesoek word, moet so bestand moontlik wees teen tekortkominge in die filtermodel, metings met ruis en swak beginwaardes. Verder moet die roetine vinnig wees om die instellingsproses maksimaal te versnel.

Voor 'n bespreking gegee word van optimeringsmetodes wat in verwante probleme in die literatuur gebruik is, is dit nodig om die agtergrond te skets van die verskillende tipes optimeringsmetodes. In tabel 3-1 volg 'n uiteensetting van groepe waarin optimeringsmetodes ingedeel kan word. Direkte soekmetodes is metodes wat slegs gebruik maak van die direkte evaluering van die foutfunksie. Gradiëntmetodes maak ook van die afgeleides van die foutfunksie gebruik om die oplossing te vind.

Direkte soekmetodes		Gradiëntmetodes	
Tabelleringsmetodes	Willekeurig	Steilste-gradiëntmetodes	
	Rooster		
Geometriesgerigte-soektogte	Simpleks	Newton-metodes	
	<ul style="list-style-type: none"> Nelder & Mead 		
Lineêre-metodes	Patroonskuif-metodes <ul style="list-style-type: none"> Hooke & Jeeves 	Kwasi-Newton-metodes	Konjugaatgradiënt <ul style="list-style-type: none"> Fletcher-Reeves
	Kwadratiese-terminerende-metodes <ul style="list-style-type: none"> Powell se konjugaat-rigting-metode 		Metries-veranderlik ("Variable metric") <ul style="list-style-type: none"> Davidson-Fletcher-Powell (DFP) Broyden-Fletcher-Shanno (BFS)
Geleide-willekeurige metodes	Genetiese algoritmes	Kleinste-kwadraatmetodes (Gauss-Newton)	
	Gesimuleerde tempering ("Simulated-annealing")		

Tabel 3-1: 'n Indeling van optimeringsmetodes

Die tabelleringsmetodes genereer 'n aantal moontlike oplossings en neem die stel wat die kleinste fout lewer as die oplossing. Die moontlike oplossings word willekeurig gegenereer, of dit word geneem as die nodusse van 'n rooster in die foutfunksieruimte [13]. Die geometriesgerigte-metodes maak gebruik van 'n simplekse geometriese figuur, van dieselfde dimensie as die foutfunksieruimte, en laat die figuur so deur die foutfunksieruimte beweeg dat dit uiteindelik die minimum vind. Die beweging van die figuur word beheer op grond van die funksiewaardes op die nodusse van die figuur [13]. Die lineêre-metodes vind eers 'n optimeringsrigting en dan word die minimum in daardie rigting deur 'n eendimensionele soektog gevind. Die verskillende lineêre-metodes verskil ten opsigte van die manier waarop die soekrigting bepaal word [13]. Die geleidelike-willekeurige-metodes is verwant aan die tabelleringsmetodes in dié opsig dat dit ook 'n aantal moontlike oplossings genereer en dan evalueer. Die keuse van moontlike oplossings en evaluering daarvan is egter gebaseer op een of ander natuurlike proses. Die genetiese algoritmes boots die genetiese voortplantingsproses na terwyl die gesimuleerde-tempering-metode die tempering van metale naboots [33].

Die gradiënt-metodes kan in twee groepe verdeel word, naamlik metodes wat slegs van die eerste afgeleide van die foutfunksie gebruik maak en metodes wat ook van die tweede afgeleide gebruik maak. Die steilste-gradiëntmetode maak slegs van die eerste afgeleide gebruik, terwyl die ander metodes wat in tabel 3-1 getoon word ook van die tweede afgeleide gebruik maak. Die Newton-metodes maak van 'n kwadratiese passing op die foutfunksie gebruik om 'n soekrigting te bepaal. Daar word dan 'n lineêre soektog uitgevoer om die minimum in die soekrigting te vind. Daar word in hierdie metodes gebruik gemaak van die gradiëntvektor en die Hermitiese-matriks om die afskatting te maak [13]. Indien die Hermitiese-matriks nie eksplisiet bereken word nie, word die metode 'n kwasi-Newton-metode genoem [13]. Die laaste metode in tabel 3-1 is die kleinste-kwadraatmetode [13]. Hierdie metode is streng gesproke ook 'n kwasi-Newton-metode aangesien dit gegrond is op die Newton-metode, wat van die gradiëntvektor en Hermitiese-matriks gebruik maak om die oplossing te vind. Dit maak egter, soos die kwasi-Newton-metodes, van 'n benadering gebruik om die Hermitiese-matriks te bereken, soos in afdeling 3.5.2 verduidelik word. Die metode verskil van ander kwasi-Newton-metodes in die opsig dat dit van 'n som-van-kwadrante-foutfunksie gebruik maak, wat 'n baie spesifieke benadering van die Hermitiese-matriks moontlik maak.

Vervolgens is daar ondersoek ingestel na die optimeringsmetodes wat in verwante probleme in die literatuur gebruik is. In hierdie paragraaf is slegs gelet op die tipe optimeringsalgoritme wat in elk van die genoemde metodes gebruik is. Dit is gedoen met die doel om 'n idee te vorm van watter metodes algemeen gebruik word in die probleem van hierdie tesis. Dit is natuurlik nodig om elke metode in eie reg te bestudeer ten einde die spesifieke voor- en nadele daarvan te besef.

Daar is hoofsaaklik gelet op die algoritmes wat, soos in hierdie tesis, van modelgebaseerde parameteronttrekking gebruik maak om die filter in te stel en wat in afdeling 1.2.2.2 oorhoofs bespreek is [3,4,7,23,29,30]. In die metode van Accatino [3] word die Hooke en Jeeves-patroonskuif-metode gebruik in die parameteronttrekking. Die metode van Macchiarella [29] gebruik 'n kleinste-kwadraatmetode en vir die metodes van Harscher [23,30] word net genoem dat daar 'n gradiënt-metode aangewend is. Die metodes van Thal [4] en Kahrizi [7] noem nie die spesifieke optimeringsmetode wat benut word nie. Die tipe instellingsproses wat in afdeling 1.2.2.1 bespreek is en waarin 'n sensitiwiteitsanalise van die filterverloop gedoen word, [6,28], verskil baie van die parameteronttrekkingsprobleem. Die optimeringsmetodes wat hulle gebruik, is dus nie hier in ag geneem nie. Die sintese van 'n filter kan gedoen word deur middel van modelgebaseerde parameteronttrekking van die ideale filterverloop. Die optimeringsmetodes van hierdie tipe probleem is dus ook van toepassing op die probleem van hierdie tesis. Daar is twee sulke voorbeelde bestudeer [5,8]. Vir die metode van Atia [5] word net genoem dat daar van 'n gradiënt-metode gebruik gemaak word en die metode van Kudsia [8] maak van Fletcher se metries-veranderlike metode gebruik. Daar is ook na 'n modelgebaseerde parameteronttrekkingsmetode gekyk, wat die parameters van 'n GaAs FET uit die verloop daarvan, onttrek deur Van Niekerk [14]. Hier is 'n kleinste-kwadraatmetode aangewend. Laasgenoemde metode verskil baie van filterprobleme, aangesien dit te doen het met 'n aktiewe komponent, terwyl filters passief is. Nogtans gee dit 'n aanduiding van die tipe optimeringsmetode wat gebruik word in die parameteronttrekking van mikrogolfstroombane.

Uit die literatuur blyk dit dat daar verskeie optimeringsmetodes is wat geskik is vir die probleem wat in die tesis aangespreek word. Daar is oorwegend gebruik gemaak van gradiëntmetodes. Uit die gradiëntmetodes kom veral die kleinste-kwadraatmetode as 'n geskikte optimeringsmetode voor. Die steilste-gradiënt-metode gee volgens [13] nie veel beter resultate as die lineêre-metodes nie en daar kan verwag word dat hierdie probleem stadig sal konvergeer. Die gebruik van die tweede orde afgeleides maak die Newton-metodes baie meer kragtig. Die probleem met die Newton-metodes is dat die berekening van die tweede orde afgeleides in die Hermitiese-matriks en die Hermitiese-matriks se inverse tydrowend is en nie altyd bepaal kan word nie. Die kwasi-Newton-metodes benader die Hermitiese-matriks en sy inverse deur van 'n opdateringskema gebruik te maak, maar hierdie opdatering kan ook tydrowend raak. Die kleinste-kwadraatmetode maak van die vorm van die som-van-kwadrate foutfunksie gebruik om 'n benadering vir die Hermitiese-matriks te vind wat vinnig en maklik verkry kan word. 'n Nadeel is egter dat die metode volgens Scales [37] redelike goeie beginwaardes benodig, soos wat ook later uit die teoretiese beskouing van die metode blyk.

Tabelleringsmetodes het die voordeel dat dit baie robuus is. Indien genoeg moontlike oplossings ondersoek word, sal die globale minimum gevind word, ongeag hoe onakkuraat die beginwaardes is. 'n Implementering van die willekeurige-tabelleringsmetode het egter getoon dat die metode te stadig is om in hierdie probleem van nut te wees.

Op grond van bogenoemde bespreking is besluit om van die kleinste-kwadraatmetode gebruik te maak. In afdeling 3.3 word hierdie metode se werking in die algemeen bespreek. Daar moet hier genoem word dat die metode se spesifieke implementering die sukses van die algoritme gaan bepaal. Aspekte betreffende die implementering van die metode soos die foutfunksie, beginwaardes, terminering, ensovoorts word later in die hoofstuk bespreek.

3.3 Kleinste-kwadraatmetode

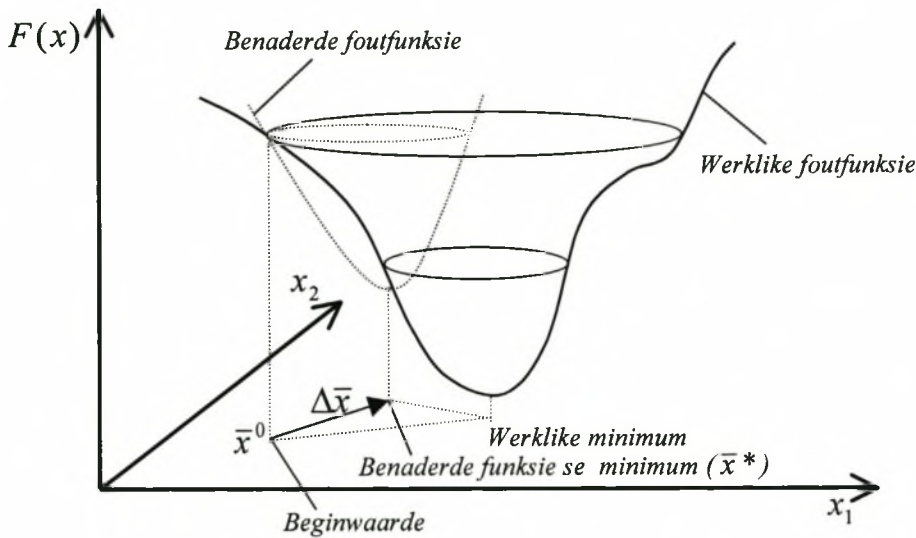
Die kleinste-kwadraat- oftewel Gauss-Newton-metode is 'n gradiëntmetode soos in tabel 3-1 getoon is. Die metode is aanvanklik deur Gauss voorgestel as 'n metode om 'n stel gelyktydige vergelykings op te los, vandaar die naam Gauss-Newton [13]. 'n Bespreking van hierdie metode vereis 'n basiese kennis van Newton-metodes, wat in afdeling 3.5.1 bespreek word. Die afleidings wat spesifiek op die kleinste-kwadraatmetode van toepassing is volg in afdeling 3.5.2.

3.3.1 Afleidings vir Newton-metodes

Die uitgangspunt van die Newton-metodes is dat indien daar beskik word oor die eerste en tweede afgeleides van die foutfunksie by 'n punt en die foutfunksie is kwadratiese, dan kan die minimum van die foutfunksie in 'n enkele stap bepaal word. Newton-metodes benader die foutfunksie met 'n kwadratiese funksie rondom die beginwaarde en vind die stap na die benaderde funksie se minimum. Hierdie stap is nie eksak nie, tensy die werklike foutfunksie kwadratiese is. Deur nou 'n lineêre soektog in die rigting van die stap uit te voer, word die volgende punt in die roetine gevind. Hierdie proses word in figuur 3-2, grafies voorgestel vir 'n twee-dimensionele funksie.

Die metode bestaan uit twee gedeeltes, naamlik die vind van die stap, $\Delta\bar{x}$, en die lineêre soektog in die rigting van die stap. In die eerste deel van die metode word dus gesoek na 'n vektor $\Delta\bar{x}$, sodat indien $\Delta\bar{x}$ by die huidige keuse vir parameters, \bar{x}^0 , getel word, dit die minimum \bar{x}^* sal gee, waar \bar{x}^* die minimum is van die kwadratiese benadering van die foutfunksie. Dus volg vergelyking (3-1).

$$\bar{x}^* = \bar{x}^0 + \Delta\bar{x} \quad (3-1)$$



Figuur 3-2: Die kwadratiese benadering van die foutfunksie om die stap $\Delta\bar{x}$ te vind

Indien daar 'n Taylor-reeks uitbreiding tot die tweede orde van die foutfunksie rondom die beginpunt geneem word, kan die minimum in terme van $\Delta\bar{x}$ en die Taylor-reeks beskryf word, soos in vergelyking (3-2) [13]. Indien die Taylor-reeks uitbreiding beperk word tot die tweede orde, beteken dit in effek dat die funksie waarmee die foutfunksie benader word kwadraties is. Daar kan ook hier gesien word dat indien die beginpunt redelik naby aan die minimum is, sal die hoër orde afgeleides in die Taylor-reeks uitbreidings weglaatbaar wees en sal die kwadratiese benadering van die foutfunksie akkuraat wees.

$$F(\bar{x}^*) = F(\bar{x}^0 + \Delta\bar{x}) \cong F(\bar{x}^0) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial F(\bar{x}^0)}{\partial x_i} \Delta x_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial^2 F(\bar{x}^0)}{\partial x_i \partial x_j} \Delta x_j \Delta x_i \quad (3-2)$$

Deur die afgeleide van vergelyking (3-2) te bepaal met betrekking tot 'n spesifieke veranderlike, x_k , word die uitdrukking in vergelyking (3-3) verkry.

$$\frac{\partial F(\bar{x}^*)}{\partial x_k} = \frac{\partial F(\bar{x}^0)}{\partial x_k} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 F(\bar{x}^0)}{\partial x_i \partial x_k} \Delta x_i \quad (3-3)$$

Die derde orde, terme wat ontstaan as gevolg van die differensiasie van die derde term van vergelyking (3-2), val weg aangesien 'n kwadratiese funksie nie afgeleides hoër as die tweede orde het nie.

Die gradiënt van die foutfunksie kan gedefinieer word deur vergelyking (3-4).

$$\bar{g}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_1} \\ \frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

vir 'n foutfunksie met n dimensies.

Die Hermitiese-matriks word gedefinieer deur vergelyking (3-5).

$$\bar{H}(\bar{x}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_1 \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_2^2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_n \partial x_2} & \cdots & \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_n^2} \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

Deur nou die stel vergelykings wat vergelyking (3-3) voorstel vir $k = 1, 2, \dots, n$, in terme van die gradiëntvektor en Hermitiese-matriks te skryf, word vergelyking (3-6) verkry.

$$\bar{g}(\bar{x}^*) = \bar{g}(\bar{x}^0) + \bar{H}(\bar{x}^0) \Delta \bar{x} = \bar{0} \quad (3-6)$$

Aangesien die gradiënt by die minimum nul is, volg dit dat die stap, $\Delta\bar{x}$, wat geneem moet word om die minimum te vind, gegee word deur vergelyking (3-7).

$$\Delta\bar{x} = -\bar{H}(\bar{x}^0)^{-1} \bar{g}(\bar{x}^0) \quad (3-7)$$

In die tweede deel van die metode word 'n lineêre soektog in die rigting van hierdie stap, $\Delta\bar{x}$, uitgevoer. Dit is nodig, aangesien die stap nie eksak is nie, tensy die foutfunksie kwadratiese is. Dit maak die metode meer robuus en dit raak moontlik om die minimum van foutfunksies te vind wat nie so kwadratiese is nie. Daar word dus aangeneem dat die rigting van die kwadratiese passing op die foutfunksie ook die rigting is waarin die werklike minimum sal voorkom. Verder word die proses iteratief gemaak. Dit word gedoen deur vergelyking (3-8), waarin α verstel word om 'n nuwe beginpunt vir die roetine te vind waarby die fout so klein as moontlik is.

$$\bar{x}^{n+1} = \bar{x}^n + \alpha\Delta\bar{x} \quad (3-8)$$

waar n die siklus van die roetine voorstel.

Daar bestaan baie lynsoektogmetodes wat gebruik kan word vir die doel. 'n Eenvoudige lynsoektog wat aanvaarbare resultate lewer begin met $\alpha = 1$ en halveer dit telkens tot die fout verbeter het. Op hierdie wyse word die algoritme gedwing om 'n verbetering in die fout na elke siklus te hê. Hierdie proses hou aan tot die foutfunksie klein genoeg raak.

3.3.2 Afleidings vir die kleinste-kwadraatmetode

Tot dusver was die afleidings nog geldig vir enige Newton-metode. Die kleinste-kwadraatmetode maak dit egter moontlik om $\bar{g}(\bar{x}^0)$ en $\bar{H}(\bar{x}^0)$ op 'n baie besondere manier te bepaal, deur slegs die Jakobiaan-matriks, $\bar{J}(\bar{x}^0)$, te bereken. Die kleinste-kwadraatmetode se foutfunksie word gedefinieer in vergelyking (3-9).

$$F(\bar{x}) = \sum_i^N f_i(\bar{x})^2 \quad (3-9)$$

In vergelyking (3-9) is f_i die fout by 'n datapunt i is, \bar{x} die modelparameters en N die aantal eksperimentele datapunte. In afdeling 3.4 word die presiese berekening van f_i meer volledig bespreek.

Indien die afgeleide van $F(\bar{x})$ geneem word met betrekking tot 'n veranderlike, x_j , word vergelyking (3-10) verkry.

$$\frac{\partial F(\bar{x})}{\partial x_j} = 2 \sum_i^N \left(f_i(\bar{x}) \frac{\partial f_i(\bar{x})}{\partial x_j} \right) \quad \text{vir } j = 1, 2, \dots, n \quad (3-10)$$

Die eerste orde afgeleide kan in matriksvorm deur vergelyking (3-11) voorgestel word.

$$\bar{g}(\bar{x}) = 2 \cdot \begin{bmatrix} \sum_i f_i \frac{\partial f_i}{\partial x_1} \\ \sum_i f_i \frac{\partial f_i}{\partial x_2} \\ \vdots \\ \sum_i f_i \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

Die gradiënt kan ook in terme van die Jakobiaan-matriks geskryf word soos in vergelyking (3-12).

$$g(\bar{x}) = 2\bar{J}^T \bar{f} \quad (3-12)$$

Die definisie vir die Jakobiaan-matriks word in vergelyking (3-13) gegee.

$$\bar{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_j} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_j} \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

Indien vergelyking (3-10) nou weer gedifferensieer word met betrekking tot x_k , word die elementwaardes van die Hermitiese-matriks verkry soos in vergelyking (3-14) getoon word.

$$H_{jk} = \frac{\partial^2 F(\bar{x})}{\partial x_j \partial x_k} = 2 \sum_i^N \left(\frac{\partial f_i(\bar{x})}{\partial x_k} \frac{\partial f_i(\bar{x})}{\partial x_j} + f_i \frac{\partial^2 f_i}{\partial x_j \partial x_k} \right) \quad (3-14)$$

Deur nou die aanname te maak dat f_i klein genoeg is sodat die tweede term van vergelyking (3-14) weglaatbaar is, kan die Hermitiese-matriks benader word deur vergelyking (3-15).

$$\bar{H}(\bar{x}) \cong 2\bar{J}^T \bar{J} \quad (3-15)$$

Hierdie benadering sal slegs geldig wees indien die punt ter sprake naby aan die werklike minimum gekies word en die funksie f_i so gedefinieer word dat dit nul raak by die werklike minimum.

3.4 'n Geskikte foutfunksie

Die foutfunksie is die hart van die optimeringsalgoritme. Dit bepaal die inligting uit die passing van die model se verloop en die gemete verloop, wat deur die optimeringsmetode gebruik word om 'n aanpassing van die huidige parameterwaardes te bepaal. In die bespreking van die kleinste-kwadraatmetode in afdeling 3.3 is daar genoem dat die metode gebruik maak van die foutfunksie in vergelyking (3-16) wat die fout by elk van die datapunte kwadreer.

$$F(\bar{x}) = \sum_i^N f_i(\bar{x})^2 \quad (3-16)$$

In vergelyking (3-16) is f_i die fout by 'n datapunt i , \bar{x} die modelparameters en N die aantal eksperimentele datapunte. Die funksie f_i kan in die algemeen enige funksie van \bar{x} wees. In die modelgebaseerde parameteronttrekking van die filter sal f_i die verskil tussen die gemodelleerde en gemete verloop van die filter by 'n spesifieke datapunt wees, soos in vergelyking (3-17) getoon word.

$$f_i(\bar{x}) = \left| F_{\text{model}}(\bar{x}) - F_{\text{gemeet}} \right|_i \quad (3-17)$$

Daar is baie moontlike keuses wat gemaak kan word omtrent die tipe verloop, F , en die datapunte, i , wat gebruik word. Die keuse van 'n geskikte foutfunksie kan deurslaggewend wees in die sukses van die optimeringsalgoritme. Die sukses daarvan is verder afhanklik van die spesifieke probleem. Daar is gekyk na foutfunksies wat in verwante probleme in die literatuur gebruik is.

Die metode van Accatino [3] is gebaseer op die weerkaats-fasemetode van Chen [17] en maak van S_{11} se fase van 'n kortgeslote filter gebruik. Thal [4] maak van S_{11} , S_{21} en S_{22} se komplekse waardes gebruik. Kahrizi [7] gebruik die komplekse zero-punte van S_{11} en S_{22} . Die metode van Kudsia [8] is eintlik 'n sintese algoritme, wat in effek die parameters wat die ideale filterverloop sal lewer, onttrek. In hierdie algoritme word die dB-waardes van S_{11} en S_{21} in die foutfunksie

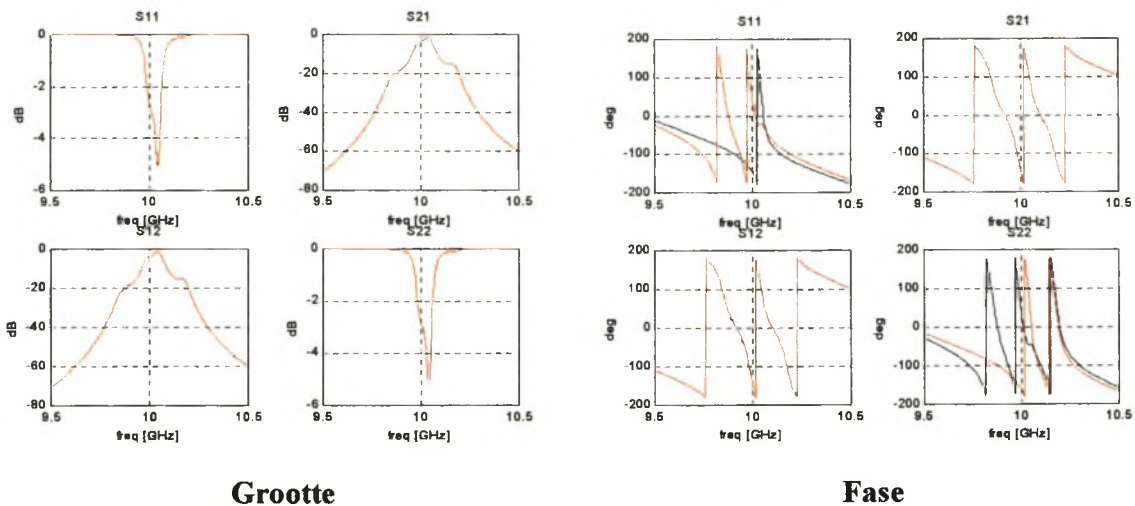
gebruik. Die metode van Harscher [23] gebruik die absolute grootte van S_{11} , S_{21} , S_{12} en S_{22} . Macchiarella [29] maak gebruik van S_{11} , S_{21} , S_{22} se komplekse waardes. Harscher [30] vergelyk S_{11} , S_{21} , S_{12} en S_{22} se reële-waardes en imaginêre-waardes en sommeer die verskil daarna. In Van Niekerk [14], waar die parameters van 'n FET onttrek word, maak die foutfunksie gebruik van die komplekse waardes. Die metodes van Accatino [3] en Kahrizi [7] vergelyk die gemete en gesimuleerde verlope by spesifieke frekwensiepunte. Die res van die metodes hierbo gebruik 'n aantal eweredig gespaseerde punte in die frekwensiegebied.

