



Afgangsprojekt Elektronik og Elektroteknik Lars Meyer





**Titel:** Wave Star Energy

**Tema:** Afgangsprojekt

#### **Projektperiode:**

1. oktober 2009 til 14. januar 2010

#### Studerende:

Lars Meyer

#### Hovedvejleder:

Kirsten M. Nielsen Tom S. Pedersen Palle Andersen

**Oplagstal:** 6 **Sideantal:** 111 **Bilagsantal og -art:** DVD er vedlagt som bilag.

# Synopsis:

Dette projekt tager udgangspunkt i den fremtidige energikrise, som vil blive forårsaget af et større forbrug samt en begrænset mængde af fossile brændstoffer. Derfor forskes der i forskellige alternative energikilder, som kan afhjælpe krisen. I dette projekt fokuseres der på bølgeenergi fra verdenshavene, som har et energipotentiale på en tredjedel af verdenens nuværende energiforbrug.

Fredrik Bajers Vej 7 9220 Aalborg  $\emptyset$ Tlf. 96 35 86 00 http://ies.aau.dk

Institut for Elektroniske Systemer Elektronik og elektroteknik

Mere konkret er fokus rettet mod et bølgeenergiprojekt ved navn Wave Star Energy. Wave Star Energy bygger på en idé om at skabe en vedvarende stabil og jævn energikilde. I projektet arbejdes der med en miniatureudgave (Wave Star armen) af Wave Star Energy. Der findes frem til, hvilken type af bølger Wave Star armen skal arbejde i og hvordan styresignaler, der optimerer energiudtaget, sandsynligvis vil se ud.

Projektets formål er at udvikle en regulering, der gør det muligt at forske i, hvordan maksimal energiudbytte af Wave Star armen opnås. Regulatorerne skal kunne regulere vinklen af og moment i armen. For at kunne designe regulatorerne udarbejdes en matematisk model af Wave Star armen. Modellen indeholder blandt andet hydrodynamik og en tilpasning efter virkeligheden.

Ud fra modellen designes en vinkelregulator og momentregulator ved hjælp af frekvensrespons-designmetoden. Vinkelregulatoren er implementeret på en terminal, som også kan opsamle data. Regulatoren er testet i praksis og overholder de opstillede krav.

På denne måde skaber dette projekt gode betingelser for et videre arbejde med optimering af Wave Star armens energiudbytte.

Opsummerende er der i projektet udarbejdet en model af Wave Star armen og designet en vinkelregulator og momentregulator. Vinkelregulatoren er blevet implementeret og testet til at virke efter hensigten.

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatteren.

# Forord

Dette afgangsprojekt er udarbejdet af Lars Meyer på 7. semester på Institut for Eletroniske Systemer, Aalborg Universitet. Det overordnede emne for afgangsprojektet er "reguleringsteknik" og projekt<br/>perioden løb fra 1. oktober 2009 til 14. januar 2010. Projektets emne er bølge<br/>energiprojektet Wave Star Energy.

Målgruppen for rapporten er primært vejledere, andre studerende og øvrige med interesse for projektet.

Når der i teksten refereres til formler, angives dette med et formelnr., f.eks. formel 5.1. Hvis der refereres til et afsnit eller et kapitel, angives dette ved at skrive kapitel/afsnit efterfulgt af et nummer, som f.eks. afsnit 3.4.

Enheder står i firkantparenteser, f.eks. 5[kg]

Kildehenvisninger angives med firkantparenteser efter nummermetoden [nummerhenvisning]. Hvis der refereres til en bestemt side eller flere sider, angives dette i parentes sammen med kildehenvisningen, f.eks. ([nummerhenvisning], s. sidetal). Alle kilder kan ses i litteraturlisten sidst i rapporten.

I rapporten er der vedlagt en DVD med alle datablade, internetkilder og diverse manualer, der anvendes i projektet. DVD'en indeholder også måleresultater samt en elektronisk kopi af rapporten.

Lars Meyer

# Indhold

1	Indledning	8			
Ι	Analyse				
2	Wave Star Energy         2.1       Virkemåde         2.2       Historie         2.3       Status	<b>13</b> 13 14 14			
3	Miniaturemodel         3.1       Generel opbygning	<b>16</b> 16			
4	Use case         4.1       Formål       Formål       Formål         4.2       Aktører       Formål       Formål         4.3       Terminalens use cases       Formål       Formål	<b>18</b> 18 19 19			
5	Kravspecifikation5.1Bølgerne i havet	<b>23</b> 23 25			
6	Modellering6.1Modellering af en flyder6.2Vinkelmodellen6.3Momentmodellen6.4Simuleringsmodellen6.5Tilpasning af modellerne6.6De endelige modeller og overføringsfunktioner	<ul> <li>29</li> <li>29</li> <li>31</li> <li>42</li> <li>47</li> <li>49</li> <li>62</li> </ul>			
7	Delkonklusion - Analyse	64			
II	Udvikling	65			
8	Implementering af terminalen og Wave Star armen8.1Terminalen8.2Måling af vinklen8.3Måling af moment8.4Effektforstærker	67 67 69 71 71			