In die literatuurbronne het al die foutfunksies van die s-parameters as die filterverloop gebruik gemaak. Dit is 'n logiese keuse aangesien die s-parameters die parameters is wat die maklikste gemeet word. Daar bestaan ook 'n duidelike verband tussen die s-parameters en die spesifikasies van 'n filter. Die spesifieke s-parameters waarvan gebruik gemaak is, verskil egter van metode tot metode. Verder verskil die metodes met betrekking tot of die verskil bereken is met die komplekse s-parameters, hulle grootte of hulle fase. Laastens verskil metodes ten opsigte van die punte waarby die gesimuleerde en gemete verloop vergelyk word.

Baie van die metodes het slegs die grootte van die s-parameters gebruik. Deur eksperimentering is daar egter gevind dat die afbeelding van die grootte van die s-parameters op die parameterwaardes, nie eenduidig is nie. Figuur 3-3 gee 'n voorbeeld waar twee verskillende parameterstelle dieselfde s-parameter groottes realiseer. Tog kan gesien word dat die fase van die s-parameters wel verskil. Die twee parameterstelle, x_1 en x_2 , word in tabel 3-2 getoon. In hierdie voorbeeld is die lengtes van die golfleier aan die ente van die filter vir beide parameterstelle op 57.6mm gehou, omdat hierdie parameters slegs op die fase 'n invloed het. In die verskillkolom word die relatiewe verskil tussen x_1 en x_2 as 'n persentasie uitgedruk ten opsigte van x_2 . Die gemiddelde verskil in die parameterwaardes was 39.3% en die grootste verskil tussen twee parameters is die van K_{45} met 210.7%. Dit bewys dat daar nie noodwendig 'n unieke oplossing gevind kan word indien slegs die grootte van die s-parameters vergelyk word nie. Dit is dus noodsaaklik om van die komplekse waardes in die foutfunksie gebruik te maak.

	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_4 [mm]	K_{01}	K_{12}	K_{23}	K_{34}	K_{45}
x_1	20.16	20.049	19.572	19.474	0.070386	0.016705	0.009043	0.014379	0.056789
x_2	19.728	19.835	19.768	19.922	0.038099	0.005377	0.018507	0.028038	0.082010
verskil	2.19 %	1.08 %	-0.99 %	-2.25 %	84.75 %	210.66 %	-51.14 %	-48.72 %	-30.75 %

Tabel 3-2: Die parameterstelle waarvan die verloop in figuur 3-3 geskets is



Figuur 3-3: Die verloop van die parameterstelle in tabel 3-2 wat toon dat die grootte van die s-parameters nie uniek afbeeld op die parameterswaardes nie

Aangesien 'n filter 'n passiewe stroombaan en dus resiproke stroombaan is sal $S_{21} = S_{12}$. Indien ons verder aanneem dat die filter verliesloos is, sal $|S_{11}| = |S_{22}|$ [20, p.200]. Deur slegs S_{11} en S_{21} te gebruik, sal die verskil tussen S_{11} en S_{22} se fase verlore gaan. Indien S_{11} , S_{21} en S_{22} gebruik word, sal dit nodig wees om S_{21} swaarder te laat weeg in 'n foutfunksie om te verhoed dat die werkaatskoeffisiënte die foutfunksie oorheers. Alhoewel $S_{21} = S_{12}$, sal die ruis op die metings daarvan maak dat selfs hierdie twee parameters nie presies dieselfde is nie. Om die maksimum hoeveelheid inligting in die foutfunksie met mekaar te vergelyk is daar besluit om al vier s-parameters met mekaar te vergelyk.

Die bespreking hierbo motiveer die gebruik van die foutfunksie in vergelyking (3-18).

$$f_i(x) = \frac{1}{\sigma_{11}} \left| R_{11}^i - S_{11}^i \right| + \frac{1}{\sigma_{12}} \left| R_{12}^i - S_{12}^i \right| + \frac{1}{\sigma_{21}} \left| R_{21}^i - S_{21}^i \right| + \frac{1}{\sigma_{22}} \left| R_{22}^i - S_{22}^i \right| \quad (3-18)$$

waar S_{jk} die gemete s-parameters voorstel, R_{jk} die s-parameters wat gesimuleer word deur die filtermodel, i die frekwensiepunte ter sprake en \bar{x} die veranderlikes van die model. In hierdie foutfunksie is daar ook van 'n normaliseringsfaktor, σ_{jk} , gebruik gemaak, wat verseker dat al die terme in vergelyking (3-18) 'n vergelykbare invloed op die foutfunksie het, veral vir erg uitgestelde verlope. Die waarde van hierdie normaliseringsfaktor is bepaal volgens vergelyking (3-19) soos deur Van Niekerk [38].

$$\sigma_{jk} = \max |S_{jk}| \quad (3-19)$$

3.5 Geskikte beginwaardes

Daar is twee gevalle waarin wel beskik word oor goeie beginwaardes vir die optimeringsroetine. Die een geval is waar die filter nie ver uitgestel is nie. Die ideale parameterwaardes van die filter kan dan dien as geskikte beginwaardes. In die literatuurbronne, wat wel die keuse van beginwaardes noem, word dit ook as die ingestelde waardes geneem [3,4,7]. Van die metodes in die literatuur maak van vooraf-instellings gebruik om te verseker dat hierdie geval geld [23,30]. Die ander geval is wanneer die parameteronttrekking van 'n filterverloop reeds op een of ander wyse gedoen is en daarna aan die instellingselemente verstel is. Indien daar nie baie verstel word aan die filter nie, kan die parameterwaardes van die vorige passing as die beginwaardes in die onttrekking van die huidige filter gebruik word. In laasgenoemde geval is daar egter steeds 'n robuuste metode nodig om die aanvanklike passing te verkry.

Baie keer is die filter nie naby genoeg ingestel nie en is die ingestelde waardes nie naby genoeg aan die oplossing van die probleem nie. In sulke gevalle kan dit gebeur dat die optimeringsroetine nie tot die oplossing konvergeer nie. Dit mag ook wees dat die model wat gebruik word nie die metings akkuraat genoeg voorspel nie. Die roetine sal dus robuus genoeg moet wees om die tekortkominge van die model en die effek van die ruis van die metings te kan hanteer. Daar kan verder in sommige omstandighede onsekerheid wees oor wat die ingestelde waardes is. Veral wanneer die metode vir diagnose gebruik word is dit wenslik dat die metode robuus genoeg is, om die globale minimum te vind, sonder dat enige vooraf kennis van die filter nodig is. In afdeling 3.9 word die robuustheid van die algoritme bespreek en daar word gewys hoe die probleem van die onbesikbaarheid van goeie beginwaardes opgelos kan word.

3.6 Die gebruik van 'n straffunksie

'n Begrensde optimeringsprobleem is 'n probleem waarin die veranderlikes tussen sekere grense moet voorkom. Enige praktiese probleem se veranderlikes besit sulke grense. Hierdie grense verhoed dat die veranderlikes onrealistiese waardes, soos byvoorbeeld negatiewe resoneerderlengtes, aanneem en die probleem vashak in lokale minima buitekant hierdie grense. Metodes waarmee onbegrensde optimeringsprobleme opgelos word, is meer effektief en betroubaar as metodes waarmee begrensde optimeringsprobleme opgelos word [35, p.217]. Straffunksies is funksies waarmee 'n begrensde optimeringsprobleem getransformeer word na 'n onbegrensde optimeringsprobleem. Die probleem kan nou deur die meer effektiewe onbegrensde optimeringsmetode opgelos word. Straffunksies word geïmplementeer deur 'n strafterm by te tel of te vermenigvuldig met die normale foutfunksie, op so 'n wyse dat die waarde van die straffunksie sal vermeerder indien van die veranderlikes buite hulle grense gaan. Deur nou die straffunksie se minimum te soek kan 'n onbegrensde-optimeringsmetode gebruik word om 'n begrensde-probleem op te los.

Daar is baie moontlike straffunksies wat gebruik kan word. Party van die metodes raak egter onnodig ingewikkeld en plaas 'n te groot berekeningslas op die verwerker. Die gebonde-veranderlike metode ("*variable bound*") is 'n eenvoudige metode wat nie onnodige berekeningslas veroorsaak nie [35]. Hierdie metode hou die veranderlikes, wat buite hulle grense wil gaan, vas op die grens. Die metode kan maklik met logika toetse geïmplementeer word. Die metode veroorsaak wel dat die soekrigting verander word, aangesien slegs sommige van die veranderlikes vasgehou word terwyl die ander steeds aangepas word. Ervaring het egter al getoon dat die veranderlike wat teen 'n grens vasslaan, wel op 'n stadium weer weg van die grens af beweeg. Die soekrigting sal dan weer korrek wees.

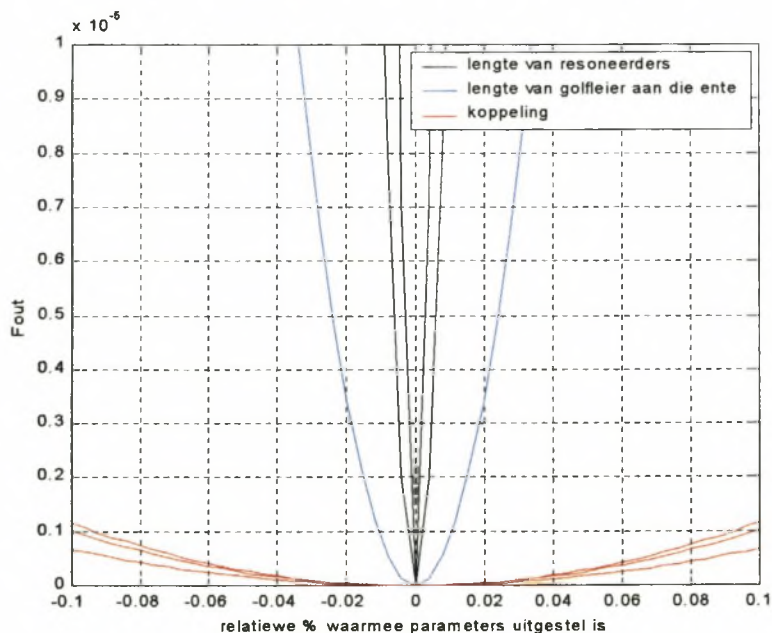
Om grense in die parameteronttrekkingsprobleem te implementeer, is daar limietwaardes vir elke parameter gekies. Die keuse van goeie limiete kan moeilik raak indien daar onsekerheid is oor wat die waardes by die oplossing is. Daar moet seker gemaak word dat die oplossing definitief binne die limiete gaan voorkom, anders kan die limiete juis verhoed dat die oplossing gevind word. Deur

aan die anderkant die limietwaardes te wyd te kies, kan van die lokale minima weer binne bereik van die optimeerder kom.

Die gebruik van straffunksies was noodsaaklik vir die korrekte werking van die ontwikkelde algoritme. Die parameters wou veral in die eerste paar siklusse van die roetine die limiete oorskry en sonder die gebruik van die metode het die roetine in lokale minima vasgeval. Die limiete is gestel tussen 5% en 195% van die ideale parameterwaarde. Die grense van die veranderlikes kan dus redelik wyd gekies word sodat die oplossing met sekerheid binne die grense sal voorkom. Dit bewys ook dat die vind van geskikte grense nie vereis dat daar vooraf veel kennis oor die filter beskikbaar hoef te wees nie. Nouer grenswaardes veroorsaak dat die oplossing vinniger gevind kan word, maar daar is gevind dat die ontwikkelde algoritme nie van nou grense afhanklik is om tot die oplossing te konvergeer nie.

3.7 Numeriese akkuraatheid

Somige van die parameters het 'n groter effek op die foutfunksie as ander parameters in die omgewing van die minimum. In figuur 3-4 word die foutfunksie getoon wat verkry is indien daar telkens een van die parameters met 0.1% rondom sy korrekte waarde gevarieer is. Hier is van die ingestelde elementwaardes van die voorbeeldfilter as voorbeeld gebruik gemaak. Daar kan uit figuur 3-4 duidelik gesien word dat die parameters op grond van hulle sensitiwiteit op die foutfunksies in drie groepe verdeel kan word, naamlik die lengtes van die resoneerders, golfleierlengtes aan die ente van die filter en die koppelingswaardes.



Figuur 3-4: Die foutfunksie se sensitiwiteit teenoor veranderinge in die parameterwaardes

Hierdie sensitiwiteitsverskille kom na vore indien die afgeleides van die foutfunksie geneem word. Omdat die rekenaar eindige numeriese akkuraatheid het, kan die akkuraatheid van die Jakobiaanmatriks en dus ook van die gradiëntvektor en Hermitesiese-matriks in gedrang kom. Indien die Hermitesiese-matriks se kondisie sleg raak, kan die berekening van die Hermitesiese-matriks se inverse probleme veroorsaak.

Die SVD-metode (“*singular value decomposition*”) is ’n baie kragtige metode wat ontwikkel is om stelsels van vergelykings of matrikse op te los wat singulier is, of numeries baie naby aan singulier is. Die metode berus op die teorema uit lineêre algebra wat in vergelyking (3-20) getoon is en wat sê dat ’n matriks \bar{A} , waarvan die aantal rye groter of gelyk is aan die kolomme, geskryf kan word as die produk van ’n kolom-ortogonale matriks \bar{U} , ’n diagonale matriks met positiewe elemente en die getransponeerde van ’n ortogonale matriks \bar{V} .

$$\begin{pmatrix} \bar{A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{U} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} w_1 & & & \\ & w_2 & & \\ & & \dots & \\ & & & \dots & \\ & & & & w_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \bar{V}^T \end{pmatrix} \quad (3-20)$$

Indien hierdie matrikse bepaal is, is die vind van die inverse van \bar{A} triviaal en kan dit bereken word deur vergelyking (3-21).

$$\bar{A}^{-1} = \bar{V} \cdot \left[\text{diag} \left(\frac{1}{w_j} \right) \right] \cdot \bar{U}^T \quad (3-21)$$

Al wat kan fout gaan, is dat die waarde van w_j te klein raak. Die SVD-metode stel die waarde van w_j gelyk aan nul in hierdie geval. Sodoende word die vind van die inverse van selfs ’n singuliere matriks moontlik. Die matrikse wat benodig word in die SVD-metode is bereken met behulp van die *MATLAB*-funksie `svd`. Die werking van die SVD-metode word meer volledig deur Press [36] bespreek.

Ondersoek is ook ingestel na ’n alternatiewe metode van Patterson [26] waarin die foutfunksieruimte getransformeer en geskaleer word. Hierdie metode het egter swakker gevaar as wanneer slegs die SVD-metode gebruik is.

Selfs met die SVD-metode veroorsaak hierdie sensitiwiteitsverskille dat daar nie so maklik ’n presiese oplossing vir die onsensitiewe parameters gevind kan word nie. Daar kan verwag word

dat die koppelingswaardes nie met dieselfde akkuraatheid gevind kan word as die lengtes van die resoneerders nie. Dit het egter die voordeel dat die beginwaardes wat daarvoor gebruik word ook nie so akkuraat hoef te wees nie.

3.8 Terminering van die optimeringsroetine

Vergelyking (3-8) toon die lineêre soektog wat uitgevoer word in die kleinste-kwadraatmetode. Daar is genoem dat die lineêre soektog die waarde van die verkleiningsfaktor, α , telkens halveer indien die stap nie 'n verbetering in die fout veroorsaak nie. Indien α kleiner as 10^{-6} word, is daar aanvaar dat die roetine gekonvergeer het.

Die ontwikkelde robuuste onttrekkingsalgoritme wat in afdeling 3.10 bespreek word, bestaan uit verskillende optimeringsfases. In die beginfases hoef die optimeringsroetine die oplossing van die spesifieke fase nie altyd met soveel akkuraatheid te vind nie. Dit veroorsaak dat die totale optimeringsproses onnodig lank duur. Om dit te verhoed, is daar van nog twee termineringskriteria gebruik gemaak. Eerstens word die verbetering in die fout na elke siklus gemonitor en indien die verbetering te klein raak, stop die roetine. Hierdie minimum verbetering in die fout is gekies tussen 10^{-3} en 10^{-6} , afhangende van die fase van die optimeringsalgoritme en die spesifieke voorbeeld. Die roetine is verder gestel om te termineer indien daar meer as 30 siklusse verloop het. Daar is deur eksperimentering gevind dat die roetine meesal reeds gekonvergeer het binne hierdie aantal siklusse en dat hierdie limiet keer dat die roetine onnodig lank besig bly indien die roetine nie konvergeer nie.

3.9 Robuustheid van die algoritme

Die algoritme wat tot dusver bespreek is in die afdelings hierbo is geïmplementeer. 'n Volledige beskrywing van die implementering daarvan volg in afdeling 3.10. Die algoritme het goeie resultate op gesimuleerde voorbeelde gehad, mits die beginwaardes na genoeg aan die minimum gekies is. Daar word in Hoofstuk 4 afdeling 4.1.2 'n voorbeeld getoon wat dit illustreer. Die sukses van die algoritme was egter afhanklik van hoe na aan die oplossing die beginwaardes gekies is. Die algoritme het soms in lokale minima vasgeval en ander kere het die algoritme selfs gedivergeer. Verder kon daar nie altyd sukses met gemete voorbeelde verkry word nie.

Moontlike maniere om hierdie probleem te oorkom, sou wees om die filter vooraf rofweg in te stel. Hiervoor kan 'n tref-en-trap benadering gevolg word of die filter kan eers met behulp van een van die direkte metodes wat in afdeling 1.2.1 genoem is, ingestel word. Hiermee word verseker dat die gebruik van die ideale parameterwaardes goeie beginwaardes is vir die optimeringsalgoritme. Dit is die prosedure wat gevolg is in die metodes van Harscher [23,30]. Dit is nie 'n wenslike oplossing nie aangesien die instellingsproses nou weer afhanklik is van tydsame, operateurafhanklike prosesse. 'n Ander moontlike verbetering in die algoritme sou wees om die grenswaardes van die veranderlikes, wat in afdeling 3.6 bespreek is, nouer te maak. 'n Akkurate keuse van die grenswaardes vereis egter dat die omgewing waarin die oplossing gaan voorkom, bekend moet wees. Dit is ook nie gewens nie en beperk die diagnose-toepassing van die metode. Dit volg dus dat 'n optimeringsalgoritme verlang word wat nie afhanklik is van die gegewe beginwaardes nie. Dit is wenslik dat hierdie algoritme die oplossing moet kan vind sonder dat enige vooraf kennis omtrent die parameterwaardes bekend is.

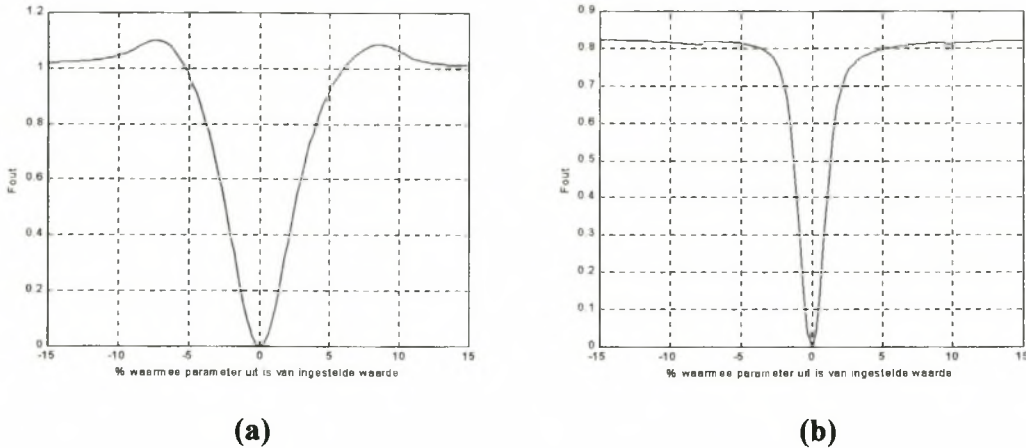
Dit is belangrik om te besef hoekom die algoritme so afhanklik is van die beginwaardes. Sodoende kan die aanpassing van die algoritme wat nodig is om dit meer robuus te maak, ingesien word. Eerstens moet daar genoem word dat dit uit die bespreking van die kleinste-kwadraatmetode, in afdeling 3.3, blyk dat dit 'n metode is wat goeie beginwaardes benodig. Die rede hiervoor is tweedelig. Die eerste rede is dat die foutfunksieruimte deur 'n kwadratiese funksie benader word en die staprigting hieruit afgelei word. Hoe meer kwadratiese die werklike foutfunksieruimte is, hoe

beter sal die staprigting bepaal kan word. Daar is ook in afdeling 3.3 genoem dat die werklike foutfunksie al meer kwadratiese word soos daar nader aan die oplossing beweeg word. Die tweede rede is dat die Hermitiese-matriks benader is deur die tweede term in vergelyking (3-14) te laat wegval. Dit is slegs geldig indien die veranderlikes naby aan die oplossing is, sodat die fout baie klein word.

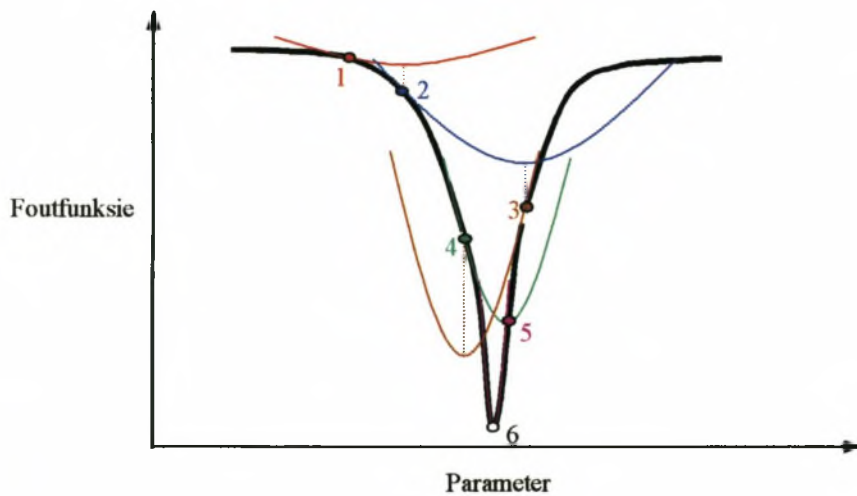
Daar is ook gevind dat die variëring van die lengtes van die resoneerders 'n interessante foutfunksievorm tot gevolg het. In figuur 3-5 word die foutfunksie getoon wat verkry word indien al die parameters op hulle ideale waardes gehou word en die lengtes van die resoneerders 1 en 2 onderskeidelik gevarieer word met $\pm 15\%$ rondom hulle ingestelde waarde. Die verloop wat vir resoneerders 3 en 4 se lengtes verkry word, lyk net soos die verloop van resoneerdes 2 en 1 onderskeidelik. Daar is reeds genoem dat die kleinste-kwadraatmetode beter werk indien die foutfunksievorm kwadratiese is. Die verloop van die tweede-afgeleide van hierdie foutfunksievorm is die inverse van 'n kwadratiese funksie se verloop. Dit is eers baie naby aan die minimum waar die foutfunksie se vorm kwadratiese word. In figuur 3-6 word getoon hoe die kleinste-kwadraatmetode met die halveringslynsoektoeg waarvan gebruik gemaak is, te werk sal gaan om 'n eendimensionele funksie met die tipe foutfunksievorm, se minimum te vind. Die optimeringsalgoritme spring baie rond en is nie so effektief om die minimum van hierdie foutfunksievorm te vind nie. Indien ons egter punt 5 in figuur 3-6 as die beginwaarde kan gebruik kan die foutfunksie goed benader word as 'n kwadratiese funksie. Die kleinste-kwadraatmetode sal goed werk om die minimum te vind.