9	Regulering af vinkel9.1Opsamling af krav og elementer9.2Design af vinkelregulator	<b>72</b> 72 74					
10 11	Regulering af moment         10.1 Opstilling af krav og elementer	<b>79</b> 79 80 <b>84</b>					
II	I Afslutning	85					
12	Accepttest         12.1       Konstant vinkelfrekvens         12.2       Frekvenssweep         12.3       Step	<b>87</b> 87 91 92					
13 Konklusion 95							
14	Perspektivering	97					
IV	7 Appendiks 1	.01					
A	Målejournaler       A.1         A.1       Målejournal for tilpasning af model         A.2       Målejournal for bestemmelse af motorkonstant og modstand         A.3       Målejournal for accepttest af vinkelreguleringen	102 102 108 110					

7

Kapitel 1

# INDLEDNING

Det er et kendt faktum, at nutidens samfund i høj grad er afhængig af store mængder energi. Et af de store energibehov stammer fra transportsektoren i form af f.eks. almen bilkørsel, flytransport og fragt af alt lige fra olie til almindelige dagligdagsvarer. Desuden forbruges der enorme mængder af energi i industrien, hvor bearbejdning af metal er en af de helt store syndere. I hjemmet benytter en stor del af verdenens befolkning også store mængder af energi til blandt andet opvarmning/nedkøling af hjemmet, lys, underholdning samt tilberedning og opbevaring af fødevarer.

Det gennemsnitlige energibehov for nutidens gennemsnitlige menneskekrop er på ca. 100[W], men i kraft af grunde som beskrevet ovenfor, er det faktiske energibehov betydeligt større. Det gennemsnitlige menneske i 2007 forbrugte ca. 2200[W]. Ses dette i forhold til, at der på samme tid levede 6,7 milliarder mennesker, bliver det samlede energibehov for menneskeligheden på kontinuert ca. 14[TW]. Idet det forudsiges, at der stadig vil være en massiv befolkningstilvækst og at energibehovet pr. person vil stige i fremtiden, vil energiforbruget ikke andet end vokse. [16]

Det, at menneskeligheden har et enormt energiforbrug, som sandsynligvis kun vil stige i fremtiden, behøver ikke at være et problem i sig selv. Problemet opstår til gengæld i den måde, energien fremskaffes på. Betragtes figur 1.1 ses, hvordan energibehovet blev opretholdt i 2007 fordelt på forskellige resurser.



Figur 1.1: Viser, hvordan energibehovet i 2007 blev dækket fra forskellige resurser, [16].

Som det fremgår af diagrammet blev 82% af det samlede energibehov fremskaffet gennem fossile brændstoffer. Når der anvendes fossile brændstoffer, udledes der betydelige mængder af  $CO^2$ , hvilket anses af et flertal af klimaforskere for at være et meget alvorligt problem.

Som det også ses af figuren, er det kun 13% af energibehovet, der opretholdes af vedvarende energikilder. Dette skaber endnu et problem; at jorden på et tidspunkt løber tør for fossile brændstoffer og uran til kernekraft. Hvis det antages, at energiforbruget i fremtiden bliver holdt på samme niveau som i 2007, forudsiges det, at jordens lager af fossile brændstoffer og uran vil holde til energiproduktionen i 76 år. Det skal dog nævnes, at med den nuværende energifordeling vil oliebeholdningen kun holde i 43 år. Denne problemstilling stiller krav til, at der gribes ind allerede nu for at sikre, at nutidens samfundsstruktur kan bibeholdes i fremtiden. Dette skyldes, at der ikke fra den ene dag til den anden kan skiftes til nye energikilder, og at det derfor allerede nu er nødvendigt at begynde udfasningen af specielt fossile brændstoffer. [16]

Ud over, at der vil være problemer med at få omstillet samfundet til at basere sig på nye energikilder, er det også nødvendigt at finde og udvikle de nye kilder. Et af de områder, hvor der er stort håb for at kunne afhjælpe den potentielle kommende energikrise, er fusionsenergi. En anden løsningsmodel er at benytte vedvarende energikilder, men her er spørgsmålet, om der kan udvindes nok energi til at dække behovet?