Uit figuur 3-5 kan gesien word dat die kleinste-kwadraatmetode baie stadig sal konvergeer, of selfs sal divergeer indien die resoneerder se lengte 'n fout groter as 7% vir resoneerder 1 en 5% vir resoneerder 2 het. In resoneerder 1 is daar ook lokale minima so na as 7% van die ingestelde waarde. Hierdie voorbeelde is slegs vir 'n eendimensionele foutfunksieverloop ondersoek. Daar kan verwag word dat die probleme betreffende die slegte foutfunksievorm en die voorkoms van lokale minima sal versleg soos die dimensies van die probleem vergroot. 'n Soortgelyke ondersoek van die koppelingswaardes en die lengte van die golfleier aan die ente van die filter het getoon dat hierdie parameters wel unimodaal is en 'n kwadratiese foutfunksieverloop het, indien slegs een dimensie op 'n keer varieerbaar gemaak is. Indien daar egter goeie beginwaardes vir veral die

lengtes van die resoneerders gevind kan, word sal die kleinste-kwadratmetode steeds baie suksesvol wees.



Figuur 3-5: Die invloed wat resoneerders ^{a)} 1 en ^{b)} 2 se lengtes op die foutfunksie het indien hulle gevee word rondom hulle ingestelde waardes



Figuur 3-6: Optimering van die getoonde foutfunksievorm

In hierdie afdeling is ondersoek ingestel na moontlike tegnieke waarmee die optimeringsalgoritme meer robuus gemaak kan word. Daar is gepoog om met behulp van hierdie algoritme waardes te

vind wat na genoeg aan die oplossing is sodat dit gebruik kan word as geskikte beginwaardes. In die soektog na so 'n algoritme is daar ook na ander optimeringsmetodes gekyk. Daar is veral ondersoek ingestel na die gebruik van willekeurige soektogte en soektogte in een dimensie. Die willekeurige soektogte is te stadig om van praktiese nut te wees. Soektogte in een dimensie het soms goeie resultate gelewer, maar die metode was nie heeltemal onafhanklik van die beginwaardes nie.

Daar is uiteindelik twee tegnieke geïdentifiseer waarmee die metode meer robuus gemaak kan word, naamlik die geleidelike vermeerdering van die parameters en die gebruik van 'n meer robuuste foutfunksie. Die voorgestelde metode maak van 'n multi-fase optimeringsalgoritme gebruik om hierdie tegnieke te implementeer. 'n Volledige beskrywing van die voorgestelde metode volg in afdeling 3.10.

3.9.1 Die geleidelike vermeerdering van die parameters

'n Verdere faktor wat die robuustheid van die algoritme in gedrang bring, is die afspeel van veranderlikes teenoor mekaar. Hiermee word bedoel dat die verloop van die stelsel nie 'n unieke afbeelding op die parameters het nie. Die een parameter se effek kan dalk soveel dieselfde wees as die effek van 'n ander parameter, dat die optimeerder die verkeerde parameter verander. Hierdie verskynsel veroorsaak dat daar lokale minima ontstaan. Lokale minima is punte waar daar redelike goeie passing verkry word, maar die parameters is nie korrek nie en die passing kan nie verder verbeter nie. Indien die optimeerder eers in 'n lokale minimum vasval, is dit baie moeilik om daar uit te kom en die globale minimum te vind. Bogenoemde is ook veral waar vir passiewe stelsels. Daar is reeds genoem dat passiewe stelsels resiprook is en indien verliesloosheid aanvaar word, is $|S_{11}| = |S_{22}|$ en $S_{21} = S_{12}$ soos blyk uit Pozar [20]. Daar is dus minder inligting omtrent die passing beskikbaar as in aktiewe stelsels. Die probleem met parameters wat 'n nie-unieke invloed op die passing het, kan verder verduidelik met die voorbeeld van twee weerstande in serie. Dit is onmoontlik om te sê watter bydrae elke weerstand afsonderlik het, indien daar net na die gesamentlike effek van die twee weerstande gekyk word.

Dit is ook so dat die hoeveelheid lokale minima toeneem soos die aantal veranderlikes toeneem. Die hoeveelheid veranderlikes moet dus so min as moontlik gehou word. As die parameters egter te min is, sal dit nie die filter goed genoeg kan beskryf nie en sal die passing nooit so akkuraat kan wees nie. Daar moet dus van so min moontlike veranderlikes gebruik gemaak word, maar net genoeg sodat die filter akkuraat beskryf kan word. Dit is voordelig om veral aan die begin van 'n optimeringsroetine die veranderlikes so min en so algemeen as moontlik te hou.

In 'n meer robuuste metode is dit dus nie wenslik om van al 11 parameters van die voorbeeldfiltermodel van die begin van die optimeringsalgoritme af varieerbaar te maak nie. Omdat die parameters so baie is, gebeur dit dat daar nie genoeg inligting uit die foutfunksie verkry kan word om die uniekheid van elke parameter te verseker nie. Die parameters speel dus af teenoor mekaar en die roetine konvergeer tot 'n lokale minimum. Om hierdie probleem teen te werk, is die optimeringsalgoritme so ontwerp dat die veranderlikes so min en so algemeen as moontlik gehou word aan die begin en dan geleidelik meer gemaak word soos wat die geoptimeerde parameterwaardes al nader aan die globale minimum kom.

3.9.2 'n Meer robuuste foutfunksie

Deur eksperimentering is gesien dat dit nie maklik is om die globale minimum van die foutfunksie van vergelyking (3-18) te vind nie. Daar is ondersoek ingestel na die gebruik van ander tipe foutfunksies, byvoorbeeld foutfunksies wat die grootte en fase van die s-parameters apart vergelyk. Die metode wat hier bespreek is, was die beste metode wat gevind is en dit werk baie goed vir die voorbeeldfilter.

Daar is gevind dat 'n foutfunksie wat slegs die grootte van die s-parameters gebruik baie makliker konvergeer. Om hierdie rede is daar ondersoek ingestel na die gebruik van die foutfunksie in vergelyking (3-22).

$$f_i(\bar{x}) = \left| \left| R_{11}^i \right|_{dB} - \left| S_{11}^i \right|_{dB} \right| + \left| \left| R_{12}^i \right|_{dB} - \left| S_{12}^i \right|_{dB} \right| + \left| \left| R_{21}^i \right|_{dB} - \left| S_{21}^i \right|_{dB} \right| + \left| \left| R_{22}^i \right|_{dB} - \left| S_{22}^i \right|_{dB} \right| \quad (3-22)$$

Die dB-waardes van die s-parameters is hier vergelyk in plaas van die lineêre grootte daarvan. In die dB-skaal sal die verskille by die kleiner waardes, soos byvoorbeeld die weerkaatskoeffisiënte in die deurlaatband, 'n meer beduidende invloed op die foutfunksie hê. Aangesien juis hierdie waardes die filter goed karakteriseer, is daar gekies om die logaritmiëse waardes te vergelyk. Let op dat daar ook nie meer van 'n normaliseringsfaktor gebruik gemaak word nie, aangesien die maksimum dB-waarde in 'n s-parameter verloop gewoonlik nul raak.

Soos in afdeling 3.4 getoon is, kan 'n foutfunksie wat slegs van die grootte van die s-parameters gebruik maak moontlik parameters vind wat nie uniek is nie. Die foutfunksie is egter net in die eerste fases van die optimeringsalgoritme gebruik en in die latere fases word die foutfunksie van vergelyking (3-18) weer gebruik. Deur die foutfunksie van vergelyking (3-22) te gebruik, kan die optimering van die lengte van die golfleiers aan die filter se ente, eers geïgnoreer word aangesien hierdie parameters slegs 'n fase invloed het. Sodoende help die foutfunksie van vergelyking (3-22) om die aantal parameters, waarmee die filter in die eerste fases van die optimering beskryf moet word, te verminder.

3.10 Die voorgestelde parameteronttrekkingsalgoritme

Die probleme wat die parameteronttrekkingsalgoritme moet hanteer, kan in twee groepe verdeel word, naamlik die gevalle waar daar goeie beginwaardes beskikbaar is en die gevalle waar dit nie beskikbaar is nie. Die parameteronttrekking van laasgenoemdes is meer veeleisend en die optimeringsalgoritme moet dus meer robuus wees. Vir die doel van verdere verwysings word onderskeidelik na die fyner onttrekkingsalgoritme en die robuuste onttrekkingsalgoritme verwys. Die algoritmes is in 'n *MATLAB*-omgewing ontwikkel en die kode daarvoor is in Bylae B.

3.10.1 Die fyner onttrekkingsalgoritme

Die implementering van die verskillende fasette van hierdie algoritme is in die afdelings hierbo uiteengesit. Die bespreking van die algoritme se robuustheid in afdeling 3.9, is egter nie hier in ag geneem nie. Tabel 3-3 som die metode in breë trekke op.

Model	Cohn-model (afdeling 2.4)
Optimeringsmetode	Kleinste-kwadraatmetode (afdeling 3.2 en 3.3)
Foutfunksie	$f_i(x) = \frac{1}{\sigma_{11}} R_{11}^i - S_{11}^i + \frac{1}{\sigma_{12}} R_{12}^i - S_{12}^i + \frac{1}{\sigma_{21}} R_{21}^i - S_{21}^i + \frac{1}{\sigma_{22}} R_{22}^i - S_{22}^i $ (afdeling 3.4)
Beginwaardes	Ideale waardes (afdeling 3.5)
Straffunksie	Gebonde veranderlike-metode met parametergrense tussen 5% en 195% van die ideale waardes (afdeling 3.6)
Numeriese akkuraatheid	SVD-metode (afdeling 3.7)
Terminering	α van halveringslynsoektog word kleiner as gekose waardes (afdeling 3.8)

Tabel 3-3: 'n Oorhoofse opsomming van die fasette van die fyner onttrekkingsalgoritme

3.10.2 Die robuuste onttrekkingsalgoritme

Die algoritme dien as 'n uitbreiding van die fyner onttrekkingsalgoritme. Dit berus op die twee tegnieke wat in afdeling 3.9 bespreek is, naamlik die geleidelike vermeerdering van die parameters en die gebruik van 'n meer robuuste foutfunksie wat op die dB-verskil van die s-parameters gebaseer is. 'n Multi-fase optimeringsalgoritme is gebruik. Daar word met so min as moontlik veranderlikes begin en die parameterwaardes word gekies om so algemeen as moontlik te wees. Die parameters word dan na elke fase vermeerder. Die algoritme is toegepas op die voorbeeldfilter, wat deur 11 parameters beskryf word. Die algoritme word opgedeel in die vyf fases hieronder. Die laaste fase van die algoritme is dieselfde as die fyner onttrekkingsalgoritme. Die vorige vier fases vind dus geskikte beginwaardes daarvoor.

Fase 1: Die vind van 'n 2-parameter voorstelling vir die filter

Die minste veranderlikes wat nog 'n sinvolle filtervoorstelling lewer, is twee veranderlikes, naamlik een waarde vir al die resoneerders se lengtes en een waarde vir al die koppelingswaardes. Hierdie twee waardes gee 'n algemene oplossing en daar word later gewys dat die waardes 'n goeie beginpunt is. Die meer robuuste foutfunksie van afdeling 3.9.2, wat slegs die grootte van die s-parameters in ag neem, is hier gebruik. Aangesien die lengtes van die golfleiers aan die ente van die filter slegs die faseverloop beïnvloed, kan dit vir eers geïgnoreer word. In die paragrafe wat nou volg, word daar verduidelik hoe elk van die twee parameterwaardes, in hierdie beginfase van die algoritme, gekies is.

In die voorbeeldfilter sal al die resoneerders dieselfde waarde hê, indien die filter presies ingestel is. Alhoewel Atia [1] noem dat daar uitsonderings bestaan, sal dit vir die meeste gekoppelde-resoneerderfilters ook so wees. Dit sal dus 'n goeie beginwaarde wees om al die resoneerderlengtes deur een waarde voor te stel, waar hierdie waarde die gemiddelde waarde van die werklike lengtes van die resoneerders is. In hierdie metode is die resoneerderlengtes gevind vanuit die gemete sentrefrekwensie van die filter. Op hierdie wyse word 'n beter beginwaarde vir die resoneerders se lengte gevind as wat die ingestelde waardes lewer. Vergelyking (3-23) toon die

verband wat daar bestaan tussen die senterfrequentie van die filter en die ooreenstemmende golflengte wat hierdie golfleier in 'n sirkelvormige golfleier sal hê.

$$\lambda_{g0} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{3.412 R}\right)^2}} \quad (3-23)$$

waar $\lambda_0 = \frac{c}{f_0}$, en R die radius is van die sirkelvormige golfleier.

Omdat die filter van halfgolfresoneerders gebruik maak, sal $l_c = \frac{\lambda_{g0}}{2}$ waar l_c die golfleierresoneerder se lengte is. Indien die filter se senterfrequentie bekend is kan die waarde van die l_c dus gevind word. Die senterfrequentie is bereken uit die gemete S_{21} -verloop deur vergelyking (3-24), wat die gemiddeld van die gemete senterfrequencies by 'n aantal grootte-punte vind.

$$f_0 = \frac{1}{N} \sum_i^N \left(\frac{f_{1i} + f_{2i}}{2} \right) \quad (3-24)$$

In vergelyking (3-24) is N die aantal grootte-punte van die S_{21} -verloop wat ondersoek is. Verder is f_1 en f_2 die twee frekwensiepunte wat afgelees is by die grootte-punt i . Dit volg ook hieruit dat van grootte-punte gebruik gemaak moet word waarby daar slegs twee frekwensies gemeet kan word. Daar is van 1dB intervale gebruik gemaak oor 'n interval wat so groot as moontlik gekies is. Op hierdie wyse is dit moontlik om die senterfrequentie van ver uitgestelde filters te bepaal, waar die -3dB punte nie gemeet kan word nie.

Die vind van goeie beginwaardes vir die koppelingswaardes vanuit die gemete filterverloop, is nie so triviaal nie. Daar is hier vasgestel dat 'n bevredigende beginwaarde vir die koppelings gevind kan word deur al die koppelings ook aanvanklik deur een waarde voor te stel. Die verwagting is dat die waardes redelik baie sal verskil van die korrekte waardes, maar aangesien hierdie waardes minder sensitief is as die resoneerderlengtes hoef die waardes nie so akkuraat te wees om steeds 'n

goeie passing te realiseer nie. Die voordeel daarvan om dit net met een waarde aan die begin voor te stel, is dat die beginwaarde meer algemeen is as wat dit sou wees indien die ingestelde waardes as beginwaardes geneem is. Nog belangriker is die feit dat hier nou nie enige vooraf kennis van die koppelingswaardes nodig is nie. Die koppelingswaarde wat as beginwaarde gebruik word, kan deur 'n eendimensionele soektog gevind word. Daar is gevind dat die foutfunksie se verloop unimodaal is en die minimum kan dus maklik gevind word. 'n Goue-seksie-soektog is gebruik om die minimum te vind. Hierdie soektog-metode is gebaseer op die verdeling van die soekruimte in verhoudings ekwivalent aan Fibonacci se getal. Dié metode is bekend daarvoor dat dit baie effektief is as 'n eendimensionele soektog [35]. Die grense vir hierdie soektog is op die dieselfde grense gestel as vir die gebonde-veranderlike metode, naamlik 5% en 195% van die ideale parameterwaarde. Die grense kan dus wyd genoeg gekies word en daar is dus nie vooraf veel kennis oor die filter nodig nie.

Fase 2: Die vind van 'n 3-parameter voorstelling vir die filter

Die passing van die geoptimeerde verloop na fase 1 kan baie verbeter word deur van twee koppelingswaardes gebruik te maak, naamlik die eksterne koppelings en die interne koppelings. Vir die voorbeeldfilter kan duidelik gesien word dat K_{01} en K_{45} vergelykbare groottes het en dat K_{12} , K_{23} en K_{34} ook vergelykbare groottes het, maar die eksterne koppelings is baie groter as die interne koppelings. In hierdie optimeringsfase is die filter voorgestel deur drie veranderlikes, naamlik die lengte van die resoneerders, die interne koppelings en die eksterne koppelings. Die optimering is in hierdie fase slegs gedoen op die interne en eksterne koppeling terwyl die lengte van die resoneerders wat in fase 1 gekry is, konstant gehou is. Dieselfde optimeringsalgoritme is gebruik as vir die fyner onttrekkingsalgoritme, behalwe dat die meer robuuste foutfunksie van afdeling 3.9.2, gebruik is. Die koppelingswaarde, wat gevind is deur fase 1, is as die beginwaardes in hierdie roetine gebruik.

Fase 3: Die vind van 'n 7-parameter voorstelling vir die filter

In hierdie fase is die feit dat die voorbeeldfilter asook meeste gekoppelde-resoneerder filters simmetries is, uitgebuit. Die ingestelde voorbeeldfilter se vyf koppelingswaardes kan dus deur drie waardes voorgestel word. Deur hierdie waardes vroeg in die optimeringsproses simmetries te hou, kan verhoed word dat die koppelingswaardes onsinnige waardes aanneem. Verder is daar ook besluit om die lengtes van die resoneerders nie meer slegs deur een waarde voor te stel nie, maar om nou die lengte van elke resoneerder veranderlik te maak. In hierdie siklus word die filter dus deur 7 parameters voorgestel. Die waarde wat in fase 1 vir die lengtes van die resoneerders gevind is, is as die beginwaardes vir elk van die resoneerders se lengtes geneem. Verder is die beginwaardes van die koppelings gelyk gestel aan die waardes wat in fase 2 vir die eksterne en interne koppelings gevind. Dieselfde optimeringsalgoritme is gebruik as vir die fyner onttrekkingsalgoritme, behalwe dat die meer robuuste foutfunksie van afdeling 3.9.2, benut is.

Fase 4: Die vind van 'n 9-parameter voorstelling vir die filter

In fase 3 is opgemerk dat die optimeringsalgoritme gewoonlik 'n goeie passing op die grootte van die s-parameters gevind het. Dit is dus nodig om die foutfunksie, wat die komplekse waardes vergelyk en wat in afdeling 3.4 bespreek is, nou te begin gebruik. Ons weet egter dat die lengtes van die golfleiers aan die ente van die filter slegs 'n fase invloed het. Dit is belangrik om goeie waardes vir hierdie twee parameters te vind voor die fase effek van die ander parameters in ag geneem word, aangesien hierdie twee parameters nog baie ver uit kan wees. Deur dit nie te doen nie kan die ander parameters deur die optimeerder aangepas word in 'n poging om die fase aan te pas waarvoor die afwyking in die golfleierlengtes aan die ente van die filter eintlik verantwoordelik is. In hierdie fase word slegs hierdie twee lengtes geoptimeer. Die beginwaarde van hierdie parameters geneem word is die lengte wat fisies op die filter gemeet word. Ons weet egter dat die ladingseffek van die naasliggende irisse sal veroorsaak dat hierdie lengte effens langer vertoon. Om die presiese hoeveelheid te bereken, is daar voorafkennis van die filter nodig. Dit is gevind dat die fisies gemete lengte 'n voldoende beginwaarde is. Die beginwaardes vir beide lengtes word vir

die voorbeeldfilter as 55 mm geneem. Al die ander parameters is konstant gehou op die waardes wat in fase 3 daarvoor verkry is. Daar is weer hier gebruik gemaak van dieselfde optimeringsalgoritme as wat gebruik is in die fyner onttrekkingsalgoritme.

Fase 5: Die vind van 'n 11-parameter voorstelling vir die filter

Die waardes wat uit fase 4 verkry is, is nou naby genoeg aan die oplossing dat dit as geskikte beginwaardes in die fyner onttrekkingsalgoritme gebruik kan word. Al 11 parameters van die filter word dus in hierdie finale fase geoptimeer.

3.11 Gevolgtrekking

In hierdie hoofstuk is die ontwikkeling van die optimeringsalgoritme wat die parameteronttrekking van gekoppelde-resoneerderfilters moontlik maak, bespreek. Die verskillende fasette van die algoritme is geïdentifiseer en bespreek. Die keuse van die optimeringsmetode is ondersoek, asook die keuse van die foutfunksie. Die algoritme word verder verbeter deur gebruik te maak van die gebonde-veranderlike metode as straffunksie en die SVD-metode om die algoritme se numeriese akkuraatheid te verbeter.

Die vind van geskikte beginwaardes en die robuustheid van die metode is verder ondersoek. Die parameteronttrekkingsprobleem word verdeel in die geval waarvoor daar goeie beginwaardes beskikbaar is en die geval waar dit nie beskikbaar is nie. Die fyner onttrekkingsalgoritme en robuuste onttrekkingsalgoritme waarmee die parameters van die onderskeie probleme onttrek kan word, is bespreek. 'n Moontlike tekortkoming van die robuuste metode is dat dit gebruik maak van die feit dat die voorbeeldfilter sinkroon ingestel is en simmetriese koppelingswaardes het. Die metode mag dalk swakker vaar vir filters waarvoor hierdie eienskappe nie geld nie. Dit is egter geldig vir die meeste gekoppelde-resoneerderfilters. In die Hoofstuk 4 word gesimuleerde en gemete voorbeelde getoon waarin hierdie algoritmes gebruik is.

Hoofstuk 4

Resultate

4.1 Voorbeelde met gesimuleerde data

4.1.1 Inleiding

In Hoofstuk 3 is 'n optimeringsalgoritme voorgestel waarmee die parameters van die voorbeeldfilter onttrek kan word. In hierdie afdeling word die algoritme geëvalueer deur van gesimuleerde data gebruik te maak. Eerstens word 'n voorbeeld getoon waarin die beginwaardes naby genoeg aan die oplossing is. Die fyner onttrekkingsalgoritme wat in afdeling 3.10.1 bespreek is, word dus gebruik om die parameters van die filter te onttrek. Daarna word 'n voorbeeld getoon waarin die filter so ver uitgestel is dat die ideale waardes nie meer geskikte beginwaardes is nie. Die robuuste onttrekkingsalgoritme van afdeling 3.10.2 word in hierdie geval gebruik.

4.1.2 Voorbeeld met die fyner onttrekkingsalgoritme

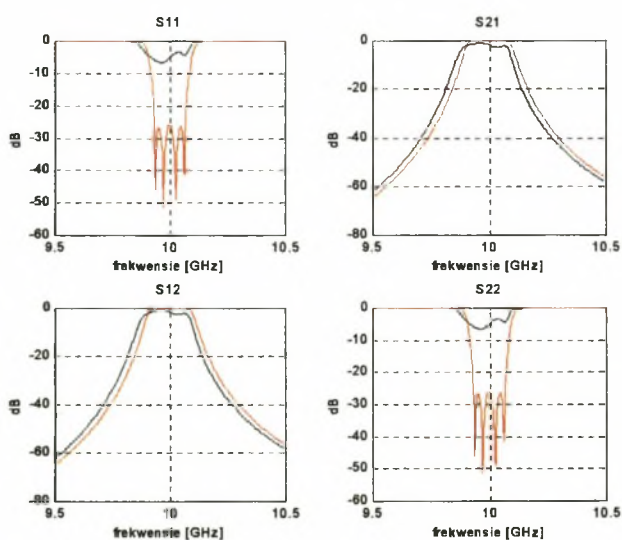
In hierdie voorbeeld is 'n verloop gesimuleer deur willekeurige waardes rondom die ideale parameterwaardes van die filter te kies. Hierdie waardes, tesame met die ideale waardes, word in tabel 4-1 gegee. In tabel 4-1 verwys g_1 en g_2 na die lengtes van die golfleierseksies aan die ente van die filter, l_1 tot l_4 verwys na die lengtes van die resoneerders en K_{ij} verwys van die koppelingswaardes. Die ideale parameterwaardes is as die beginwaardes in die optimeringsalgoritme gebruik. Die relatiewe hoeveelheid waarmee die ideale waardes verskil van

die gesimuleerde waardes word ook in tabel 4-1 gegee. Die gemiddelde waarde van hierdie verskil vir al die parameters is 1.07% en die gemiddelde waarde van die verskil vir die lengtes van die resoneerders, l_1 tot l_4 , is 0.69%. Die gesimuleerde en ideale s-parameter-verlope vir hierdie parameters word in figure 4-1 tot 4-3 getoon. Figuur 4-1 toon die grootte, figuur 4-2 toon die fase en figuur 4-3 toon 'n polêre grafiek van die grootte en fase.