Der regnes principielt med 3 vedvarende energikilder, hvilke er: tidevand, geotermisk energi og solenergi. Tidevandet skabes af solen og månens tiltrækningskraft af jorden og den samlede energikilde herfra udgør ca. 23% af verdenens nuværende energiforbrug. Altså kan det konkluderes, at tidevandet ikke er nok for at dække energibehovet. Den geotermiske energikilde anses derimod for at kunne udgøre 2-3 gange verdenens energibehov. Den helt store energikilde er solen, som anses for at udsende ca. 11.000 gange verdens energiforbrug på jordens overflade. Det skal dog her nævnes, at ca. 30% af denne energi reflekteres af

jorden, men der vil stadig være rigeligt med energi til at dække behovet. [15]

Måden, hvorpå solenergi kan opsamles, er f.eks. ved at benytte solceller. En anden måde at udvinde energien på er f.eks. vindkraft eller bølgekraft, idet solen skaber vejret på jorden. I dette projekt vil det overordnede omdrejningspunktet være, hvordan energi kan udvindes fra bølgerne i havet.

Energipotentialet i bølgerne på havet er på ca. 5[TW], hvilket svarer til ca. en tredjedel af verdenens samlede energibehov. Derfor kan dette betragtes som en betydelig energikilde. En fordel ved bølgeenergi i forhold til vindenergi er, at energiproduktionen er mere jævn over tid. Dette skyldes, at det er vinden, der skaber bølgerne, og at vinden hurtigt kan lægge sig, mens bølgerne først jævner ud længe efter. Dette medfører også den fordel, at produktionen af bølgeenergi er mere forudsigelig, idet de fremtidige bølger kan estimeres ud fra den foregående vind. Forsinkelsen fra vind til bølger medfører endvidere, at vind- og bølgeenergi med fordel kan kombineres. Dette kan forklares med følgende eksempel: Hvis det blæser op, kan der produceres store mængder af energi gennem vindkraft. Samtidigt vil der dannes større bølger i havet og når vinden så lægger sig, kan der stadig produceres store mængder energi ved hjælp af bølgekraft. På den måde kan de to energikilder supplere hinanden. [11]

Der findes i dag mange forskellige principper på, hvordan energien kan udvindes af bølgerne, blandt andet ved at benytte såkaldte point absorberes. Princippet består i at have en flyder/bøje, der flyder oven på bølgerne. Ved at belaste flyderen med en generator, vil der kunne trækkes energi ud af bølgerne. Et af de projekter, der for tiden arbejder med og baserer sig på dette princip, er Wave Star Energy. Projektet er et dansk projekt og er nærmere beskrevet i kapitel 2. Denne rapport vil mere specifikt omhandle, hvordan en miniaturemodel af Wave Star Energy maskinen kan reguleres, således at der udvindes en i forvejen ønsket energimængde (med henblik på at optimere energiudbyttet). Miniaturemodellen er beskrevet i kapitel 3.

# Del I Analyse

# Intro til Analysen

Projektrapporten består af fire hoveddele, hvilke er: Analyse (del I), Udvikling (del II), Afslutning (del III) og Appendiks (del IV). Til alle dele af rapporten, med undtagelse af appendikset, vil der være en kort introduktion til den enkelte del. Formålet med introduktionerne er at hjælpe læseren med at fange den røde tråd allerede fra starten.

Analysen består af følgende fem kapitler: Wave Star Energy (kapitel 2), Miniaturemodel (kapitel 3), Use case (kapitel 4), Kravspecifikation (kapitel 5), Modellering (kapitel 6) og Delkonklusion - Analyse (kapitel 7). I det følgende vil der blive gennemgået, hvad de forskellige kapitler i analysen indeholder.

Kapitel 2 (Wave Star Energy) indeholder en beskrivelse af Wave Star Energy projektet. Beskrivelsen indeholder en gennemgang af Wave Star Energy maskinens virkemåde, Wave Star Energy projektets historie og den nuværende status for Wave Star Energy projektet. Formålet med kapitlet er at introducere Wave Star Energy projektet, som ligger til grund for dette projekt.

Da der ikke i projektet arbejdes direkte med Wave Star Energy maskinen, beskrives den miniaturemodel, der tages udgangspunkt i. Denne beskrivelse findes i kapitel 3 (Miniaturemodel). I kapitlet navngives miniaturemodellen til Wave Star armen.

Det efterfølgende kapitel 4 (Use case) indeholder en use case analyse. Analysen tager udgangspunkt i hovedsystemet "Terminalen". I kapitlet fastligges der generelle funktioner for terminalen. På den måde benyttes analysen som en del af grundlaget for udviklingen i det resterende projekt.

Kapitel 5 (Kravspecifikation) indeholder både krav- og acceptspecifikation for projektet. Kapitlet består af to afsnit, hvor det første er en beskrivelse af, hvordan bølgerne dannes i havet. Dette afsnit benyttes til at opstille krav- og acceptspecifikation i det efterfølgende afsnit. På denne måde opstilles de krav, der stilles til projekt og hvordan det kan afgøres, om kravene overholdes. Således vil også dette kapitel fungere, som grundlag for udviklingen i det resterende projekt.

I kapitel 6 (Modellering) opstilles en matematik model af Wave Star armen. Kapitlet er et af rapportens hovedkapitler og formålet med modellen er at kunne udvikle regulatorer med et teoretisk udgangspunkt. I kapitlet opstilles to modeller: en fra spænding på motoren til vinkel af Wave Star armen og en fra spænding på motoren til momentet i Wave Star armen. De to modeller bliver lineariseret og laplacetransformeret, således at der findes frem til to overføringsfunktioner. Sidst tilpasses modellerne virkeligheden ud fra måleresultater fra test af Wave Star armen.

Sidste kapitel i analysen, kapitel 7 (Delkonklusion - Analyse), er en delkonklusion af analysen. I delkonklusionen opsummeres analysen og der bliver konkluderet på de resultater, der er fundet frem til.

# KAPITEL 2 WAVE STAR ENERGY

Som det blev beskrevet i kapitel 1 er fokuspunktet for dette projekt at udvikle en regulering til en miniatureudgave af Wave Star Energy maskinen. Derfor vil der i dette afsnit være en gennemgang af Wave Star Energy projektet med henblik på, hvad det går ud på og hvad status for projektet er.

# 2.1 Virkemåde

På figur 2.1 ses tre billeder af Wave Star Energy A/S's størrelse 1:10 model af Wave Star Energy maskinen. (A) viser hele maskinen set fra oven, (B) viser maskinen fra vandoverfladen set fra siden og (C) viser én af flyderne set fra oven.



Figur 2.1: Viser billeder af 1:10 Wave Star Energy maskinen, [4].

Maskinen er opbygget på den måde, at flyderne ligger på to lange rækker tværgående bølgernes retning, figur 2.1 (B). Ideen er, at hvis der kommer en bølge fra venstre mod højre, figur 2.1 (A), vil flyderne løfte sig en efter en indtil bølgen har passeret, hvorefter de vil falde til udgangspunktet og være klar til næste bølge. På denne måde er det muligt

at udnytte bølgernes energi i en løbende proces, hvilket resulterer i et mere konstant energiudbytte. [5]

Som det ses af figur 2.1 (C), sidder den halvkugleformede flyder på hver sin stang. Hver stang er forbundet til et hydraulikstempel og alle stemplerne pumper i samme hydrauliksystem. På denne måde drives en fælles hydraulikmotor forholdsvis jævnt. I sidste ende er hydraulikmotoren forbundet til en generator, som giver det elektriske udbytte af maskinen. [5]

I forhold til Wave Star Energy maskinens effektivitet er hovedessensen at styre trykket i hver stempel således, at det passer optimalt til den energi, som den pågældende flyder kan modtage fra bølgerne. For at se Wave Star Energy 1:10 maskinen i brug henvises til http://www.wavestarenergy.com/, hvor der vises nogle videoklip af, hvordan den virker.

# 2.2 Historie

Den grundlæggende idé til Wave Star Energy maskinen blev udviklet af de sejlsportsinteresserede brødre Niels og Kjeld Hansen. I forbindelse med deres interesse for livet på bølgerne og vedvarende energikilder opfandt de i 2000 det grundlæggende princip for maskinen. [3]

Problemstillingen bestod i at skabe en stabil og jævn energikilde ud fra bølger, der kommer med et interval på mellem fem og ti sekunder. Dette var grundlaget for ideen til at udforme en maskine, der ved hjælp af flere flydere kan skære ind i en bølge og udnytte hele bølgelængden ved at placere flyderne i en række efter hinanden i tværgående retning af bølgerne. [3]

I 2003 købte Wave Star Energy A/S rettighederne til Wave Star Maskinen. Grunden hertil var, at stifteren af Wave Star Energy A/S (Per Resen Steenstrup) var begyndt at undersøge mulighederne for el-produktion, i kommerciel øjemed, via bølgerne på havet. Det blev vurderet, at Niels og Kjeld Hansens maskine var særdeles velegnet til netop dette. [3]