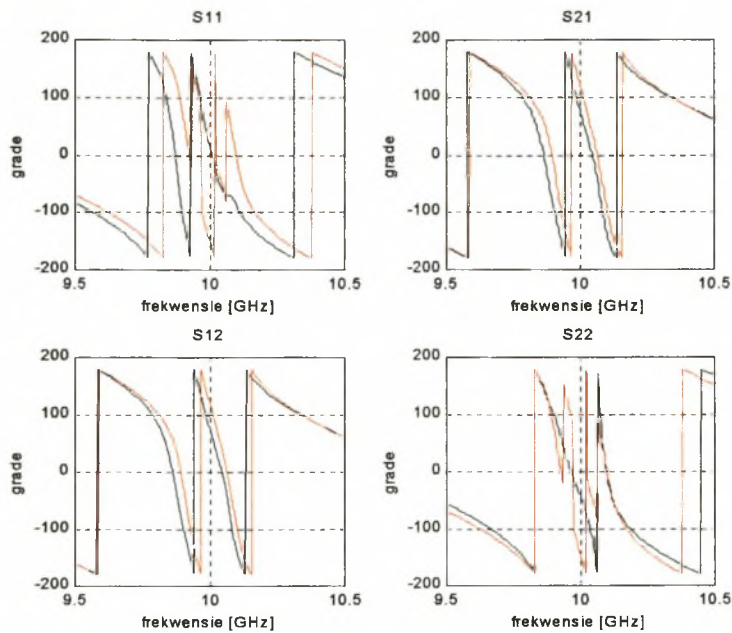
	g_1	g_2	l_1	l_2	l_3	l_4
Gesimuleerde	58.269 mm	56.688 mm	20.060 mm	20.051 mm	19.806 mm	19.967 mm
Ideale	57.6mm	57.6 mm	19.86 mm	19.86 mm	19.86 mm	19.86 mm
% verskil	-1.148 %	1.609 %	-0.997 %	-0.953 %	0.273 %	-0.536 %

	K_{01}	K_{12}	K_{23}	K_{34}	K_{45}
Gesimuleerde	0.084742	0.014986	0.010874	0.014595	0.084500
Ideale	0.08325	0.01474	0.01083	0.01474	0.08325
% verskil	-1.758 %	-1.642 %	-0.405 %	0.993 %	-1.477 %

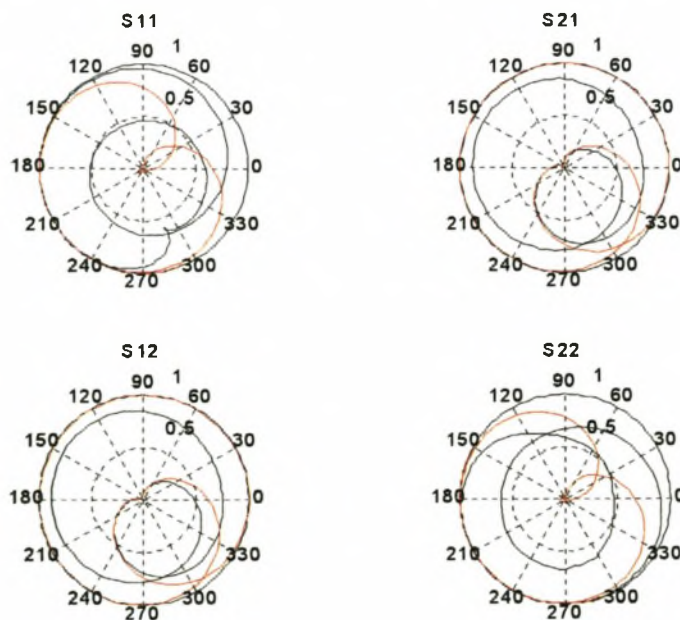
Tabel 4-1: Die gesimuleerde en ideale parameterwaardes en die relatiewe verskil tussen die ideale waardes en die gesimuleerde waardes vir die voorbeeld



Figuur 4-1: Die grootte van die s-parameters van die ideale (rooi) en die gesimuleerde (swart) filters

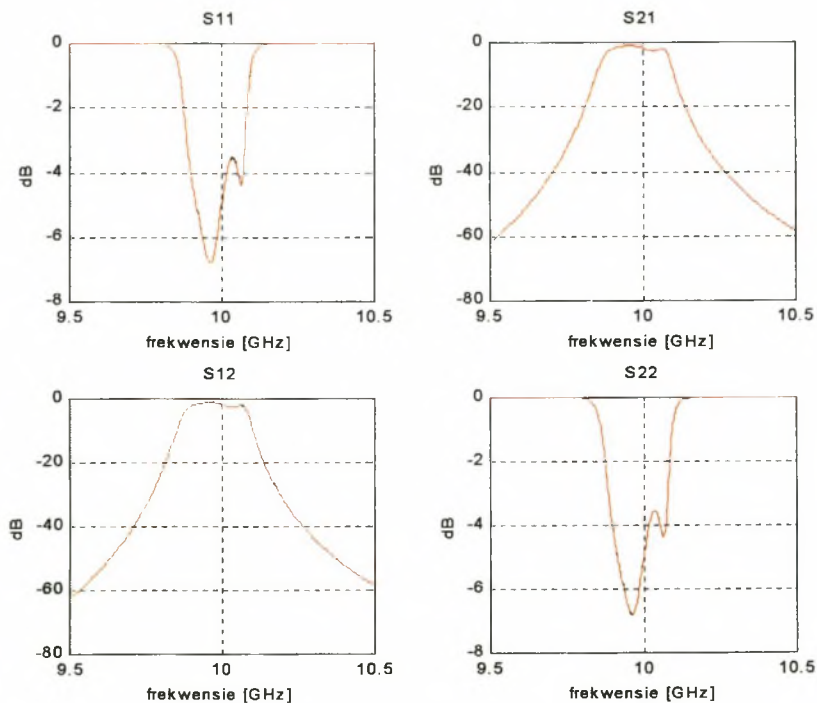


Figuur 4-2: Die fase van die s-parameters van die ideale (rooi) en die gesimuleerde (swart) filters

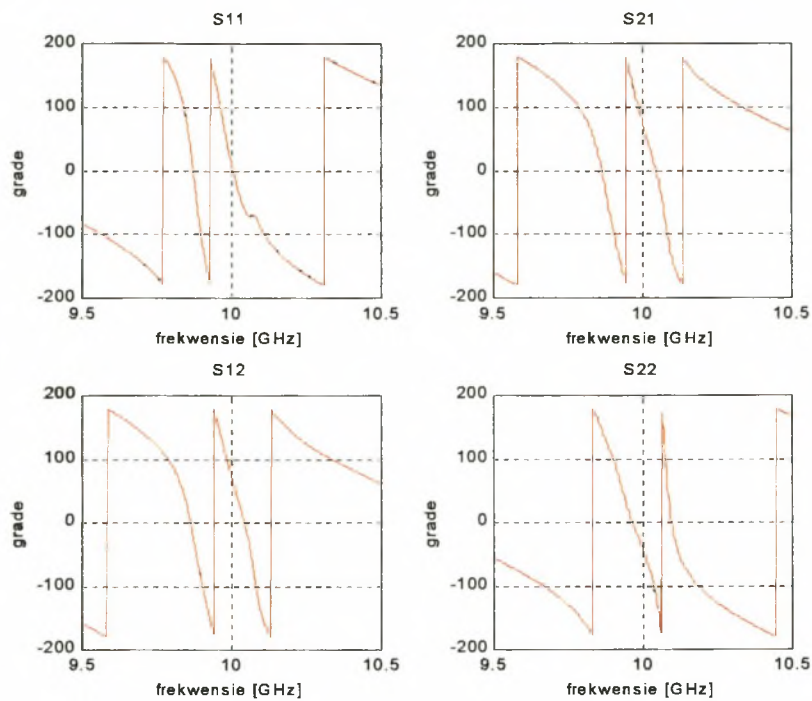


Figuur 4-3: 'n Polêre grafiek van die grootte en fase van die s-parameters van die ideale (rooi) en die gesimuleerde (swart) filters

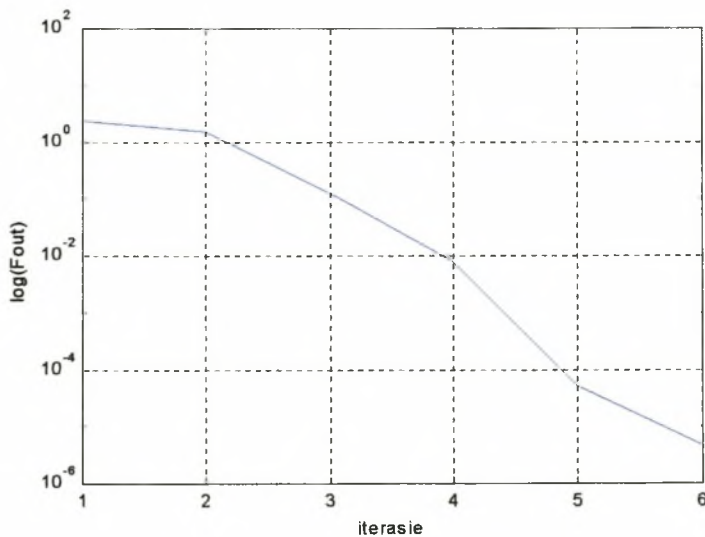
Die fyner onttrekkingsalgoritme het slegs 6 iterasies geneem en dit het 'n uitvoertyd van 10 sekondes op 'n Pentium III, 533MHz verwerker gehad. Die gesimuleerde en geoptimeerde filterverlope word getoon in figure 4-4 en 4-5. Figuur 4-4 toon die s-parameters se grootte en figuur 4-5 die fase. Al die s-parameters-verlope pas baie goed en die verskil tussen die verlope kan nie eers in die figure gesien word nie. In figuur 4-6 word getoon hoe die fout wat die foutfunksie bereken, verklein na elke iterasie van die optimeringsproses.



Figuur 4-4: Die grootte van die s-parameters wat verkry is met die onttrekte parameters (rooi) in vergelyking met die korrekte parameters (swart)



Figuur 4-5: Die fase-verloop van die s-parameters wat verkry is met die onttrekte parameters (rooi) in vergelyking met die korrekte parameters (swart)



Figuur 4-6: Die verkleining van die fout na elke iterasie van die optimeringsalgoritme

Die parameterwaardes wat in tabel 4-2 gegee word, is vir die gesimuleerde filterverloop onttrek. Die relatiewe fout waarmee die onttrekte waardes verskil van die korrekte waarde, word ook vir elk van die parameters gegee. Die resultate is baie akkuraat. Met meer siklusse kon die parameterwaardes selfs nog meer akkuraat gevind word. Die gemiddelde fout wat in die onderskeie parametergroepe gemaak is, is in tabel 4-3 gegee. Daar kan gesien word dat die gemiddelde fout 0.0098% is, terwyl daar met 'n gemiddelde fout van 1.07% begin is.

	g_1	g_2	l_1	l_2	l_3	l_4
Korrek	58.269 mm	56.688 mm	20.060 mm	20.051 mm	19.806 mm	19.967 mm
Onttrek	58.269 mm	56.688 mm	20.060 mm	20.051 mm	19.806 mm	19.967 mm
% fout	-0.00013 %	-0.00081 %	0.00113 %	0.00069 %	-0.00073 %	0.00157 %
	K_{01}	K_{12}	K_{23}	K_{34}	K_{45}	
Korrek	0.084742	0.014986	0.010874	0.014595	0.084500	
Onttrek	0.084743	0.014979	0.010870	0.014593	0.084494	
% fout	0.00105 %	-0.043518 %	-0.03345 %	-0.01698 %	-0.00723 %	

Tabel 4-2: Die korrekte parameters van die gesimuleerde voorbeeld, die onttrekte parameters en die fout in die onttrekte parameterwaarde

Al die parameters	Lengte van golfleier op ente	Resoneerderlengtes	Koppelingswaardes
0.00975 %	0.00047 %	0.00103 %	0.02044 %

Tabel 4-3: Die relatiewe fout wat in die onderskeie parametergroepe gemaak is in die parameteronttrekking van die gesimuleerde voorbeeld

Die voorbeeld wys dat die fyner onttrekkingsalgoritme korrek werk. Dit wys hoe die parameters uit 'n gesimuleerde verloop van die filter onttrek kan word deur die ideale parameterwaardes as beginwaardes te gebruik. Die metode het egter slegs gewerk indien die beginwaardes naby genoeg aan die gesimuleerde filterverloop se parameterwaardes is. Indien die beginwaardes te ver weg is, het die metode baie stadig gekonvergeer tot die korrekte waardes, of na 'n lokale minimum

gekonvergeer, of selfs heeltemal gedivergeer. Omdat die lengtes van die resoneerders die sensitiefste parameters is, moet veral hierdie parameters se beginwaardes nie ver uit wees nie. Die metode het nie meer gewerk indien die beginwaardes van die lengtes van die resoneerders met meer as ongeveer 0.9% uitgestel was nie.

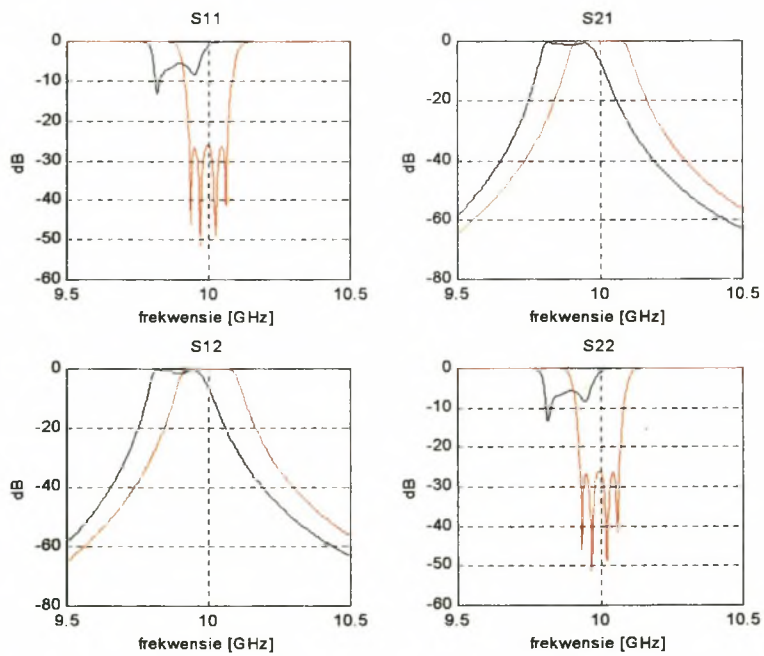
Daar is gevind dat die fyner onttrekkingsalgoritme nie baie effektief op gemete voorbeelde is nie. Dit is waarskynlik omdat die gemete voorbeeld te ver uitgestel is en die ideale parameterwaardes nie geskikte beginwaardes is nie. Hierdie algoritme sal die presiese oplossing vinnig vind, mits daar oor goeie beginwaardes beskik word. Dit is egter nie robuus genoeg nie.

4.1.3 Voorbeeld met die robuuste onttrekkingsalgoritme

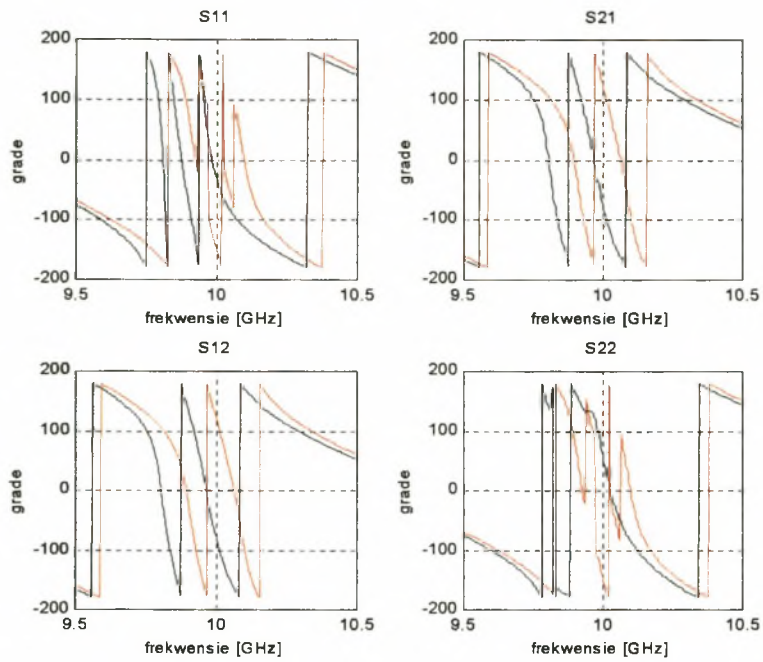
In hierdie voorbeeld is 'n verloop gesimuleer deur willekeurige waardes rondom die ideale parameterwaardes van die filter te kies. Hierdie waardes, tesame met die ideale waardes, word in tabel 4-4 getoon. Die relatiewe hoeveelheid waarmee die ideale waardes van die gesimuleerde waardes verskil, word ook in tabel 4-4 getoon. Die gemiddelde waarde van hierdie verskil vir al die parameters is 1.075% en die gemiddelde waarde van die verskil vir die lengtes van die resoneerders, l_1 tot l_4 , is 1.653%. Let op dat die gemiddelde verskil vir al die parameters vergelykbaar is met die van die voorbeeld met die fyner onttrekkingsalgoritme in afdeling 4.1.2. Hier is die verskil tussen die waardes vir die lengtes van die resoneerders veel groter. Hierdie voorbeeld se parameters kon nie onttrek word deur die fyner onttrekkingsalgoritme nie. Die s-parameters van die gesimuleerde en ideale filterverlope word in figure 4-7 tot 4-9 getoon. Figuur 4-7 toon die grootte, figuur 4-8 toon die fase en figuur 4-9 toon 'n polêre grafiek van die grootte en fase.

	g_1	g_2	l_1	l_2	l_3	l_4
Gesimuleerde	57.752 mm	57.858 mm	20.271 mm	20.227 mm	20.289 mm	19.991 mm
Ideale	57.6 mm	57.6 mm	19.86 mm	19.86 mm	19.86 mm	19.86 mm
% verskil	-0.263 %	-4.459 %	-2.028 %	-1.814 %	-2.114 %	-0.655 %
	K_{01}	K_{12}	K_{23}	K_{34}	K_{45}	
Gesimuleerde	0.081935	0.014539	0.010793	0.014776	0.082483	
Ideale	0.08325	0.01474	0.01083	0.01474	0.08325	
% verskil	1.605 %	1.383 %	0.343 %	-0.244 %	0.930 %	

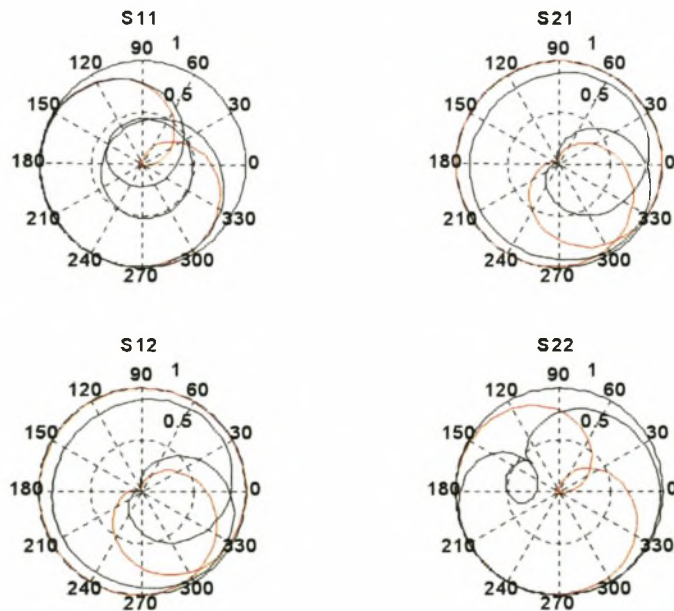
Tabel 4-4: Die gesimuleerde en ideale parameterwaardes en die relatiewe verskil tussen die ideale waardes en die gesimuleerde waardes vir die voorbeeld



Figuur 4-7: Die grootte van die s-parameters van die ideale (rooi) en die gesimuleerde (swart) filters



Figuur 4-8: Die fase van die s-parameters van die ideale (rooi) en die gesimuleerde (swart) filters

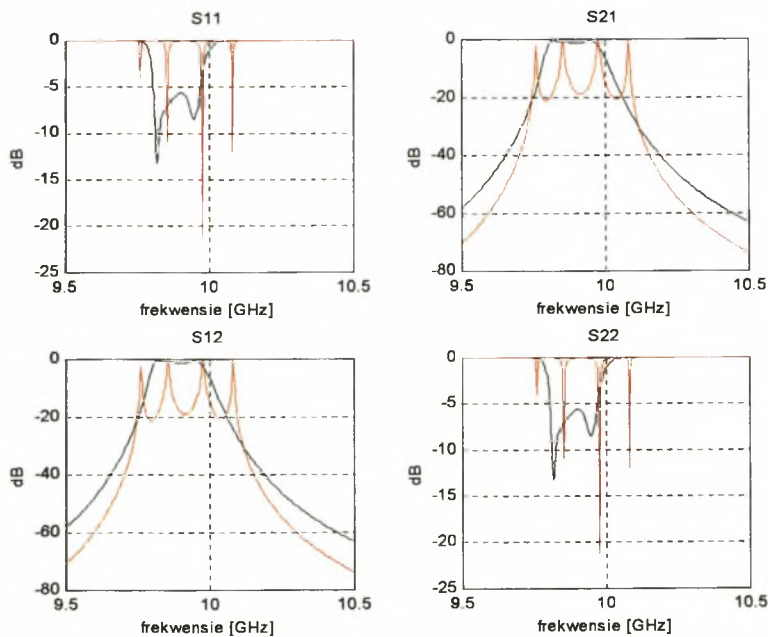


Figuur 4-9: 'n Polêre grafiek van die grootte en fase van die s-parameters van die ideale (rooi) en die gesimuleerde (swart) filters

Die robuuste onttrekkingsalgoritme is nou gebruik om die parameters van die gesimuleerde verloop te onttrek. Hierdie algoritme benodig nie enige beginwaardes nie. Daar is wel grense nodig vir die parameterwaardes. Hierdie grense is gestel op 5% en 195% van die ideale waardes. Die algoritme bestaan uit vyf fases, wat in afdeling 3.10.2 bespreek is.