Det er værd at bemærke, at hovedaktionærerne i Wave Star Energy A/S er brødrene Clausen (familien bag Danfoss). Dette er specielt fordelagtigt, idet Danfoss med sin store erfaring inden for hydrauliksystem vil være en meget stærk erhvervspartner for Wave Star Energy A/S. [3]

## 2.3 Status

Wave Star Energy maskine er stadig under konstant udvikling baseret på både teori og praktiske målinger. Størrelse 1:10 maskinen har på nuværende tidspunkt været i drift i godt tre år og er tilkoblet el-nettet. Maskinen har overlevet 15 storme uden skader og har en effekt på 5,5[kW]. [4]

Næste trin i udvikling var søsætning, af en 500[kW] testsektion. Denne testsektion blev opstillet i september 2009, men er dog stadig ikke taget i brug. Testsektionen er en fuldskalaudgave af to flydere fra den endelige 500[kW] maskine. Effekten af hver flyder forventes at komme til at ligge på 25-50[kW]. Den endelige fuldskalaudgave forventes at være færdigbygget og klar til salg i 2011/12. Denne maskine kommer til at bestå af 20 flydere, der hver har en diameter på 5[m]. Den årlige produktion forventes at blive på 1,4-2,8[GWt] ved placering i Nordsøen. [1]

Endelig har Wave Star Energy A/S planer om at udvide maskinen til dobbelt størrelse. Produktionen forventes dermed at kunne øges 11 gange blandt andet i kraft af, at den kan håndtere større bølger. På den måde forventer Wave Star Energy, at deres maskine kan komme til at matche selv de største havvindmøller. [2]

# KAPITEL 3 MINIATUREMODEL

Som tidligere beskrevet omhandler dette projekt udviklingen af en regulering til en miniatureudgave af Wave Star Energy maskinen. Da denne miniaturemodel ikke er opbygget helt magen til Wave Star Energy maskinen, vil der i det følgende være en gennemgang af miniaturemodellen. Det er således denne model, der vil blive taget udgangspunkt i i resten af projektrapporten.

# 3.1 Generel opbygning

Miniatureudgaven af Wave Star Energy maskinen er opbygget noget anderledes end den rigtige maskine. Dette skyldes, at den er bygget med henblik på let at kunne teste forskellige reguleringsprincipper til optimering af maskinen. I den resterende rapport vil miniaturemodellen blive omtalt som Wave Star armen. Opbygningen af Wave Star armen er illustreret på figur 3.1.



Figur 3.1: Viser Wave Star armen. Det ses, at den består af en flyder, der gennem en mekanisk arm er koblet til en DC-motor med gearing. På Wave Star armen er der monteret en strain gauge, der kan måle moment, og en encoder, der kan måle vinkelhastighed og vinkel.

Som det fremgår af figuren, består Wave Star armen af en flyder, som giver en opdrift, når den udsættes for en indkommende bølge. Når bølgen er passeret, vil flyderens vægt i

sammenspil med tyngdekraften trække flyderen ned igen. Det er dette princip, der sætter Wave Star armen i stand til at trække energi ud af bølgerne. Flyderen er mere specifikt udformet som en halvkugle og en cylinder. Cylinderen sidder således som en forlængelse af halvkuglen.

For at optage den udtrukne mekaniske energi og omforme den til elektrisk energi er flyderen koblet til en DC-motor med en gearing gennem en mekanisk arm. DC-motoren vil være fastspændt, hvilket resulterer i, at Wave Star armen kan betragtes som et roterende system med rotationspunkt i midten af motorakslen. Ideen er altså at omsætte den mekaniske energi fra flyderen til elektrisk energi i motoren.

Ideen ved at benytte en DC-motor er, at systemet kan benyttes aktivt. Med dette menes, at systemet også kan benyttes til at tilføre vandet energi i form af bølger og ikke kun til at trække energi ud af bølgerne. Dette medfører, at der ikke vil være behov for et bølgebassin til indledende målinger og test af model og regulator. Dette forenkler opgaven, da Wave Star armen ikke skal synkroniseres med bølgerne og der kan foretages forsøg i et almindeligt vandbassin, som er lettere tilgængeligt.

Til at styre DC-motoren anvendes en klasse AB firekvadrants effektforstærker. Grunden hertil er, at der således kan arbejdes i alle fire kvadranter, hvorved DC-motoren kan styres både som en motor og som en generator. På den måde er det som ønsket muligt både at afsætte og optage energi fra vandet efter behov.

Sidst er der placeret en strain gauge på den mekaniske arm, således at det er muligt at måle momentet i armen. Endvidere er der monteret en encoder på motoren, således at vinkelhastighed og vinkel af motoren kan måles, som kan omregnes til vinkelhastighed og vinkel af den mekaniske arm. Formålet med disse to transducere uddybes i kapitel 4.

# USE CASE

I dette kapitel foretages en use case analyse for, hvad det samlede system skal kunne. Analysens formål er at skabe et struktureret grundlag for den følgende udvikling. Analysen indeholder en beskrivelse af formålet med det samlede system, en beskrivelse af de forskellige aktører, der har en rolle og til sidst en gennemgang af de forskellige use cases.

#### 4.1 Formål

Formålet er at kunne teste forskellige reguleringer af Wave Star armen efter enten moment i den mekaniske arm eller vinklen af armen. Det ønskes at kunne regulere efter momentet i armen eller vinklen deraf, fordi det på den måde er muligt at kunne styre, hvor meget energi, der trækkes ud af bølgerne. Dette skyldes, at udtrykket for mekanisk energi er kraft multipliceret med vej, hvilket i et roterende system giver, moment multipliceret med vinkel:

$$E = \tau \cdot \Delta \theta \tag{4.1}$$

Det er derfor vigtigt, at Wave Star armen ikke står stille på grund af et for stort moment fra motoren, eller at momentet er så lavt, at der næsten ikke trækkes energi ud af bølgerne. Det vil sige, at hvis det er hensigten at trække mest mulig energi ud af bølgerne, skal der findes et kompromis mellem moment i Wave Star armen og bevægelsen deraf. Formålet med forsøgsopstillingen er at kunne eksperimentere med forskellige referencesignaler til enten vinkel eller moment, således at der trækkes mest mulig energi ud af bølgerne.

Hvis det så kendes, hvor meget energi, der kan trækkes ud af bølgerne, kan Wave Star armen reguleres således, at det maksimale energiudtag opnås. I dette projekt vil der ikke blive fokuseret på, hvor meget energi, der kan tages ud af bølgerne, hvorfor styresignaler til regulatorerne bliver black box'et. I stedet vil der, som beskrevet, blive fokuseret på udviklingen af selve regulatorerne.

Derfor er udfordringen at udvikle og implementere regulatorerne på "terminalen", som er den, der skal håndtere målinger af vinkel og moment og sende styresignalet til Wave Star armen. Endvidere ønskes det at kunne ændre regulatorerne på terminalen samt en visualisering af relevante måledata.

## 4.2 Aktører

I dette afsnit defineres og beskrives de forskellige aktører, som påvirker terminalen. En aktør er en ekstern begivenhed, et eksternt system eller en person, som påvirker systemet, altså terminalen.

### Bølger

Bølgerne i vandet påvirker Wave Star armen fysisk. Det vil sige, at de også påvirker terminalen i forbindelse med reguleringerne. Dog er bølgernes energiindhold blevet black box'et, men de skal stadig tages med som en forstyrrelse. Dette skyldes, at bølgerne ikke altid vil opføre sig som forventet og på den måde stadig vil bidrage til reguleringerne.

#### Wave Star armen

Wave Star armen er nærmere beskrevet i afsnit 3. Opsummeret er Wave Star armen en flyder koblet, via en arm, til en DC-motor samt en effektforstærker til at styre motoren. Endvidere indeholder Wave Star armen også de to transducere, der gør det muligt at måle moment i armen og vinklen deraf. Altså er Wave Star armen den aktuator og de transducere, som påvirker terminalen.

### Udvikleren

Udvikleren er den person, som har til hensigt at teste forskellige regulatorer i forbindelse med udvikling heraf. Derfor skal udvikleren have mulighed for at ændre regulatorerne og aflæse relevante måledata.

## 4.3 Terminalens use cases

I dette afsnit beskrives de forskellige use cases, som terminalen skal kunne udføre. Terminalen er det system, som gør det muligt at afprøve forskellige reguleringer på både vinkel af og moment i armen. Terminalen indeholder fire use cases, hvilke er: statusdata, ændre regulering, reguler moment og reguler vinkel. På figur 4.1 ses et use case diagram over terminalen.



Figur 4.1: Viser use case diagrammet for terminalen. Pilenes retninger indikerer, hvilken vej kommunikationen går.

#### 4.3.1 Statusdata

#### Målbeskrivelse

Formålet er, at terminalen skal hente relevante statusdata og præsentere dem på en passende vis for udvikleren. De relevante statusdata kunne f.eks. være den målte vinkel og moment, den ønskede vinkel og moment samt reguleringens output til Wave Star armen.

#### Normal scenarie

- 1. Terminalen er aktiveret til at regulere på enten vinkel eller moment.
- 2. Terminalen henter relevante data.
- 3. Dataene behandles og præsenteres på terminalen.
- 4. Trin 2 og 3 gentages med en passende frekvens.