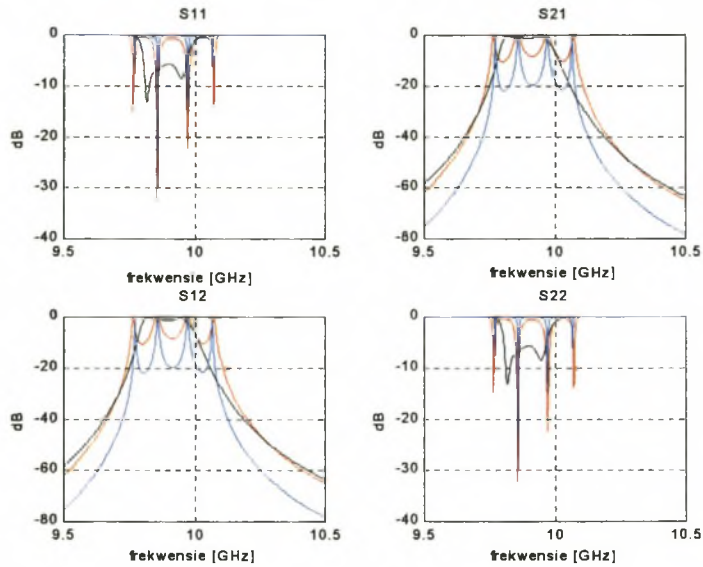
Die geoptimeerde waardes se verloop na elke fase, word in figuur 4-10 tot figuur 4-14, getoon. Die grootte en of fase van die s-parameters wat betrokke is by elke fase word in hierdie figure getoon. Vir elke fase van die algoritme word die verloop waarmee dit begin, die ideale verloop en die verloop na die afloop van die fase getoon. In tabel 4-5 word die parameterwaardes wat na elke fase verkry is, getoon en in tabel 4-6 word die aantal siklusse wat die betrokke fase geneem het gegee.

Fase 1



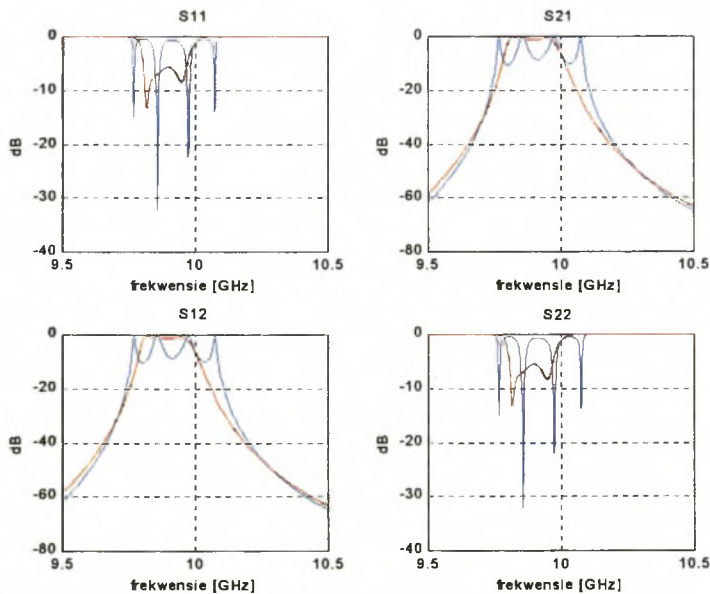
Figuur 4-10: Die passing van die grootte van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verloop (rooi) na fase 1

Fase 2

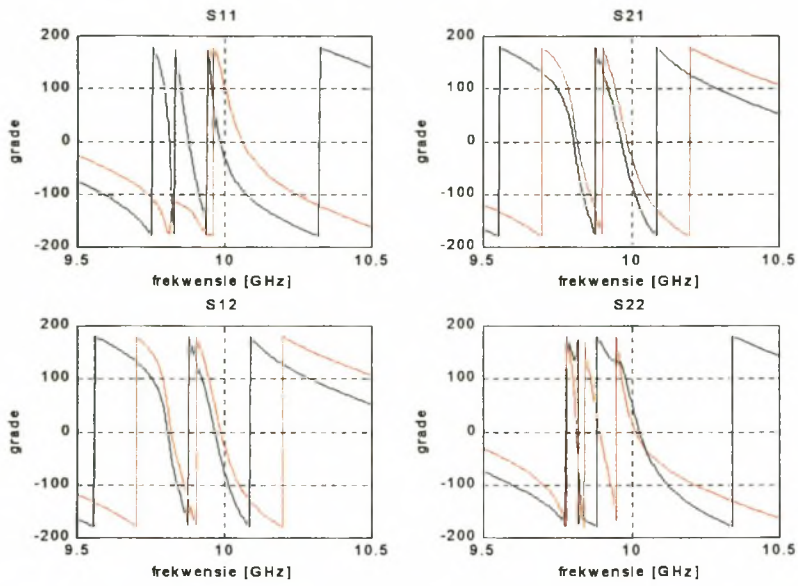


Figuur 4-11: Die passing van die grootte van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verlope voor (blou) en na (rooi) fase 2

Fase 3

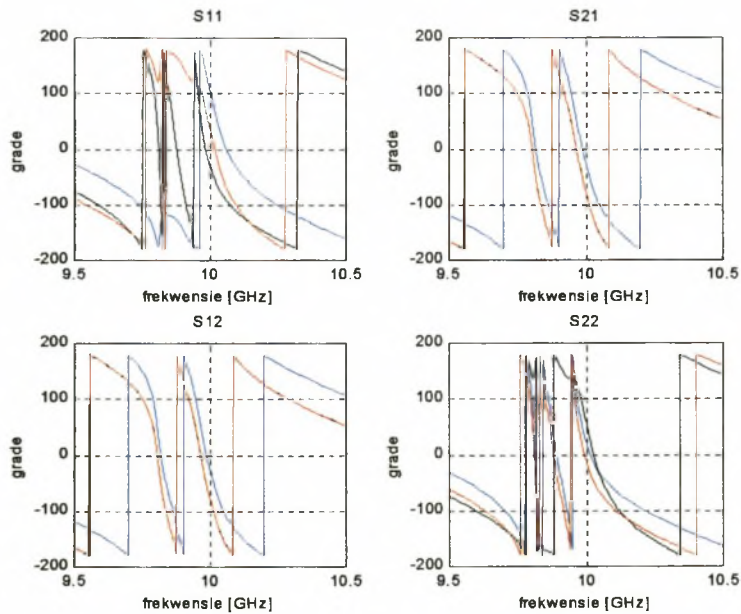


Figuur 4-12: Die passing van die grootte van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verlope voor (blou) en na (rooi) fase 3



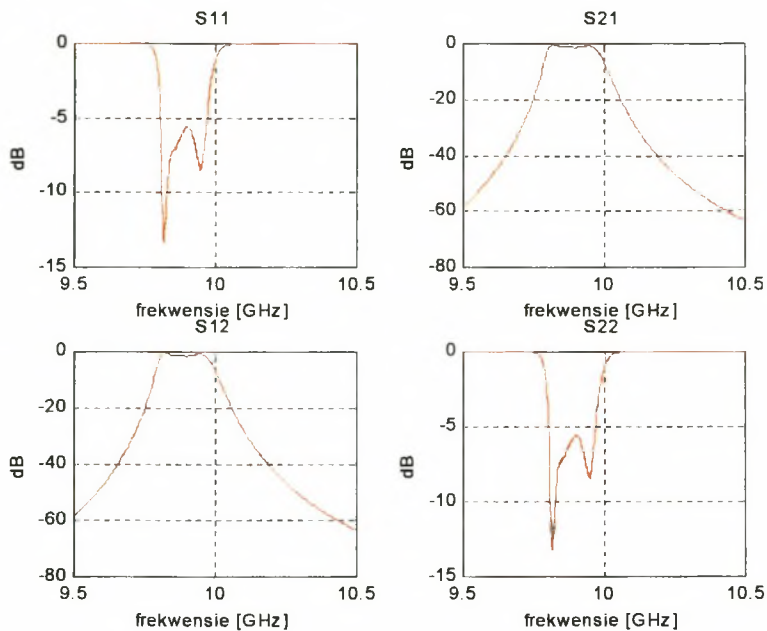
Figuur 4-13: Die passing van die fase van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verloop (rooi) na fase 3

Fase 4

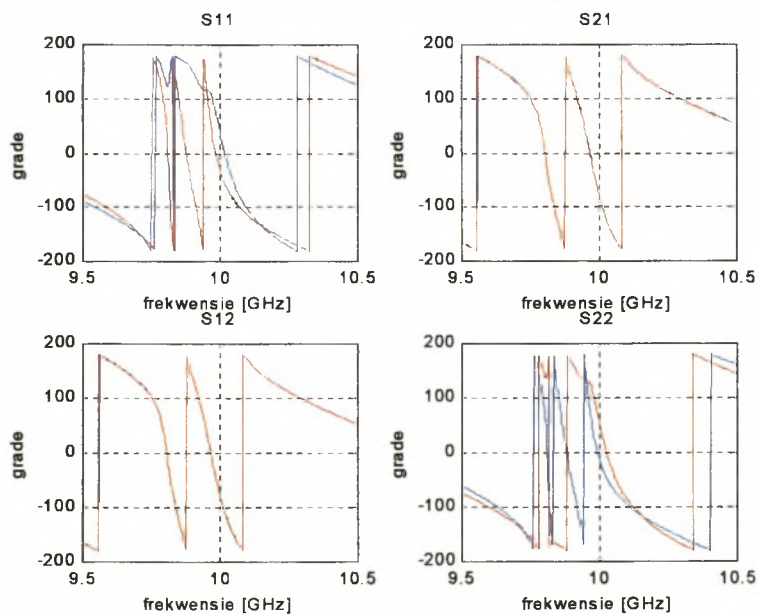


Figuur 4-14: Die passing van die fase van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verlope voor (blou) en na (rooi) fase 4

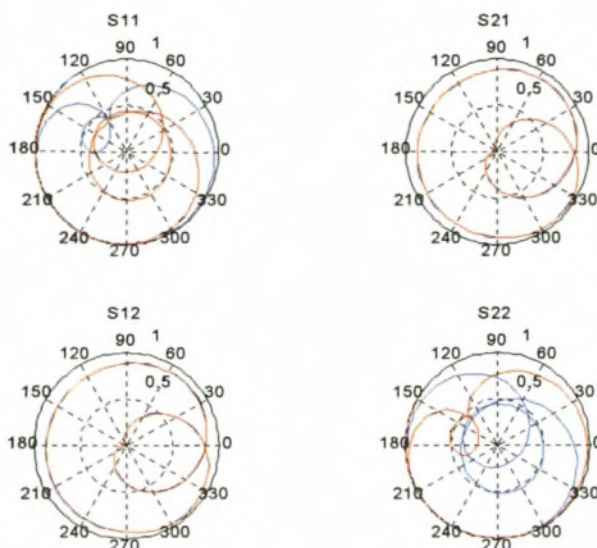
Fase 5



Figuur 4-15: Die passing van die grootte van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verlope na (rooi) fase 5



Figuur 4-16: Die passing van die fase van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verlope voor (blou) en na (rooi) fase 5



Figuur 4-17: 'n Polêre grafiek van die grootte en fase van die s-parameters, tussen die gesimuleerde verloop (swart) en die geoptimeerde verlope voor (blou) en na (rooi) fase 5

	Lengtes van ent-golfleiers		Lengtes van resoneerders				Koppelings				
							Eksterne koppelings		Interne koppelings		
	g ₁ [mm]	g ₂ [mm]	l ₁ [mm]	l ₂ [mm]	l ₃ [mm]	l ₄ [mm]	K ₀₁	K ₄₅	K ₁₂	K ₃₄	K ₂₃
Korrek	57.752	57.858	20.271	20.227	20.289	19.991	0.081935	0.082483	0.014539	0.014776	0.010793
Fase 1	_____		20.156				0.020752				
Fase 2	_____		20.156				0.037669		0.019846		
Fase 3	_____		19.996	20.290	20.227	20.269	0.082112		0.014696		0.010758
Fase 4	58.736	56.842	19.996	20.290	20.227	20.269	0.082112		0.014696		0.010758
Fase 5	57.753	57.858	20.271	20.227	20.289	19.991	0.081936	0.082468	0.014539	0.014779	0.010792
% Fout	0.0012	-0.0001	0	0	-0.0004	0.0002	0.0016	-0.0182	0.0019	0.0226	-0.0069

Tabel 4-5: Die geoptimeerde parameterwaardes na elke fase van die robuuste onttrekkingsalgoritme en die % fout in die eindwaardes

In tabel 4-5 verwys g_1 en g_2 na die lengtes van die golfleierseksies aan die ente van die filter, l_1 tot l_4 verwys na die lengtes van die resoneerders en K_{ij} verwys na die koppelingswaardes. Die resultate van hierdie algoritme is baie akkuraat, veral vir die lengtes van die resoneerders. Die algoritme het 'n uitvoertyd van 30 sekondes op 'n Pentium III, 533MHz verwerker gehad. Die aantal optimeringsiklusse wat tydens elke fase benodig is word in tabel 4-6 getoon. Die aantal siklusse wat elke fase neem wissel egter baie van probleem tot probleem en dit is afhanklik van die akkuraatheidsfaktor wat gekies is vir elke fase, soos in afdeling 3.8 bespreek is.

Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4	Fase 5
—	9	23	9	5

Tabel 4-6: Die aantal optimeringsiklusse vir elke fase

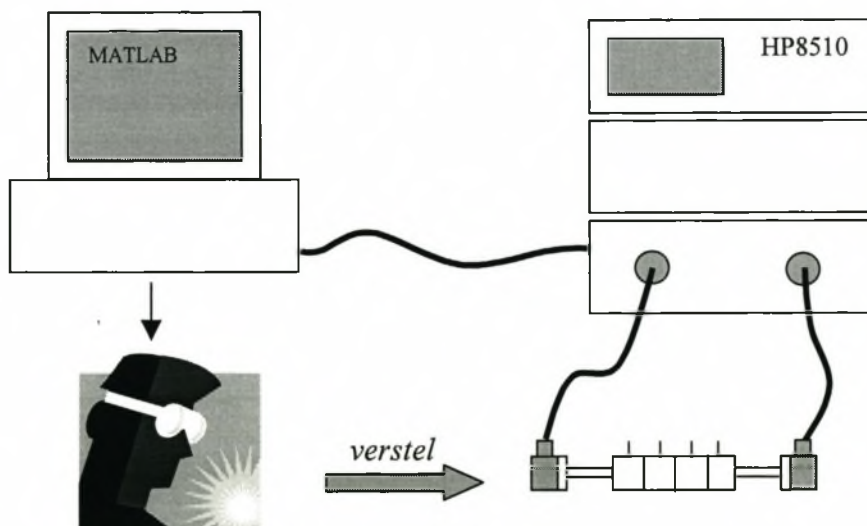
Hierbo is getoon dat die ontwikkelde robuuste onttrekkingsalgoritme parameterwaardes kan vind wat 'n baie akkurate passing op al die s-parameters lewer. Daar hoef ook geen beginwaardes vir hierdie algoritme gespesifiseer te word nie.

4.2 Voorbeelde met gemete data

4.2.1 Inleiding

Die voorgestelde parameteronttrekkingsalgoritme word in hierdie afdeling geëvalueer met gemete voorbeelde. Die voorbeeldfilter wat in afdeling 2.2 bespreek is, is hiervoor gebruik. Rekenaargesteunde parameteronttrekking maak die semi-geoutomatiseerde instellingsproses, wat in figuur 4-18 getoon word, moontlik.

Die meetopstelling word ook deur figuur 4-18 verduidelik. Die HP8510-netwerkanaliseerder is gebruik om die filter se verloop te meet. 'n TRL-kalibrasie ("*Through Reflection Line*") is gebruik en 401 punte tussen 9.5GHz en 10.5GHz word gemeet. Daar is van 'n GPIB-koppelvlak gebruik gemaak, waarmee die HP8510-netwerkanaliseerder vanuit MATLAB aangespreek kan word. Die filter se s-parameters word gemeet en direk in 'n MATLAB-formaat gestoor. Die program is uitgevoer op 'n rekenaar met 'n Pentium III 533MHz verwerker en 384 MB RAM.



Figuur 4-18: Die semi-geoutomatiseerde instellingsproses

Die voorbeeldfilter het vier instellingskroewe in elk van die resoneerders, soos in figuur 2-1 getoon is. Volgens Thal [4,9] veroorsaak die indringing van 'n skroef in die resoneerderruimte 'n afname in die frekwensie in 'n mode waarvan die elektriese veld parallel aan die skroef is en 'n toename in frekwensie in 'n mode waarvan die elektriese veld ortogonaal aan die skroef is. In die voorbeeldfilter word daar gebruik gemaak van die TE₁₁-mode in die silindriese golfleier. Die filter word gevoer deur 'n reghoekige golfleier wat die TE₁₀-mode ondersteun. Dit veroorsaak dat die TE₁₁-mode in die silindriese golfleier so georiënteer is dat, die elektriese veld parallel aan die skroef is. Indien die skroef ingedraai word sal die resonantefrekwensie van die resoneerder dus verlaag, wat ekwivalent is aan 'n resoneerder met 'n langer lengte. Indien die parameters van 'n filterverloop bekend is, kan daar maklik gesien word watter resoneerderlengtes langer en watter resoneerderlengtes korter is as die resoneerderlengtes van die ingestelde weergawe van die filter. Die skroewe kan dienooreenkomstig verstel word.

In [23] en [30] toon Harsher dat 'n skroef se instelling ongelukkig verskeie van die filter se parameters beïnvloed. Die voorbeeldfilter se skroewe sal die grootste invloed hê op die resoneerderlengte van die resoneerder waarin dit voorkom, maar die naasliggende resoneerderlengtes en –koppeling word ook beïnvloed. Harsher se metodes [23,30] bepaal die sensitiwiteit van die skroewe op al die verskillende parameters deur addisionele metings. Die presiese aantal draaie waarmee elke skroef dan verstel moet word, kan hieruit bereken word. Hierdie metode maak van die linearisering van die skroewe se invloed op die parameters gebruik, wat slegs van toepassing is indien die filter reeds naby die ingestelde posisie is. Verder benodig dit ook 'n akkurate stappermotor-stelsel om die skroewe presies te draai. Dit beperk die proses tot 'n spesifieke filtervoorbeeld en is dus nie so prakties nie, tensy daar groot hoeveelhede van die spesifieke filter ingestel moet word.

Die metode van Macchiarella [29] maak van 'n eenvoudige maar baie effektiewe metode gebruik om die verstelling van die instellingselemente te doen. In hierdie metode word slegs die verstelbare parameter wat die verste uitgestel is, telkens ingestel. Na parameteronttrekking word die s-parameterverloop bereken wat verkry word indien hierdie parameter presies ingestel is. Dit voorspel hoe die meting gaan lyk indien die instellingselement wat betrekking het op hierdie parameter, optimaal ingestel is. Die hoeveelheid waarmee die onttrekte parameterwaarde verskil

van die verlangde waarde, bied ook 'n aanduiding van die rigting waarin en die hoeveelheid waarmee die skroef verstel moet word. 'n Operateur verstel nou die instellingselement totdat die gemete verloop so na as moontlik aan die voorspelde verloop kom.

Macchiarella [29] se metode is in die voorbeelde wat volg, gebruik om die nodige verstellings van die instellingselemente aan te bring. Met hierdie metode word die filter gewoonlik akkuraat genoeg ingestel binne n siklusse waar n die aantal instellingselemente is. Verder hoef die robuuste onttrekkingsalgoritme wat nie goeie beginwaardes benodig nie, hoogstens een maal aan die begin, gebruik te word. Hierdie algoritme duur heelwat langer as die fyner onttrekkingsalgoritme. Gevolglik word die tydsduur van die totale instellingsproses verkort. Hierdie metode is eenvoudig genoeg dat die operateur nie opgelei hoef te wees nie. Verder is die metode prakties bruikbaar in gevalle waar daar slegs 'n enkele filter ingestel moet word of vir gevalle waar daar groot hoeveelhede ingestel moet word.

Die presiese metode wat gevolg is, kan stapsgewys soos volg geskryf word:

- Stap 1)** Al die skroewe word aanvanklik so ver moontlik uitgestel.
- Stap 2)** Die robuuste onttrekkingsalgoritme word gebruik om die parameters van hierdie filterverloop te onttrek.
- Stap 3)** Die resoneerderlengte wat die kortste is, word geïdentifiseer. Daar word bereken hoe die filterverloop sal lyk indien hierdie resoneerder ingestel is.
- Stap 4)** Die skroef van die resoneerder word ingedraai totdat die gemete verloop ongeveer soos die voorspelde verloop lyk.
- Stap 5)** Die voorspelde parameters word nou as die beginwaardes in die fyner onttrekkingsalgoritme gebruik en die parameters van hierdie verloop word onttrek.
- Stap 6)** Indien die filterinstelling nog nie voldoende is nie word die proses vanaf stap 3 herhaal

Hieronder volg nou 'n beskrywing van die instellingsproses wat gebruik is om die voorbeeldfilter in te stel. Instelling van die filter by 10GHz word eerste in afdeling 4.2.2 uiteengesit. Uit hierdie

proses het dit geblyk dat een van die resoneerders te lank is om hier ingestel te kan word. Die resoneerders is vervolgens in afdeling 4.2.3 ingestel om dieselfde lengtes te vertoon.

4.2.2 Instelling van die voorbeeldfilter by 10GHz

By die instelling van die filter by 10GHz word daar gepoog om die onttrekte parameters so na as moontlik aan die elementwaardes van die filter, wat in tabel 2-10 getoon is, te kry. Slegs die resoneerderlengtes van die voorbeeldfilter is verstelbaar. Die koppelings is dus nie verstelbaar nie, maar aangesien die waarde van die koppeling nie so 'n sensitief is nie, behoort die moontlike onakkuraatheid in die vervaardiging daarvan nie so groot effek op die verloop van die filter te hê nie. Dit volg dus dat die instelling van die filter die verstelling van die skroewe in die resoneerders behels, sodat die lengtes wat daarvoor onttrek word, gelyk is aan 19.86mm.

Die instellingsproses word opgesom in tabel 4-7. Hier word die nommer van die instellingstap gegee saam met die parameteronttrekking se waardes wat gebruik is om die betrokke verstelling te maak. Die parameterwaardes word getoon saam met die persentasie verskil van elke waarde met die ideale waardes. In tabel 4-7 verwys g_1 en g_2 na die lengtes van die golfleierseksies aan die ente van die filter, l_1 tot l_4 verwys na die lengtes van die resoneerders en K_{ij} verwys na die koppelingswaardes. Omdat slegs die resoneerders verstelbaar is, word die resoneerderlengte wat die verste uit is, geïdentifiseer en op tabel 4-7 gemerk. 'n Verloop word dan gegenereer waarin hierdie resoneerder se lengte gelyk gestel word aan 19.86mm. Die betrokke instellingskroef is daarna verstel tot die gemete verloop rofweg op die voorspelde verloop pas. Hierna is weer 'n parameteronttrekking van die meting gedoen.

	g_1 [mm]	g_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_4 [mm]	K_{01}	K_{12}	K_{23}	K_{34}	K_{45}	
Ideaal	57.60	57.60	19.86	19.86	19.86	19.86	0.08325	0.01474	0.01083	0.01474	0.08325	
1	Parameters (fyner alg.)	57.323	57.288	19.929	19.468	19.693	19.760	0.082051	0.01909	0.013151	0.016894	0.085591
	% uit	-0.481	-0.542	0.349	-1.972	-0.839	-0.501	-1.443	29.514	21.430	14.612	2.809
1	Parameters (robuuste algoritme)	57.296	57.256	19.933	19.464	19.683	19.786	0.082585	0.018806	0.01303	0.016854	0.086079
	% uit	-0.528	-0.597	0.366	-1.992	-0.892	-0.372	-0.802	27.588	20.316	14.343	3.396
Resoneerder 2 se skroef is ingestel												
2	Parameters (fyner alg.)	57.318	57.306	19.94	19.838	19.683	19.768	0.08284	0.01776	0.012598	0.01685	0.085619
	% uit	-0.488	-0.511	0.404	-0.113	-0.891	-0.465	-0.495	20.489	16.322	14.317	2.843
Resoneerder 3 se skroef is ingestel												
3	Parameters (fyner alg.)	57.377	57.279	19.933	19.836	19.853	19.773	0.083414	0.017642	0.012622	0.016658	0.086035
	% uit	-0.387	-0.557	0.365	-0.123	-0.037	-0.436	0.195	19.690	16.544	13.010	3.343
Resoneerder 4 se skroef is ingestel												
4	Parameters (fyner alg.)	57.379	57.361	19.942	19.828	19.854	19.866	0.083371	0.017706	0.012545	0.016485	0.085217
	% uit	-0.384	-0.415	0.411	-0.162	-0.028	-0.030	0.142	20.123	15.836	11.836	2.361
Resoneerder 1 is die eerste uit maar kan nie verbeter dus word resoneerder 2 se skroef weer verstel												
5	Parameters (fyner alg.)	57.400	57.336	19.937	19.856	19.855	19.869	0.083692	0.017632	0.012505	0.016561	0.084857
	% uit	-0.347	-0.459	0.387	-0.018	-0.027	0.047	0.529	19.619	15.467	12.356	1.928
Die filter se instelling is voltooi												

Tabel 4-7: 'n Opsomming van die onttrekte parameters en die relatiewe verskil daarvan met die ideale waardes, na elke instellingstap

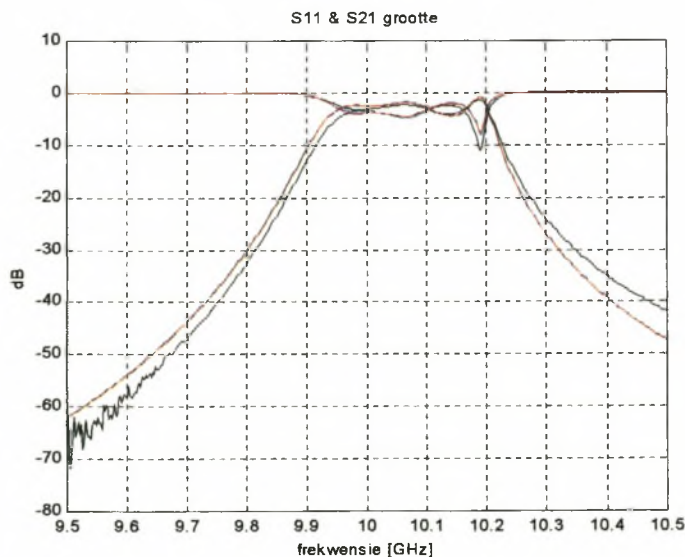
Daar is begin met al die skroewe so ver moontlik uitgedraai. Die verloop wat verkry is, word in figuur 4-19 getoon. Vir die eerste verstelling is daar van beide die robuuste en fyner onttrekkingsalgoritme gebruik gemaak om die parameterwaardes te vind. Beide algoritmes was vir hierdie voorbeeld suksesvol. Dit beteken dat die situasie waar al die stelskroewe so ver moontlik

uitgestel is, na genoeg is aan die elementwaardes. Daar kan egter baie voorbeelde gegee word waar slegs die meer robuuste metode die parameters uit die filterverloop kon onttrek. Die passing wat met beide algoritmes verkry is, vergelyk goed en word in figuur 4-19 getoon. Dit bleik uit tabel 4-7 dat resoneerder 2 die verste uit was en die verstelling is gedoen.