#### Undtagelser

1. Terminalen er deaktiveret og henter derfor ikke statusdata, hvorfor de ikke bliver fremvist.

#### 4.3.2 Ændre regulering

#### Målbeskrivelse

Formålet er at give udvikleren mulighed for at skifte mellem regulering af armens vinkel og regulering af kraftmoment i armen. Endvidere skal der være mulighed for at ændre på

reguleringerne.

#### Normal scenarie

- 1. Udvikleren skifter til regulering af vinkel, regulering af kraftmoment eller en ny regulering af enten kraftmoment eller vinkel.
- 2. Terminalen benytter den nye regulering til regulering af det ønskede.

#### Undtagelser

1. Udvikleren skifter ikke regulering, hvorfor terminalen beholder den sidst benyttede.

#### 4.3.3 Reguler moment

#### Målbeskrivelse

Formålet er, at terminalen regulerer kraftmomentet i Wave Star armens arm efter et givent styresignal. Terminalen skal således hente nødvendige målinger og data, hvorefter et styresignal til Wave Star armen beregnes. Dette styresignal benyttes til at aktuere Wave Star armen.

#### Normal scenarie

- 1. Udvikleren har valgt at regulere efter kraftmoment i armen.
- 2. Terminalen henter det aktuelle kraftmoment fra Wave Star armen og sammenligner det med det ønskede, hvilket kan give en fejl som resultat af. at bølgerne f.eks. ikke opføre, sig som forventet eller, at det ønskede kraftmoment har ændret sig siden sidst.
- 3. Terminalen beregner et styresignal til Wave Star armen ud fra sammenligningen.
- 4. Terminalen akturer Wave Star armen ud fra det beregnede styresignal.
- 5. Punkt 2-4 gentages med en passende frekvens (samplingsfrekvensen).

#### Undtagelser

- 1. Udvikleren har ikke indstillet terminalen til at regulere efter kraftmoment, hvorfor der ikke reguleres heraf.
- 2. Terminalen er ikke aktiv og derfor reguleres der ikke.

#### 4.3.4 Reguler vinkel

#### Målbeskrivelse

Formålet er at regulere Wave Star armens vinkel efter et givent styresignal. Princippet er det samme som "reguler moment" blot, at der reguleres efter vinkel. Derfor er fremgangsmetoden: hent data, beregn et styresignal ud fra dataen og til sidst aktuer ud fra beregning.

#### Normal scenarie

- 1. Udvikleren har valgt at regulere efter armens vinkel.
- 2. Terminalen henter den aktuelle vinkel fra Wave Star armen og sammenligner den med den ønskede, hvilket kan give en fejl som resultat af, at bølgerne f.eks. ikke opfører sig som forventet eller, at den ønskede vinkel har ændret sig siden sidst.
- 3. Terminalen beregner et styresignal til Wave Star armen ud fra sammenligningen.
- 4. Terminalen akturer Wave Star armen ud fra det beregnede styresignal.
- 5. Punkt 2-4 gentages med en passende frekvens (samplingsfrekvensen).

#### Undtagelser

- 1. Udvikleren har ikke indstillet terminalen til at regulere efter vinkel, hvorfor der ikke reguleres heraf.
- 2. Terminalen er ikke aktiv og derfor reguleres der ikke.

# KAPITEL 5 KRAVSPECIFIKATION

I dette kapitel opstilles en kravspecifikation til terminalen og dens funktioner. Dermed bliver der også opstillet krav til reguleringen af vinkel eller moment. For at kunne opstille kravene til reguleringerne vil der først være en kort introduktion til, hvordan bølger arter sig i havet. Der vil sideløbende med kravene blive opstillet acceptspecifikationer, som i kapitel 12 leder til en accepttest.

# 5.1 Bølgerne i havet

Bølgerne i havet dannes, som tidligere beskrevet, af vinden. Vinden opstår, idet solen opvarmer jorden og luften. Når luften varmes op, falder dens massefylde, hvilket resulterer i, at luften vil stige op i atmosfæren. Når luften fjernes fra jordoverfladen, vil det skabe et undertryk. Dette undertryk vil medføre, at den omkringliggende luft vil strømme hen mod undertrykket og dermed skabes vinden. Hvordan vinden danner bølgerne i havet vil blive forklaret ud fra figur 5.1.



Figur 5.1: Skitserer, hvordan bølgerne dannes i havet ved hjælp af vinden, [11].