Vanaf instellingstap 2 is die parameteronttrekking met die fyner onttrekkingsalgoritme gedoen. Die voorspelde verloop is telkens as beginwaardes vir hierdie algoritme gebruik. Na instellingstap 4 is opgelet dat die lengte van resoneerder 1 die verste uit is. Dit is duidelik dat l_1 te groot is en dat die skroef van resoneerder 1 dus uit gedraai moet word. Die skroef is egter reeds so ver as moontlik uit gedraai. Dit kom dus voor asof die filter 'n vervaardigingsfout het wat tot gevolg het dat die lengte van resoneerder te lank vertoon. Die lengte wat die tweede meeste uit is, naamlik resoneerderlengte 2, is dus in die volgende stap weer gestel.

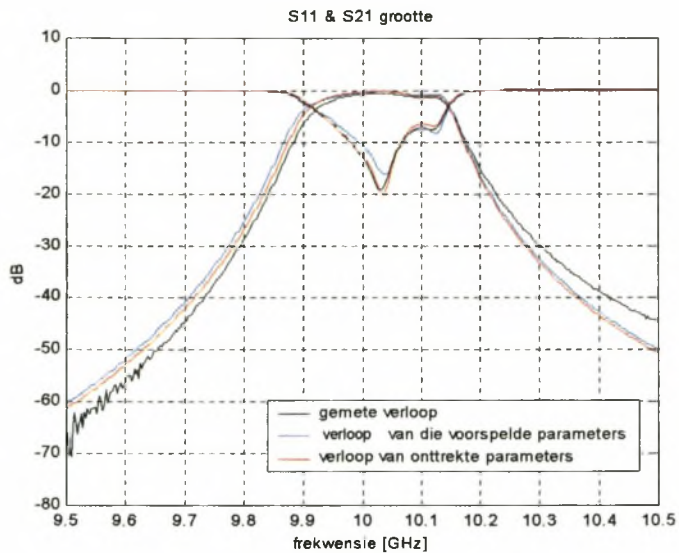
Die proses is opgesom in tabel 4-7 en die passing by elke instellingstap word in figure 4-19 tot 4-23 getoon.

Instellingstap 1



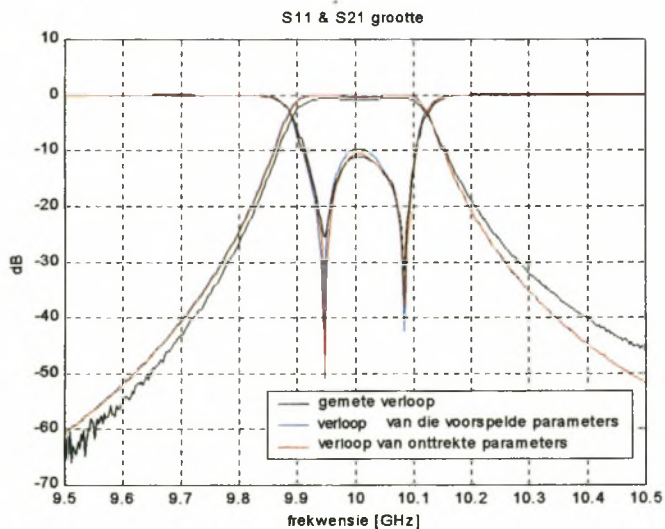
Figuur 4-19: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verloop van die parameters soos gevind deur die fyner onttrekkingsalgoritme (blou) en die robuuste onttrekkingsalgoritme (rooi)

Instellingstap 2



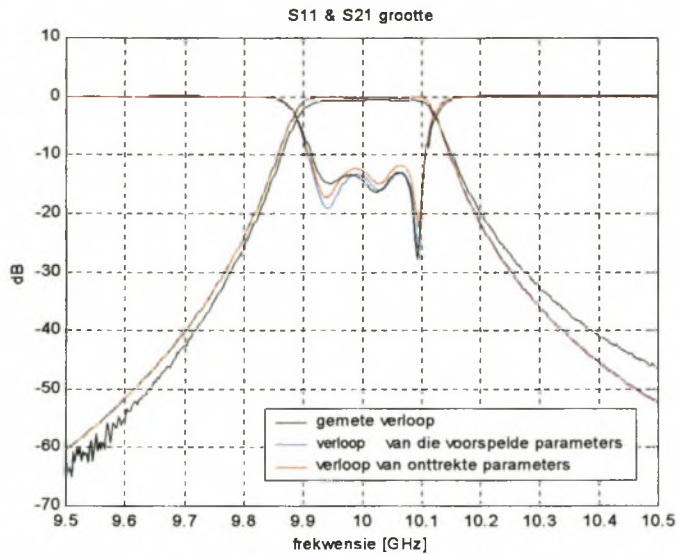
Figuur 4-20: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 2

Instellingstap 3



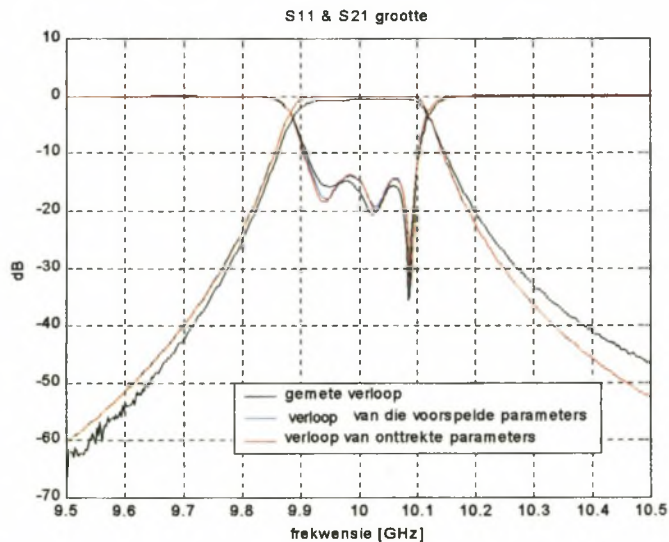
Figuur 4-21: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 3

Instellingstap 4



Figuur 4-22: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 4

Instellingstap 5

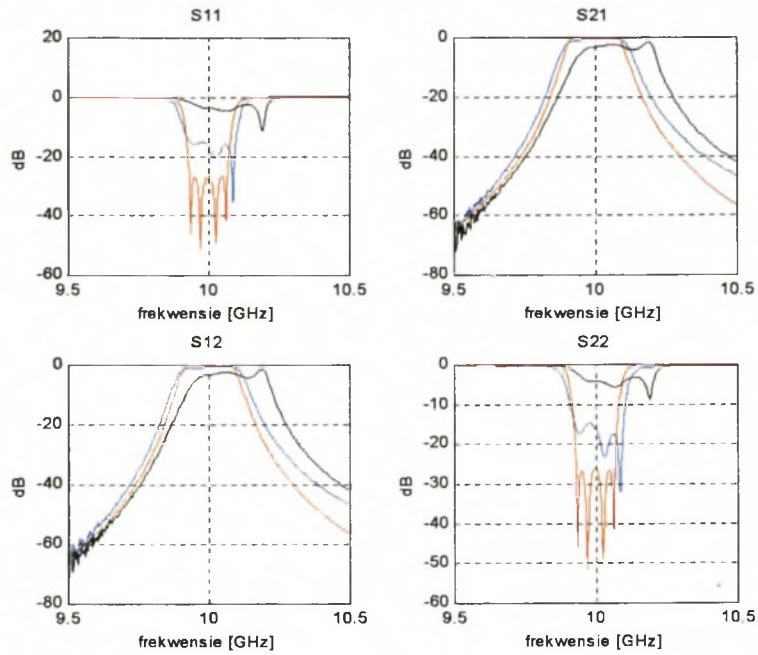


Figuur 4-23: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 5

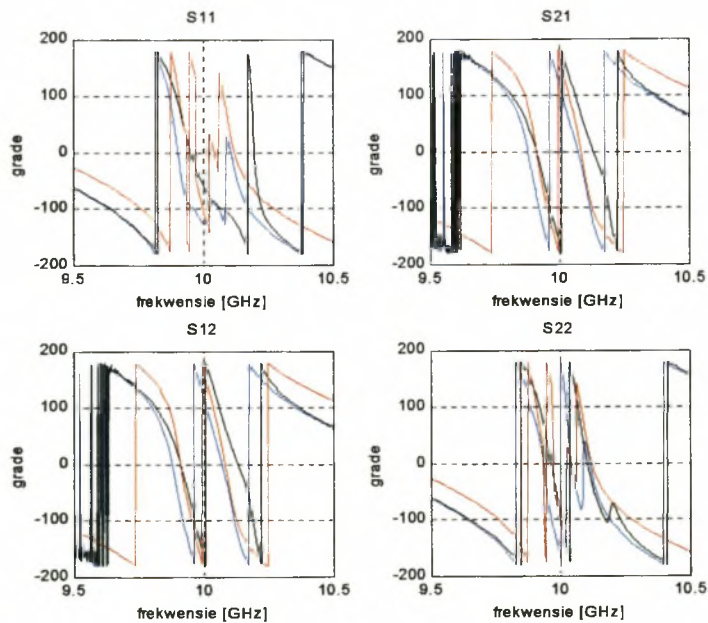
Daar is na instellingstap 5 opgelet dat al die resoneerderwaardes behalwe l_1 baie naby aan die verlangde waarde van 19.86mm is. Dit is dus die beste instelling wat met hierdie filter by 10GHz verkry kon word. Die spesifikasies van hierdie meting word in tabel 4-8 vertoon en die ingestelde en uitgestelde verloop word in figuur 4-24 tot 4-26 met mekaar vergelyk. In die volgende afdeling word die instelling van die filter gedoen deur eerder die resoneerders in te stel sodat almal ewe lank is. Daar word die onttrekte waarde vir die te lang resoneerder, l_1 , geneem as die waarde waaraan al die resoneerders gelyk gestel word. Daar word verwag dat die filter 'n beter weerkaatskoeffisiënt sal lewer met so 'n instelling.

	Verlangde	Gemete
Senterfrekwensie	10 GHz	10.003 GHz
Bandwydte	2%	2.36 %
Maksimum weerkaatskoeffisiënt in deurlaatband	-26 dB	-14.85 dB

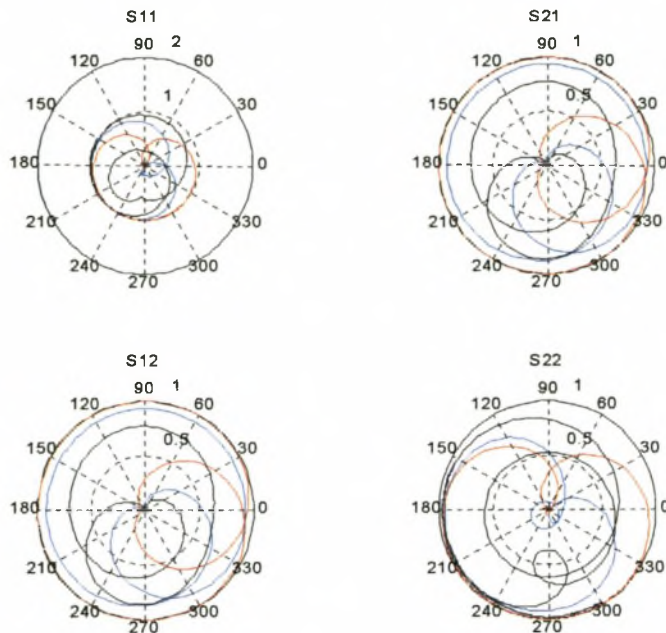
Tabel 4-8: 'n Vergelyking tussen die spesifikasies van die gemete filter wat by 10GHz ingestel is en die ideale spesifikasies



Figuur 4-24: Die gemete grootte van die s-parameters van die aanvanklike uitgestelde filter (swart), die ingestelde filter (blou) en die ideale verloop (rooi)



Figuur 4-25: Die gemete fase van die s-parameters van die aanvanklike uitgestelde filter (swart) en die ingestelde filter (blou) en die ideale verloop (rooi)



Figuur 4-26: 'n Polêre grafiek van die grootte en fase van die gemete s-parameters van die aanvanklike uitgestelde filter (swart) en die ingestelde filter (blou) en die ideale verloop (rooi)

In tabel 4-9 word die tyd wat die parameteronttrekkingsalgoritme van elke instellingstap geduur het, genoteer asook die fout na die onttrekkingsalgoritme van die betrokke stap gekonvergeer het.

	Instellingstap 1	Instellingstap 2	Instellingstap 3	Instellingstap 4	Instellingstap 5
Tydsduur	Fyner: 40sek Robuuste: 1min 2sek	13 sek	11 sek	9 sek	9 sek
Fout	Fyner: 0.04343 Robuuste: 0.0412	0.0326	0.0355	0.0391	0.0352

Tabel 4-9: Die tydsduur en fout van die parameteronttrekkingsalgoritme van die onderskeie instellingstappe tydens die instelling van die filter by 10GHz

4.2.3 Sinkroniese instelling van die resoneerders van die voorbeeldfilter

By hierdie instelling van die filter word daar gepoog om die onttrekte lengtes vir die resoneerders almal ewe lank te kry. Die waarde vir l_1 wat in die vorige afdeling onttrek is, is geneem as die lengte waaraan almal hier gelyk gestel moet word. Hierdie waarde is ongeveer 19.95mm.

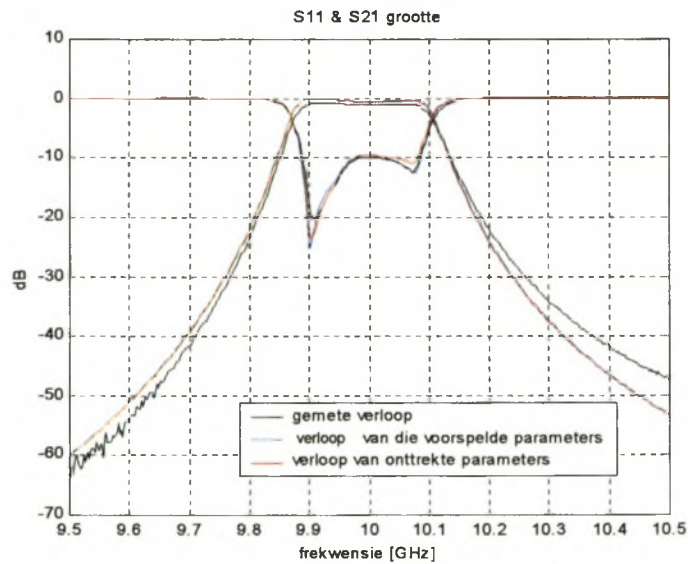
Die instellingsproses word opgesom in tabel 4-10. Hier word die nommer van die instellingstap gegee saam met die parameters wat onttrek is en wat gebruik is om die betrokke verstelling te maak. Die parameterwaardes word verskaf saam met die persentasie verskil van elke waarde met die ideale waardes. In tabel 4-10 verwys g_1 en g_2 na die lengtes van die golfleierseksies aan die ente van die filter, l_1 tot l_4 verwys na die lengtes van die resoneerders en K_{ij} verwys na die koppelingswaardes. Die resoneerderlengte wat die verste uit is, is weer gemerk. 'n Verloop word dan gegenereer waarin hierdie resoneerder se lengte gelyk gestel word aan 19.95mm. Die betrokke instellingskroef is daarna verstel tot die gemete verloop rofweg op die voorspelde verloop pas. Hierna is weer 'n parameteronttrekking van die meting gedoen.

Om hierdie instelling te begin, is die waardes wat in stap 5 van die vorige instelling bereken is, gebruik. Dit word weer in tabel 4-10 getoon saam met die relatiewe verskil met die ideale waardes van die filter. Hier is al die ideale waardes van die resoneerderlengtes egter geneem as 19.95mm. Die verloop wat verkry is, is reeds in figuur 4-23 getoon. Die verskil wat dit het met die nuwe ideale waardes word in tabel 4-10 getoon en daar kan gesien word dat resoneerder 3 ingestel moet word. Verder is die parameteronttrekking met die fyner onttrekkingsalgoritme gedoen soos in tabel 4-10 uiteengesit is. Die voorspelde parameters is telkens as beginwaardes vir hierdie algoritme gebruik.

	g_1 [mm]	g_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	l_3 [mm]	l_4 [mm]	K_{01}	K_{12}	K_{23}	K_{34}	K_{45}	
Ideaal	57.60	57.60	19.95	19.95	19.95	19.95	0.08325	0.01474	0.01083	0.01474	0.08325	
1	Parameters (fyner alg.)	57.400	57.336	19.937	19.856	19.855	19.869	0.083692	0.017632	0.012505	0.016561	0.084857
	% uit	-0.347	-0.458	-0.065	-0.471	-0.476	-0.406	0.529	19.620	15.466	12.354	1.928
Resoneerder 3 se skroef is ingestel												
2	Parameters (fyner alg.)	57.398	57.288	19.931	19.856	19.953	19.878	0.083448	0.017692	0.01225	0.016477	0.085774
	% uit	-0.350	-0.542	-0.095	-0.450	-0.016	-0.363	0.236	20.024	13.110	11.782	3.030
Resoneerder 2 se skroef is ingestel												
3	Parameters (fyner alg.)	57.385	57.381	19.949	19.971	19.951	19.872	0.083439	0.017332	0.012259	0.016498	0.085134
	% uit	-0.373	-0.381	-0.006	0.103	0.007	-0.391	0.224	17.588	13.194	11.923	2.261
Resoneerder 4 se skroef is ingestel												
4	Parameters (fyner alg.)	57.405	57.323	19.939	19.973	19.955	19.959	0.084002	0.017408	0.012177	0.016335	0.084235
	% uit	-0.338	-0.480	-0.057	0.117	0.025	0.047	0.901	18.103	12.441	10.820	1.181
Resoneerder 2 se skroef is ingestel												
5	Parameters (fyner alg.)	57.425	57.326	19.935	19.941	19.959	19.955	0.083775	0.017588	0.012109	0.016284	0.084121
	% uit	-0.305	-0.476	-0.074	-0.043	0.043	0.027	0.628	19.324	11.809	10.475	1.044
Die filter se instelling is voltooi												

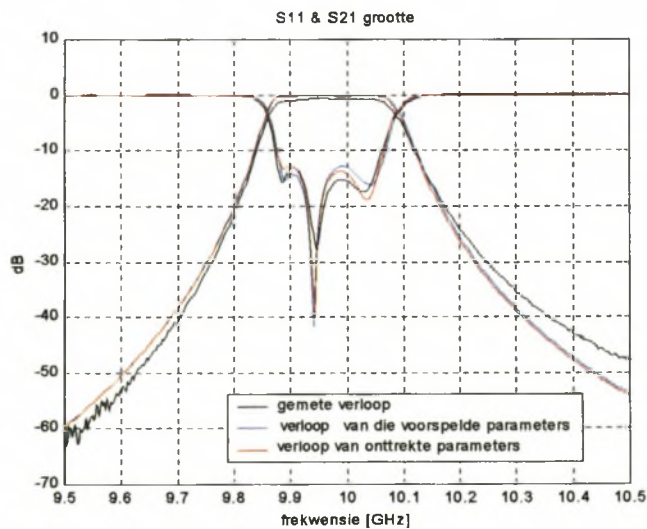
Tabel 4-10: 'n Opsomming van die onttrekte parameters en die relatiewe verskil daarvan met die ideale waardes, na elke instellingstap

Instellingstap 2



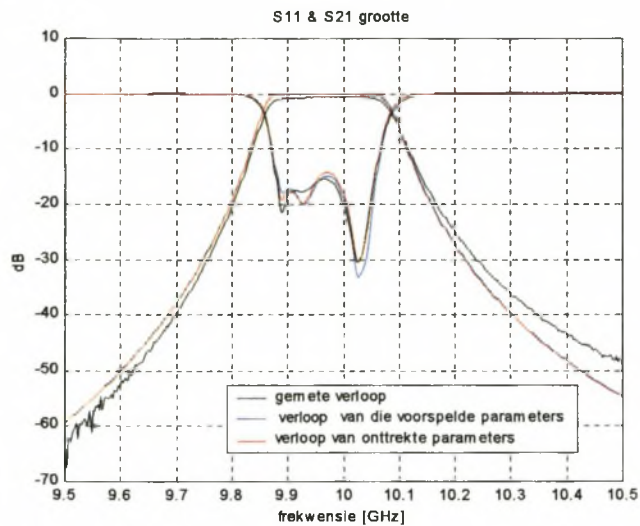
Figuur 4-27: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 2

Instellingstap 3



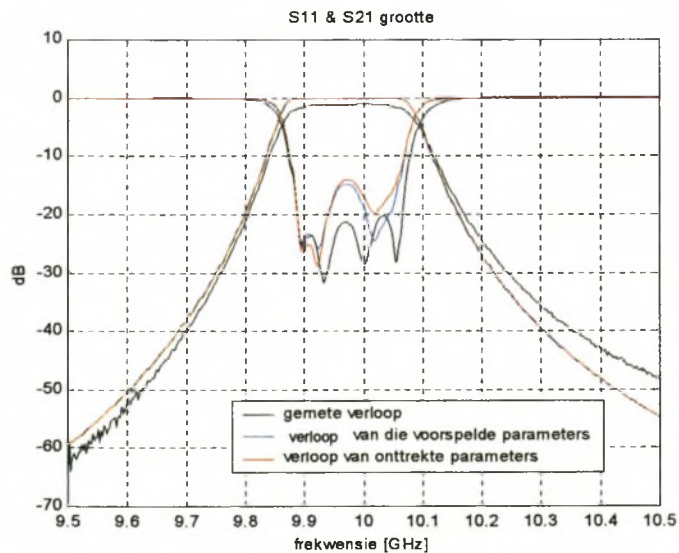
Figuur 4-28: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 3

Instellingstap 4



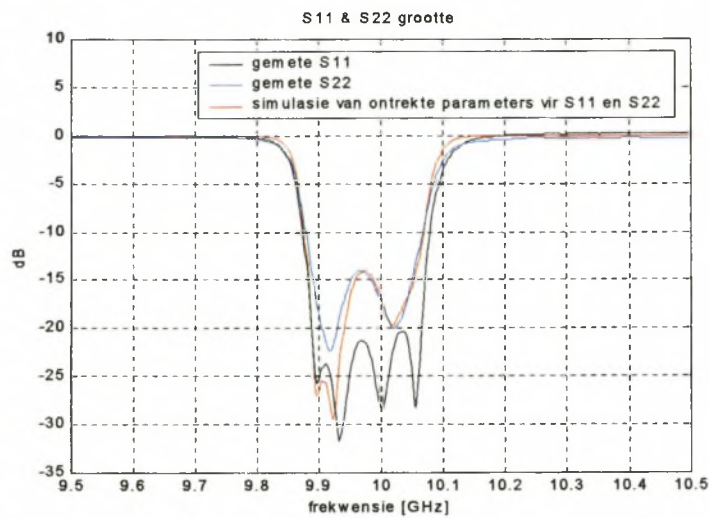
Figuur 4-29: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 4

Instellingstap 5



Figuur 4-30: Die passing van die grootte van S_{11} en S_{21} tussen die gemete verloop (swart), die verlope van die voorspelde parameterwaardes (blou) en die parameters verkry deur die fyner onttrekkingsalgoritme (rooi) vir instellingstap 5

Daar is na instellingstap 5 'n meting verkry wat, alhoewel dit nie presies pas op die voorspelde simulasie nie, 'n besonder goeie verloop vir S_{11} het. Die passing is egter nie so goed as wat mens dit sou verwag nie. Dit blyk ook daaruit dat die fout aan die einde van die roetine, soos in tabel 4-11, meer as twee maal groter is as gewoonlik. Die swakker passing kan verklaar word deur te let op die verskil tussen die gemete waarde van S_{11} en S_{22} in figuur 4-31. Die verskil tussen die gemete S_{11} en gemete S_{22} is veel groter as wat verwag is. Dit kan slegs aan die teenwoordigheid van verliese toegeskryf word. Die model waarvan ons gebruik maak, aanvaar dat die verliese weglaatbaar is. Dus kan verwag word dat die passing nie so goed sal wees vir hierdie geval nie. Dit is ook nie moontlik om die filter verder in te stel nie.



Figuur 4-31: Die vergelyking van die gemete S_{11} (swart) en gemete S_{22} (blou) en die verloop van die parameterwaardes wat onttrek is vir S_{11} en S_{22} (rooi)

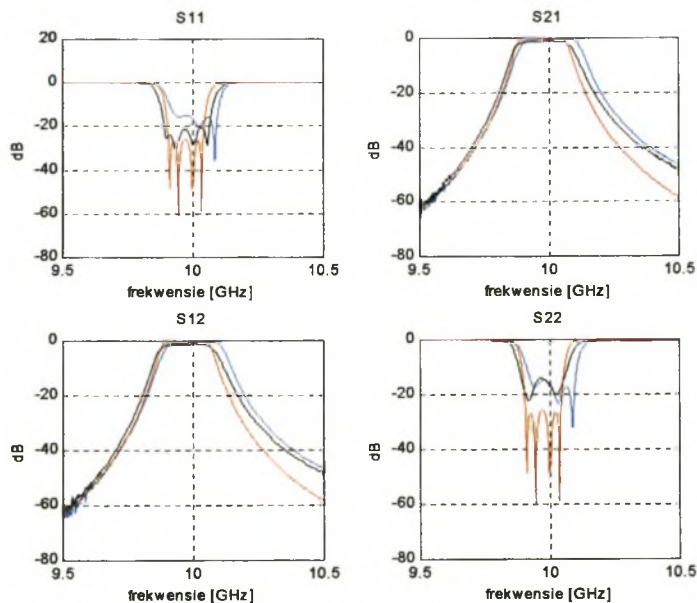
	Instellingstap 1	Instellingstap 2	Instellingstap 3	Instellingstap 4	Instellingstap 5
Tydsduur	Waardes soos gevind in 10GHz-instelling is geneem	12 sek	18 sek	14 sek	13 sek
Fout	Waardes soos gevind in 10GHz-instelling is geneem	0.0372	0.0383	0.0335	0.0914

Tabel 4-11: Die tydsduur en fout van die parameteronttrekkingsalgoritme van die onderskeie instellingstappe tydens die sinkroniese instelling van die filter

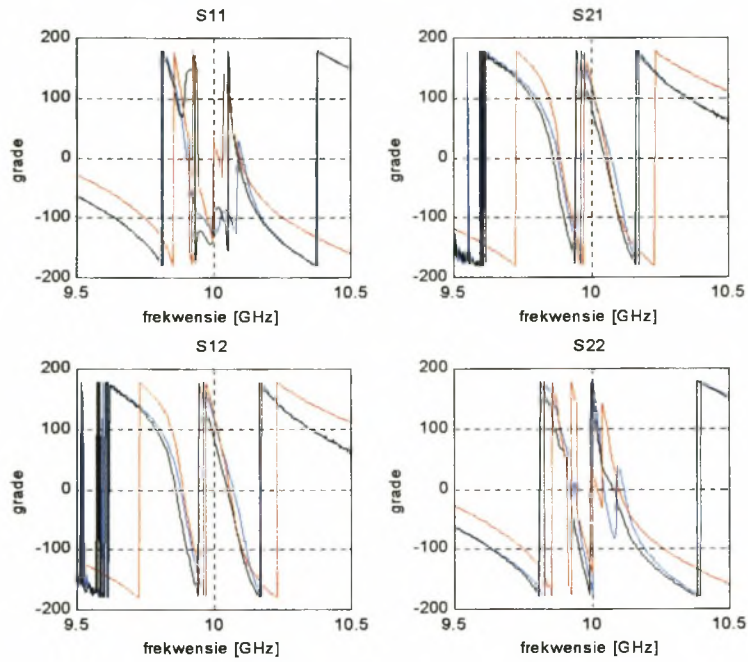
In tabel 4-11 word die tyd wat elke parameteronttrekkingstap geduur het genoteer, asook die fout na die optimeringsalgoritme gekonvergeer het. Die spesifikasies van hierdie meting word in tabel 4-12 vertoon en die ingestelde en uitgestelde verloop word in figuur 4-32 tot 4-34 met mekaar en die ideale waardes vergelyk. Let daarop dat die ideale waardes hier resoneerderlengtes van 19.95mm het. Die uitgestelde verloop is hier dieselfde geneem as die verloop na die 10GHz-instelling van die filter.

		Verlangde	Gemete
Senterfrekwensie		10 GHz	9.977 GHz
Bandwydte		2%	2.331 %
Maksimum weerkaatskoeffisiënt in deurlaatband	S₁₁	-26 dB	-20.31 dB
	S₂₂	-26 dB	-14.07 dB

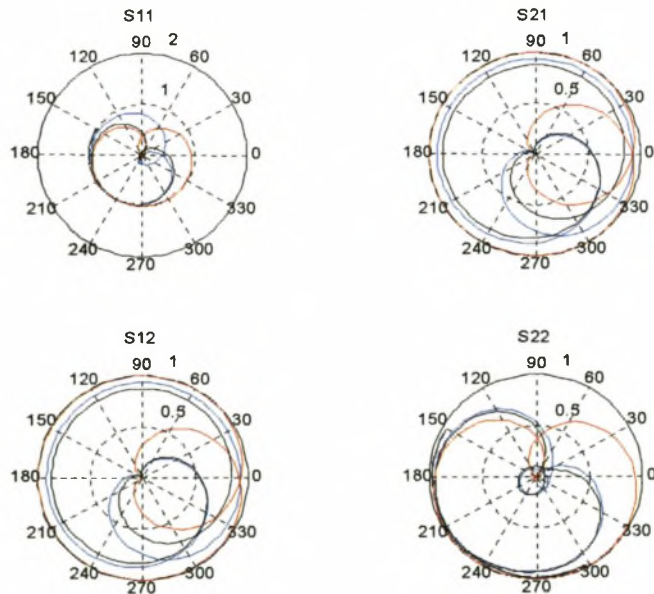
Tabel 4-12: 'n Vergelyking tussen die spesifikasies van die gemete filter, waarvan al die resoneerderlengtes ingestel is by 19.95mm, en die ideale spesifikasies



Figuur 4-32: Die gemete grootte van die s-parameters van die aanvanklike uitgestelde filter (blou), die ingestelde filter (swart) en die ideale verloop (rooi)



Figuur 4-33: Die gemete grootte van die s-parameters van die aanvanklike uitgestelde filter (blou), die ingestelde filter (swart) en die ideale verloop (rooi)



Figuur 4-34: 'n Polêre grafiek van die grootte en fase van die gemete s-parameters van die aanvanklike uitgestelde filter (blou) en die ingestelde filter (swart) en die ideale verloop (rooi)

4.3 Gevolgtrekking

Hierdie hoofstuk toon hoe die optimeringsalgoritme wat in Hoofstuk 3 bespreek is gebruik kan word om die parameters van die 4de orde gekoppelde-resoneerderfilter, wat as voorbeeld gebruik is, te onttrek. Die algoritme is ondersoek met beide gesimuleerde en gemete voorbeelde en goeie resultate is verkry. Daar word verduidelik dat die fyner onttrekkingsalgoritme die oplossing baie vinnig vind, mits die beginwaardes in die nabye omgewing daarvan is. Die robuuste onttrekkingsalgoritme het wel 'n langer uitvoertyd, maar dit is in staat om die oplossing van 'n probleem te vind sonder dat daar enige beginwaardes gespesifiseer hoef te word.

Die gemete voorbeelde toon veral die metode se krag as diagnose-gereedskap. Uit die parameteronttrekking van die voorbeeldfilter blyk dit dat daar 'n vervaardigingsfout, of ontwerpfout in die filter is wat maak resoneerder 1 nie gestel kan word tot by sy optimale waarde van 19.86mm nie. Vervolgens is gepoog om al die resoneerders in te stel sodat hulle gelyk kan wees by 'n effens langer lengte, naamlik 19.95mm. Alhoewel laasgenoemde filter baie goed ingestel kon word indien gekyk is na die S_{11} -verloop lyk dit asof die verskil tussen S_{11} en S_{22} baie groot raak. Die verskil is aan verliese toegeskryf. Verder is daar opgemerk dat die koppelingswaardes wat vir die filter onttrek is groter is as wat verwag is. Veral die interne koppeling was tot 20% te groot. Hierdie verskil dui dalk daarop dat die ontwerpmetode waarmee die interne koppelingswaardes gerealiseer is nie akkuraat genoeg was nie. Hierdie verskil is waarskynlik daarvoor verantwoordelik dat die verwagte maksimum weerkaatskoeffisiënt in die deurlaatband van -26dB nie verkry kan word nie.

Daar is in afdeling 2.6.2 getoon hoe die lengte van die resoneerders verkort moet word as gevolg van die ladingseffek van naasligende irisse. Daar word in tabel 2-8 getoon dat hierdie lengte wat vir die buitenste irisse se ladingseffek bereken is deur Van Zyl [15], te klein was. Dit is waarskynlik die rede hoekom resoneerder 1 nie heeltemal ingestel kan word nie.

Die hoofstuk toon dat die ontwikkelde instellingproses wel effektief is. Die grootste voordeel van die metode is dat dit die diagnose van filters ook moontlik maak. Moontlike foute in die

vervaardiging of ontwerp van die filter is uitgewys. Die metode is verder ook redelik vinnig. Beide instellingsbenaderings het slegs 5 stappe nodig gehad waarin die 4 skroewe verstel is. Die aanvanklike parameteronttrekking het ongeveer 1min geduur en van dan af het die parameteronttrekking in elke stap slegs ongeveer 13 sek geduur. Die neem van die metings is nie by hierdie tyd ingesluit nie en dit duur ook ongeveer 5 sek tydens elke stap. Die stadigste deel van die proses bly steeds die tyd wat die operateur neem om die verstellings aan te bring. Die verstellings wat deur die operateur gemaak moet word is egter eenvoudig en die operateur het geen tegniese kennis nodig nie.

Hoofstuk 5

Gevolgtrekking

5.1 Inleiding

Hierdie studie stel ondersoek in na die gebruik van modelgebaseerde-parameteronttrekking in rekenaargesteuende instelling van gekoppelde-resoneerderfilters. Die ontwikkeling van 'n algoritme word bespreek waarmee die parameters van 'n filter, uit die gemete s-parameters daarvan, onttrek kan word. Die algoritme word geëvalueer aan die hand van 'n vierde orde enkelmodus direkgekoppelde-resoneerderfilter. Daar word deur voorbeelde gewys dat die algoritme gebruik kan word in die instelling en diagnose van gekoppelde-resoneerderfilters.

In Hoofstuk 1 is die probleem uiteengesit en die agtergrond van instellingsmetodes word geskets.

Die modellering van gekoppelde-resoneerderfilters is in Hoofstuk 2 bespreek. Dit is 'n belangrike deel van die uiteindelijke algoritme aangesien dit gewoonlik al deel daarvan is wat van filter tot filter verander. Drie moontlike modelle word bespreek wat elk verskil ten opsigte van hulle akkuraatheid, spoed, parameters wat dit verlang en hoe maklik die model aangepas kan word om 'n volgende filter te modelleer. Die modelle word vergelyk deur 'n vierde orde Chebyshev enkelmodus gekoppelde-resoneerderfilter te simuleer. Al drie modelle lewer goeie resultate. Die Cohn-model word verder in die studie gebruik.

In Hoofstuk 3 is die ontwikkeling van die optimeringsalgoritme, waarmee die modelgebaseerde parameteronttrekking gedoen word, bespreek. Die verskillende fasette van die algoritme is geïdentifiseer en bespreek. Daar is bevind dat parameteronttrekkingsprobleme opgedeel kan word in probleme waarvoor daar goeie beginwaardes beskikbaar is en probleme waarvoor dit nie

beskikbaar is nie. Die fyner onttrekkingsalgoritme is ontwikkel waarmee parameteronttrekking van voorbeelde, waarvoor daar goeie beginwaardes beskikbaar is, gedoen kan word. Hierdie algoritme is verder uitgebrei tot die robuuste onttrekkingsalgoritme wat die parameteronttrekking benader as 'n multi-fase optimeringsalgoritme, waarin die aantal parameters wat die filter voorstel, geleidelik vermeerder word. Laasgenoemde algoritme is in staat om die parameteronttrekking van 'n filter moontlik te maak sonder dat enige beginwaardes gespesifiseer hoef te word.

Die algoritme word in Hoofstuk 4 aan die hand van voorbeelde geëvalueer. Hiervoor is 'n vierde orde Chebyshev enkelmodus gekoppelde-resoneerderfilter gebruik. Alhoewel hierdie filter redelik eenvoudig is en die instelling daarvan deur direkte instellingsmetodes ook moontlik is, bewys dit dat die algoritme goed werk. Die algoritme is suksesvol gebruik om die voorbeeldfilter in te stel. Dit kan ook gebruik word vir die diagnose van filters om moontlike vervaardigingsfoute op te spoor. In die voorbeeldfilter het een van die resoneerders te lank voorgekom en die interne koppelingswaardes was te groot. In baie van die direkte instellingsmetodes sou dit nie raakgesien kon word nie. Die ontwikkelde algoritme slaag dus in sy doel, naamlik om die instelling en diagnose van gekoppelde-resoneerderfilters moontlik te maak.

Die metode wat hier ontwikkel is lewer goeie resultate en veral die manier waarmee die metode die probleem van ongeskikte beginwaardes oplos, verbeter die robuustheid van hierdie tipe instellingsproses.

5.2 Toekomstige uitbreidingsmoontlikhede

Daar word verwag dat die metode wat ontwikkel is ook gebruik sal kan word om meer komplekse filters mee in te stel. Veral die instelling van filters waarin kruiskoppeling voorkom, is hier van belang. In [7] is die vind van die kruiskoppeling se waardes ook as 'n multi-fase optimeringsprobleem aangepak. Die waardes van die kruiskoppeling is gewoonlik redelik klein. Die waardes van die kruiskoppeling word in [7] eers op nul gehou terwyl die direkte-koppelingswaardes ge-optimeer word. Hierna word die kruiskoppeling se waardes een vir een ge-optimeer. Die Cohn-model is ook slegs geskik vir direkgekoppelde-resoneerderfilters. Deur die klassieke model aan te pas sodat dit wel die korrekte faseverloop het, kan hierdie beperking opgelos word vir nouband filters.

Uit die groot verskil tussen die gemete verloop van S_{11} en S_{22} , in Hoofstuk 4 afdeling 4.2.2, blyk dit dat dit wel nodig is om ook die verliese in die filter te analiseer. Dit sal beter passings en dus beter robuustheid tot gevolg hê.

Verwysings

- [1]: A. Atia, H. Yao, "Tuning and measurements of couplings and resonant frequencies for cascaded resonators," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2000.
- [2]: J. Ness, "A unified approach to design, measurement, and tuning of coupled-resonator filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, no. 4, pp.343-351, Apr. 1998.
- [3]: L. Accattino, "Computer aided tuning of microwave filters," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp.249-252, 1986.
- [4]: H.L. Thal, "Computer-aided filter alignment and diagnosis," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-26, pp. 958-963, Des.1978.
- [5]: W. Atia, K. Zaki, A. Atia, "Synthesis of General Topology Multiple Coupled Resonator Filters by Optimazation," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Baltimore, MD., pp. 821-824, Jun. 1998.
- [6]: J. Bandler, A. Salama, "Functional Approach to Microwave Postproduction Tuning," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 33, no. 4, pp. 302-310, Apr. 1985.
- [7]: M. Kahrizi, S. Savafi-Naeini, S. Chaudhuri, "Computer diagnosis and tuning of microwave filters using model-based parameter estimation and multi-level optimization," *IEEE MTT-S*, pp. 1641-1644, 2000.
- [8]: C. Kudsia, M. Swamy, "Computer Aided Optimization of Microwave Filter Networks for Space Application," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. 80.1*, pp. 410-412, 1980.
- [9]: H. Thal, "Microwave filter loss mechanisms and effects," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-30, no. 9, pp 1330-1334, Sep. 1982.
- [10]: M. Dishal, "Alignment and adjustment of synchronously tuned multiple resonant circuit filters," *Proc. IRE*, vol 30, pp. 1448-1455, Nov.1951.
- [11]: G. Matthaei, L. Young, en E. Jones, *Microwave Filters Impedance-matching networks, and Coupling Structures*. Artech House, Dedham Massachusetts, 1980.
- [12]: P. Yip, *High frequency circuit design and measurements*, Chapman and Hall, London 1990.

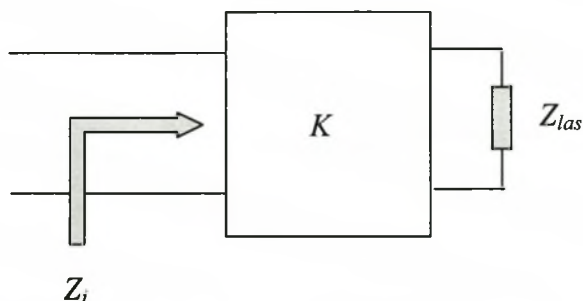
- [13]: R. Massara, *Optimization methods in electronic circuit design*, Longman Scientific & Technical, Essex, 1991.
- [14]: C. van Niekerk, P. Meyer, "Performance and limitations of decomposition based parameter extraction procedures for FET small signal models," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 46, pp.1620-1627, Nov. 1998.
- [15]: R. Van Zyl, *Fourth order Chebyshev Single Mode Coupled Cavity Filter*, Tegniëse verslag, Telkom Centre of Excellence in Satellite Communications, Speech and Image Processing, Universiteit van Stellenbosch, Nov. 1999.
- [16]: A. Atia, A. Williams, "Measurement of intercavity coupling," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-23, p. 519-522, Jun.1975.
- [17]: M. Chen, "Short circuit tuning method for singly terminated filters," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-25, p. 1032-1036, Des.1977.
- [18]: S. Ramo, J. Winnery, T. Van Duzer, *Fields and Waves in Communication Electronics*, Derde uitgawe, John Wiley & Sons Inc., New York, 1994.
- [19]: N. Marcuvitz, *Waveguide Handbook*, pp.241-244, 330-333, Peregrinus, London, 1986.
- [20]: D. Pozar, *Microwave engineering*, Tweede uitgawe, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [21]: S. Cohn, "Microwave coupling by large apertures," *Proc. IRE*, vol.39, pp. 1416-1421, Nov. 1951.
- [22]: A. Williams, "A Four-Cavity Elliptical Waveguide Filter", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-18, pp. 1109-1114, Des. 1970.
- [23]: P. Harscher, R. Vahldieck, S. Amari, "Automated test and tuning system for microwave filters," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2001.
- [24]: S. Cohn, "Direct-coupled-resonator filters," *Proc IRE*, vol. 45, pp187-196, Feb. 1957.
- [25]: A. Atia, A. Williams, R. Newcomb, "Narrow-band multi-coupled cavity synthesis," *IEEE Trans. on circuits and systems*, vol. CAS-21, no. 5, pp649-655, Sep. 1974.
- [26]: A. Patterson, V. Fusco, J. McKeown, J. Stewart, "A systematic optimization strategy for microwave device modelling," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol 41, no.3, pp. 395-405, Mrt. 1993.

- [27]: J. Marquardt, G. Müller, "Computer aided tuning of microwave circuits," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. 77.1*, pp 147-150, 1977.
- [28]: P. Marshall, P. Tissi, "A new algorithm for the accurate alignment of microwave networks," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-39, pp. 1754-1758, Okt. 1991.
- [29]: G. Macchiarella, M. Santoniccolo, "An original technique for computer-aided tuning of micromave filters," *European Microwave Conference Proc.*, London UK, Sep. 2001.
- [30]: P. Harscher, S. Amari, R. Vahldieck, "Computer diagnosis and optimization of microwave filters," *European Microwave Conference Proc.*, London UK, Sep. 2001.
- [31]: Agilent Technologies, *Simplified filter tuning using the time domain*, Application note, Agilent AN 1287-8, 1999.
- [32]: N. McDonald, "Measurement of intercavity coupling," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol MTT-24, p. 162, Mar.1976.
- [33]: K. Tang, K. Man, S. Kwong, Q. He, "Genetic algorithms and their applications," *IEEE Signal Processing Magazine*, Nov. 1996.
- [34]: J. Nilsson, S. Riedel, *Electronic circuits*, Vyfde uitgawe, pp.515-520, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, 1996.
- [35]: G. Reklaitis, A. Ravindran, K. Ragsdell, *Engineering Optimization, methods and aplications*, John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [36]: W. Press, S. Teukolsky, W. Vetterling, B. Flannery, *Numerical recipes in Fortran, the art of Scientific Computing*, Tweede uitgawe, Cambridge University Press, Cambridge, 1992
- [37]: L. Scales, *Introduction to non-linear optimization*, McMillian Publishers Ltd., London, 1985.
- [38]: C. Van Niekerk, *Multi-baisdecomposition-based optimisation for the extraction of small-signal GaAs FET models*, Ph.D. proefskrif, Universiteit van Stellenbosch, Jul. 1999.

Bylae A

Die verband tussen impedansie-omkeerders en gemene-induktansie

Die Cohn-model van afdeling 2.3 maak van gemene-induktansie gebruik om die koppeling voor te stel terwyl die Marcuvitz-model van afdeling 2.4 van impedansie-omkeerders gebruik maak. Daar word hier getoon dat die voorstelling van koppeling deur middel van impedansie-omkeerders of gemene-induktansie-stroombane ekwivalent is.

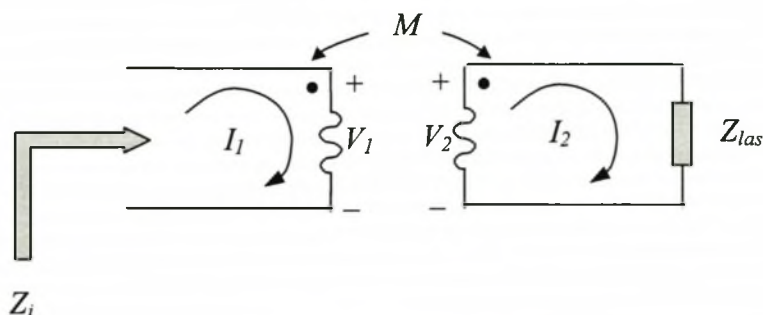


Figuur A-1: 'n Algemene impedansie-omkeerderstroombaan

'n Impedansie-omkeerderstroombaan, is 'n stroombaan wat die verhouding in vergelyking (A-1) laat geld.

$$Z_i = \pm \frac{K^2}{Z_{las}} \quad (\text{A-1})$$

In vergelyking (A-1) is K 'n konstante wat die koppeling beskryf en wat die karakteristieke impedansie van 'n kwartgolf lengte impedansie-transformeerder sou wees, Z_i is die intree impedansie en Z_{las} die impedansie van die las. Hierdie eenhede word deur figuur A-1 verduidelik. Die K -blok in figuur A-1 word nou vervang deur 'n gemene-induktansiestroombaan soos in figuur A-2. Die effek van selfinduktansie is geïgnoreer in hierdie voorbeeld.



Figuur A-2: Die impedansie-omkerende effek van gemene-induktansie

Die gemene-induktansie se invloed in hierdie stroombaan word uitgedruk deur vergelykings (A-2) en (A-3).

$$V_2 = j\omega M I_1 \quad (\text{A-2})$$

$$V_1 = j\omega M I_2 \quad (\text{A-3})$$

Hieruit volg vergelyking (A-4).

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{-\omega^2 M^2 I_2}{V_2} = -\frac{(\omega M)^2}{Z_{las}} \quad (\text{A-4})$$

Indien $Z_i = -\frac{K^2}{Z_{las}}$ volg die verband tussen die impedansie-omkeerderkonstante, K , en die gemene-induktansie, M , wat in vergelyking (A-5) gegee word.

$$K = \pm \omega M \quad (\text{A-5})$$

In 'n genormaliseerde stroombaan sal $\omega \cong \omega_0 = 1$ en dus geld vergelyking (A-6) vir die geval.

$$K = \pm M \quad (\text{A-6})$$

Dit volg dus dat K en M as ekwivalente eenhede beskou kan word.

Bylae B

MATLAB Programlyste

B1. Klassieke model

```
function [S] = KlassiekeModel;
%=====
% Die parameters
n1 = 0.13820;
n2 = 0.13820;
M12 = 0.01474;
M23 = 0.01083;
M34 = 0.01474;
C1 = 1;
C2 = 1;
C3 = 1;
C4 = 1;
C = [C1;C2;C3;C4];

L = [1;1;1;1];
wbegin = 0.95;
wend = 1.05;
NrOfFpoints = 401;

Z = zeros(4,4);
Z(1,2) = j*M12;
Z(2,3) = j*M23;
Z(3,4) = j*M34;
Z(2,1) = Z(1,2); %simmetrie
Z(3,2) = Z(2,3);
Z(4,3) = Z(3,4);

Z0 = 1;
e1 = 1; % Spanning by poort 1
v1 = n1*e1;
E = [v1;0;0;0];

wry=[wbegin:(wend-wbegin)/(NrOfFpoints-1):wend];

for N = 1 : (NrOfFpoints)
    w=wry(N);
    Su = j*( (w.*L) - (1./(w.*C)) );
    Z(1,1) = Su(1)+(Z0*n1.^2);
    Z(2,2) = Su(2);
    Z(3,3) = Su(3);
    Z(4,4) = Su(4)+(Z0*n2.^2);

    I = inv(Z)*E;

    I1 = n1*I(1); % Sien vergelyking (2-3)
    I2 = (-I(4))*n2;
    V1 = e1-I1*Z0;
```

```

V2 = -I2*Z0;

a = [(V1 + I1*Z0)/(2*sqrt(Z0)) ; (V2 + I2*Z0)/(2*sqrt(Z0))]; % Sien vergelyking (2-1)
b = [(V1 - I1*Z0)/(2*sqrt(Z0)) ; (V2 - I2*Z0)/(2*sqrt(Z0))];
S = b/a;
S11(N) = S(1,1); %AnderS11;
S21(N) = S(2,1); %AnderS21;
end;

f = (wry*10e9);
% Kompensasie vir golfleierseksies aan ente van die filter
l = 57.6e-3;
lamda = 3e8./f;
a = 22.86e-3;
beta = (2*pi./lamda).*sqrt(1-(lamda./(2*a)).^2);
S11 = S11.*exp(-j*(2*beta*l));
S21 = S21.*exp(-j*(2*beta*l));
tydsverloop = toc;

```

B2. Cohn-model

```

function [S] = CohnModel;
%=====
% Die parameterwaardes
g1 = 57.5e-3;
g2 = 57.5e-3;
l1 = 19.86e-3;
l2 = 19.86e-3;
l3 = 19.86e-3;
l4 = 19.86e-3;
K01 = 0.08325;
K12 = 0.01474;
K23 = 0.01083;
K34 = 0.01474;
K45 = 0.08325;

f0 = 10e9;
fbegin = 9.5e9;
fend = 10.5e9;
aantal = 250;
f = [fbegin : (fend-fbegin)/aantal : fend];

Z0 = 0.36289; %Golfleier Zo tranasformasie
Y0 = 1/Z0;
c = 3e8;
R = 13.4e-3;
a = 22.86e-3;
b = 10.16e-3;
lamda = c./f';
lamda0 = c/f0;
lamdag = lamda;
lamdag0 = lamda0;
lamdag = lamda./sqrt(1 - (lamda/(3.412*R)).^2);
lamdag0 = lamda0./sqrt(1 - (lamda0/(3.412*R)).^2);
lamdagrect = lamda./sqrt(1 - (lamda/(2*a)).^2);
lamdag0rect = lamda0./sqrt(1 - (lamda0/(2*a)).^2);

kf = lamdag0./lamdag; % Frekwensie afhanklikheid van reaktansie

```

```

% Impedansie-omkeerders met parallele induktor model
X01 = kf*K01./(1-(K01./Z0).^2);
teta01 = atan2(2*X01./Z0,1);
X12 = kf*K12./(1-(K12./Z0).^2);
teta12 = atan2(2*X12./Z0,1);
X23 = kf*K23./(1-(K23./Z0).^2);
teta23 = atan2(2*X23./Z0,1);
X34 = kf*K34./(1-(K34./Z0).^2);
teta34 = atan2(2*X34./Z0,1);
X45 = kf*K45./(1-(K45./Z0).^2);
teta45 = atan2(2*X45./Z0,1);

% ABCD-parameters van reaktansie in vorm [A C B D]
I01 = [ones(size(f')) 1./(j*X01) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I12 = [ones(size(f')) 1./(j*X12) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I23 = [ones(size(f')) 1./(j*X23) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I34 = [ones(size(f')) 1./(j*X34) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I45 = [ones(size(f')) 1./(j*X45) zeros(size(f')) ones(size(f'))];

% ABCD-parameters van resoneerders met verminderde fase in vorm [A C B D]
teta = (g1*2*pi)./lamdag - teta01/2;
W0 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l1*2*pi)./lamdag - teta01/2 - teta12/2;
W1 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l2*2*pi)./lamdag - teta12/2 - teta23/2;
W2 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l3*2*pi)./lamdag - teta23/2 - teta34/2;
W3 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l4*2*pi)./lamdag - teta34/2 - teta45/2;
W4 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (g2*2*pi)./lamdag - teta45/2;
W5 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];

% ABCD-parameters van filter in vorm [A C B D]
T0 = [W0(:,1).*I01(:,1)+W0(:,3).*I01(:,2) W0(:,2).*I01(:,1)+W0(:,4).*I01(:,2)
W0(:,1).*I01(:,3)+W0(:,3).*I01(:,4) W0(:,2).*I01(:,3)+W0(:,4).*I01(:,4)];
T1 = [T0(:,1).*W1(:,1)+T0(:,3).*W1(:,2) T0(:,2).*W1(:,1)+T0(:,4).*W1(:,2)
T0(:,1).*W1(:,3)+T0(:,3).*W1(:,4) T0(:,2).*W1(:,3)+T0(:,4).*W1(:,4)];
T2 = [T1(:,1).*I12(:,1)+T1(:,3).*I12(:,2) T1(:,2).*I12(:,1)+T1(:,4).*I12(:,2)
T1(:,1).*I12(:,3)+T1(:,3).*I12(:,4) T1(:,2).*I12(:,3)+T1(:,4).*I12(:,4)];
T3 = [T2(:,1).*W2(:,1)+T2(:,3).*W2(:,2) T2(:,2).*W2(:,1)+T2(:,4).*W2(:,2)
T2(:,1).*W2(:,3)+T2(:,3).*W2(:,4) T2(:,2).*W2(:,3)+T2(:,4).*W2(:,4)];
T4 = [T3(:,1).*I23(:,1)+T3(:,3).*I23(:,2) T3(:,2).*I23(:,1)+T3(:,4).*I23(:,2)
T3(:,1).*I23(:,3)+T3(:,3).*I23(:,4) T3(:,2).*I23(:,3)+T3(:,4).*I23(:,4)];
T5 = [T4(:,1).*W3(:,1)+T4(:,3).*W3(:,2) T4(:,2).*W3(:,1)+T4(:,4).*W3(:,2)
T4(:,1).*W3(:,3)+T4(:,3).*W3(:,4) T4(:,2).*W3(:,3)+T4(:,4).*W3(:,4)];
T6 = [T5(:,1).*I34(:,1)+T5(:,3).*I34(:,2) T5(:,2).*I34(:,1)+T5(:,4).*I34(:,2)
T5(:,1).*I34(:,3)+T5(:,3).*I34(:,4) T5(:,2).*I34(:,3)+T5(:,4).*I34(:,4)];
T7 = [T6(:,1).*W4(:,1)+T6(:,3).*W4(:,2) T6(:,2).*W4(:,1)+T6(:,4).*W4(:,2)
T6(:,1).*W4(:,3)+T6(:,3).*W4(:,4) T6(:,2).*W4(:,3)+T6(:,4).*W4(:,4)];
T8 = [T7(:,1).*I45(:,1)+T7(:,3).*I45(:,2) T7(:,2).*I45(:,1)+T7(:,4).*I45(:,2)
T7(:,1).*I45(:,3)+T7(:,3).*I45(:,4) T7(:,2).*I45(:,3)+T7(:,4).*I45(:,4)];
T9 = [T8(:,1).*W5(:,1)+T8(:,3).*W5(:,2) T8(:,2).*W5(:,1)+T8(:,4).*W5(:,2)
T8(:,1).*W5(:,3)+T8(:,3).*W5(:,4) T8(:,2).*W5(:,3)+T8(:,4).*W5(:,4)];
A = T9(:,1);
C = T9(:,2);
B = T9(:,3);
D = T9(:,4);

S11 = (A + B/Z0 - C*Z0 - D)/(A + B/Z0 + C*Z0 + D);
S12 = (2*(A.*D - B.*C))/(A + B/Z0 + C*Z0 + D);
S21 = 2./(A + B/Z0 + C*Z0 + D);
S22 = (-A + B/Z0 - C*Z0 + D)/(A + B/Z0 + C*Z0 + D);

```

```
S = [S11 S21 S12 S22];
```

B3. Marcuvitz-model

```
function [S] = MarcuvitzModel;
%=====
%Parameterwaardes
g1 = 57.6e-3;
g2 = 57.6e-3;
l1 = 18.02e-3;
l2 = 19.38e-3;
l3 = 19.38e-3;
l4 = 18.02e-3;
M01 = 2.564e-7;
M12 = 6.9133e-8;
M23 = 5.0794e-8;
M34 = 6.9133e-8;
M45 = 2.564e-7;

f0 = 10e9;
fbegin = 9.5e9;
fend = 10.5e9;
aantal = 251;
f = [fbegin : (fend-fbegin)/aantal : fend];

Z0 = 0.36289; %Silindriese golfleier Z0
Y0 = 1/Z0;
c = 3e8;
R = 13.4e-3;
a = 22.86e-3;
b = 10.16e-3;
lamda = c./f';
lamda0 = c/f0;
lamdag = lamda;
lamdag0 = lamda0;
lamdag = lamda./sqrt(1 - (lamda/(3.412*R)).^2);
lamdag0 = lamda0./sqrt(1 - (lamda0/(3.412*R)).^2);
lamdagrect = lamda./sqrt(1 - (lamda/(2*a)).^2);
lamdag0rect = lamda0./sqrt(1 - (lamda0/(2*a)).^2);

Z0t= Z0*(22.86e-3*10.16e-3)./(0.952*pi*(13.4e-3)^2); %Z0 van die reghoekige golfleier
aan ente
Y0t = 1./Z0t;

%Eksterne irisse
B = ( Y0t*(lamdag*a*b)./(4*pi) ) .* ( 1./M01 - ( 2*pi)/((a^2)*b) +
((0.5)^2)*((4*7.74)/(2*pi*((R)^3))) );
X01 = 1./B;
B = ( Y0t*(lamdag*a*b)./(4*pi) ) .* ( 1./M45 - ( 2*pi)/((a^2)*b) +
((0.5)^2)*((4*7.74)/(2*pi*((R)^3))) );
X45 = 1./B;

%Interne irisse
B = Y0*(lamdag/(4*R)).* ( ((2*R)^3)./(8.4*M12) - 2.344 );
X12 = 1./B;
B = Y0*(lamdag/(4*R)).* ( ((2*R)^3)./(8.4*M34) - 2.344 );
X34 = 1./B;
B = Y0*(lamdag/(4*R)).* ( ((2*R)^3)./(8.4*M23) - 2.344 );
X23 = 1./B;
```



```

I01 = [ones(size(f')) 1./(j*X01) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I12 = [ones(size(f')) 1./(j*X12) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I23 = [ones(size(f')) 1./(j*X23) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I34 = [ones(size(f')) 1./(j*X34) zeros(size(f')) ones(size(f'))];
I45 = [ones(size(f')) 1./(j*X45) zeros(size(f')) ones(size(f'))];

tetag = (lamdag0*pi)./lamdag; %GOLFLEIER
teta = (g1*2*pi)./lamdag;% - teta01/2;%GOLFLEIER
W0 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l1*2*pi)./lamdag;% - teta01/2 - teta12/2;
W1 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l2*2*pi)./lamdag;% - teta12/2 - teta23/2;
W2 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l3*2*pi)./lamdag;% - teta23/2 - teta34/2;
W3 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (l4*2*pi)./lamdag;% - teta34/2 - teta45/2;
W4 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];
teta = (g2*2*pi)./lamdag;% - teta45/2;%Golfleier
W5 = [cos(teta) j*Y0*sin(teta) j*Z0*sin(teta) cos(teta)];

T0 = [W0(:,1).*I01(:,1)+W0(:,3).*I01(:,2)    W0(:,2).*I01(:,1)+W0(:,4).*I01(:,2)
W0(:,1).*I01(:,3)+W0(:,3).*I01(:,4)    W0(:,2).*I01(:,3)+W0(:,4).*I01(:,4)];
T1 = [T0(:,1).*W1(:,1)+T0(:,3).*W1(:,2)    T0(:,2).*W1(:,1)+T0(:,4).*W1(:,2)
T0(:,1).*W1(:,3)+T0(:,3).*W1(:,4)    T0(:,2).*W1(:,3)+T0(:,4).*W1(:,4)];
T2 = [T1(:,1).*I12(:,1)+T1(:,3).*I12(:,2)    T1(:,2).*I12(:,1)+T1(:,4).*I12(:,2)
T1(:,1).*I12(:,3)+T1(:,3).*I12(:,4)    T1(:,2).*I12(:,3)+T1(:,4).*I12(:,4)];
T3 = [T2(:,1).*W2(:,1)+T2(:,3).*W2(:,2)    T2(:,2).*W2(:,1)+T2(:,4).*W2(:,2)
T2(:,1).*W2(:,3)+T2(:,3).*W2(:,4)    T2(:,2).*W2(:,3)+T2(:,4).*W2(:,4)];
T4 = [T3(:,1).*I23(:,1)+T3(:,3).*I23(:,2)    T3(:,2).*I23(:,1)+T3(:,4).*I23(:,2)
T3(:,1).*I23(:,3)+T3(:,3).*I23(:,4)    T3(:,2).*I23(:,3)+T3(:,4).*I23(:,4)];
T5 = [T4(:,1).*W3(:,1)+T4(:,3).*W3(:,2)    T4(:,2).*W3(:,1)+T4(:,4).*W3(:,2)
T4(:,1).*W3(:,3)+T4(:,3).*W3(:,4)    T4(:,2).*W3(:,3)+T4(:,4).*W3(:,4)];
T6 = [T5(:,1).*I34(:,1)+T5(:,3).*I34(:,2)    T5(:,2).*I34(:,1)+T5(:,4).*I34(:,2)
T5(:,1).*I34(:,3)+T5(:,3).*I34(:,4)    T5(:,2).*I34(:,3)+T5(:,4).*I34(:,4)];
T7 = [T6(:,1).*W4(:,1)+T6(:,3).*W4(:,2)    T6(:,2).*W4(:,1)+T6(:,4).*W4(:,2)
T6(:,1).*W4(:,3)+T6(:,3).*W4(:,4)    T6(:,2).*W4(:,3)+T6(:,4).*W4(:,4)];
T8 = [T7(:,1).*I45(:,1)+T7(:,3).*I45(:,2)    T7(:,2).*I45(:,1)+T7(:,4).*I45(:,2)
T7(:,1).*I45(:,3)+T7(:,3).*I45(:,4)    T7(:,2).*I45(:,3)+T7(:,4).*I45(:,4)];
T9 = [T8(:,1).*W5(:,1)+T8(:,3).*W5(:,2)    T8(:,2).*W5(:,1)+T8(:,4).*W5(:,2)
T8(:,1).*W5(:,3)+T8(:,3).*W5(:,4)    T8(:,2).*W5(:,3)+T8(:,4).*W5(:,4)];
A = T9(:,1);
C = T9(:,2);
B = T9(:,3);
D = T9(:,4);

S11 = (A + B/Z0 - C*Z0 - D)./(A + B/Z0 + C*Z0 + D);
S12 = (2*(A.*D - B.*C))./(A + B/Z0 + C*Z0 + D);
S21 = 2./(A + B/Z0 + C*Z0 + D);
S22 = (-A + B/Z0 - C*Z0 + D)./(A + B/Z0 + C*Z0 + D);

S = [S11 S21 S12 S22];

```

B4. Kleinste-kwadraatmethode

```

function [x,Foud] = KleinsteKwadrat(x0,f,S,xind,fase,foutspes)
% Hier word die kleinste-kwadraatmethode geïmplementeer om die parameters van die
voorbeeldfilter

```

```

% te onttrek. optimeringsfase te optimeer vir die voorbeeld filter
%=====
% x0 : die parameterwaardes voor die optimering
% f : die frekwensiepunte
% S : die gemete S-parameters
% x : die veranderlike filter parameters wat geoptimeer word
% xvas : die parameters waarmee die filter gesimuleer word
% xind : die index na die veranderlike parameters
% alfa : die verkleiningsfaktor in die liniêre soektog
% fase : die fase van die optimeringsproses
% foutspes : Dui aan of die foutfunksie bereken word met grootte of komplekse waardes
% e : die foutvektor
% F : die fout
% J : Jakobiaan-matriks
% g : gradient-vektor
% H : Hermitiese-matriks
%=====

xvas = x0; % die waardes van al die paramaters wat gebruik word
x = xvas(xind); % die parameters wat geoptimeer word

maxsiklusse = 30;
xoud = 10*x;
terminate = 0;
random = 0;
siklusse = 0;
alfainit = 1;
alfa = alfainit;
alfaverkleiner = 0.5;
[bogrens, ondergrens] = grense; % grens hier gestel op 5% en 195% van nominale
elementwaardes
akuraatheid = 3;

if fase == 1
elseif fase == 2
    xvas(7) = x(1);
    xvas(11) = x(1);
    xvas(8) = x(2);
    xvas(9) = x(2);
    xvas(10) = x(2);
elseif fase == 3
    akuraatheid = 6;
    xvas(2:5) = x(1:4);
    xvas(7:9) = x(5:7);
    xvas(10) = x(6);
    xvas(11) = x(5);
elseif fase == 4
    xvas(2:5) = x(2:5);
    xvas(7:9) = x(6:8);
    xvas(1) = x(1);
    xvas(6) = x(1);
    xvas(11) = x(6);
    xvas(10) = x(7);
elseif fase == 5
else
end;

err = 10.^(-1*akuraatheid);
[e, F] = f2(x, f, S, xvas, xind, foutspes);

while ~terminate

```

```

siklusse = siklusse+1;

[J,E] = jacobianx1(x,f,S,xvas,xind,foutspes); %Die Jakobiaan-matriks
g = 2*J'*E; %gradiëntvektor
H = 2*J'*J; %Hermitiese-matriks
dx = svdOpl3(H,-g); %Die stapgrootte word bepaal deur middel van "singular value
decomposition"

%Die liniêre soektog
Foud = F;
xoud = x;
x = x + alfa*dx';
if fase == 1
elseif fase == 2
    xvas(7) = x(1);
    xvas(11) = x(1);
    xvas(8) = x(2);
    xvas(9) = x(2);
    xvas(10) = x(2);
elseif fase == 3
    xvas(2:5) = x(1:4);
    xvas(7:9) = x(5:7);
    xvas(10) = x(6);
    xvas(11) = x(5);
elseif fase == 4
    xvas(2:5) = x(2:5);
    xvas(7:9) = x(6:8);
    xvas(1) = x(1);
    xvas(6) = x(1);
    xvas(11) = x(6);
    xvas(10) = x(7);
elseif fase == 5
else
end;
x = limitx(x,xind); % Die gebonde veranderlike metode word gebruik om parameters
vas te hou op grense
[e,F] = f2(x,f,S,xvas,xind,foutspes);
stopeers = 0;
while (F > Foud) & ~(terminate) & ~(stopeers)
    x = xoud;
    alfa = alfa*alfaverkleiner;
    x = x + alfa*dx';
    if fase == 1
elseif fase == 2
    xvas(7) = x(1);
    xvas(11) = x(1);
    xvas(8) = x(2);
    xvas(9) = x(2);
    xvas(10) = x(2);
elseif fase == 3
    xvas(2:5) = x(1:4);
    xvas(7:9) = x(5:7);
    xvas(10) = x(6);
    xvas(11) = x(5);
elseif fase == 4
    xvas(2:5) = x(2:5);
    xvas(7:9) = x(6:8);
    xvas(1) = x(1);
    xvas(6) = x(1);
    xvas(11) = x(6);
    xvas(10) = x(7);
elseif fase == 5
else

```

```
end;
x = limitx(x,xind); % gebonde veranderlike metode
[e,F] = f2(x,f,S,xvas,xind,foutspes);
if alfa < err % termineringstoets van die liniere soektog: As alfa te klein raak
    disp('Konvergeer nie');
    terminate = 1;
    stopeers = 1;
    F = Foud;
    x = xoud;
end; %if
end; % while
alfa = alfainit;

if (abs(F-Foud) < err) | (siklusse > maxsiklusse) % Verderre termineringskriteria
    terminate = 1;
end;

% Vertoon van die optimeringsroetine se vordering na elke siklus
disp(sprintf('Siklusse : %d',siklusse));
if find([2 3 4]==fase)
    xvas
else
    x
end;
disp(sprintf('Fout : %d',F));
figure(1)
compareplots(x,f,S,xvas,xind); % skets vergelykende grafieke
pause(0.001);

end; % optimization loop

xvas(xind) = x;
x = xvas;

return;
```