På figuren er havet delt op i tre områder. Første område "Ripples to chop to wind waves" er ude midt på havet, hvor bølgerne er meget uforudsigelige og bølger i alle retninger. Andet område "Fully developed seas" er det område, hvor vindens maksimale bølgepotentiale er opnået. Dette område ligger lige inden sidste område "Changing to swell", som er der, hvor bølgerne bevæger sig ind på forholdsvist lav dybde og nærmer sig kysten. [11]

Denne proces begynder med, at vinden får fat i de uhomogene bølger. Hvis vinden har en ensartet retning, vil det resultere i, at bølgerne vil begynde at få en mere ensartet retning, idet vinden hiver dem i samme retning. I området "Length of fetch" vil bølgerne blive kraftigere og mere ensartet. Det er her, energien tilføres bølgerne. Når bølgerne kommer ind på lavt vand i forhold til bølgelængden, vil underlaget i sammenspil med bølgernes understrøm rette bølgerne endnu mere til. På den måde vil der skabes en form for plan bølge ind mod kysten. I dette område vil bølgernes energi kun aftage pga. modstanden fra underlaget. Det er altså i starten af dette område, at de kraftigste uniforme bølger findes. Da Wave Star Energy maskinen er baseret på uniforme bølger, vil dette område være den optimale placering. [11]

Selv om bølgerne bliver betydeligt mere ensartet, når de nærmer sig kysten, vil de stadig være ujævne, idet vinden, der har dannet bølgerne, aldrig vil være helt konstant. Ujævnheden gælder både i retning, frekvens og amplitude af bølgerne. Hvis det ønskes, at modellere bølgerne, kan de aktuelle bølger ses som en summation af forskellige regulære bølger (sinusformede bølger med konstant retning, frekvens og amplitude). Dette er illustreret på figur 5.2 (A). [11]



Figur 5.2: (A) Skitserer, hvordan en reel bølge kan summeres op af regulære bølger, [11]. (B) Viser energiindholdet af bølgerne som funktion af frekvens og vinkel, [11].

De forskellige regulære bølger kan efterfølende indtegnes i en graf, som er illustreret på fig-

ur 5.2 (B). Her kan energiindholdet til forskellige bølger aflæses. Med hensyn til at trække mest muligt energi ud af bølgerne, gælder det om at optimere efter de mest energiholdige bølgeforekomster. [11]

Som beskrevet vil bølgerne ikke altid være ens og derfor er det vigtigt at tage hensyn til placeringen af bølgeenergimaskinerne. I tabel 5.1 ses et eksempel på hyppigste mest energiholdige bølgeforekomster i den danske Nordsø 100[km] fra kysten.

Bølge type	Bølgehøjde	Frekvens	Energi flux	Hyppighed	Potentiale
-	[m]	[rad/s]	[kW/m]	%	Flux·hyppighed
1	1,0	1,25	2,1	47,6	100,0
2	2,0	1,05	11,6	21,4	248,2
3	3,0	0,85	32,0	9,6	307,2
4	4,0	0,75	65,6	4,1	269,0
5	5,0	0,65	114,0	1,3	148,2

Tabel 5.1: Viser de fem bølgetyper i den danske Nordsø 100[km] fra kysten, der har det største energipotentiale, [11].

Tabellen indeholder fem forskellige bølgetyper og deres gennemsnitlige højde fra bølgedal til top, frekvens, energi flux, deres procentvise hyppighed samt energipotentialet. For at få en effektiv bølgeenergimaskine gælder det om at optimere den efter størst muligt energipotentiale. Typisk er bølgerne på havet koncentreret i frekvensområdet 0.5-0.9[rad/s]([6] s. 360). Dette vil der blive taget udgangspunkt i i forhold til opstillingen af kravene til reguleringerne af Wave Star armen.

## 5.2 Krav- og acceptspecifikation

I dette afsnit opstilles der krav til reguleringerne af Wave Star armen. Derudover klargøres acceptspecifikationerne, som danner basis for accepttesten i kapitel 12. Krav- og acceptspecifikationer til transducere og aktuator vil ikke blive behandlet, da de er designet fra anden side. Derfor formodes det, at transducere og aktuator er passende til at designe en regulator til Wave Star armen.

#### 5.2.1 Krav til reguleringer

I afsnit 5.1 blev det påpeget, at bølgerne i havet normalt har en bølgefrekvens på 0,5-0.9[rad/s]. Derfor vil der blive taget udgangspunkt i styresignaler (til regulatorerne), der er sinusformet og ligger i dette frekvensspektrum. Endvidere ønskes det, at regulatorerne skal regulere Wave Star armen med mindst mulig afvigelse fra styresignalet. Dette er essentielt, da det antages, at der kan trækkes maksimal energi ud af bølgerne, hvis styresignalet følges.

#### Krav til regulering af vinklen

Kravene til regulatoren af vinklen af Wave Star armen er:

- Wave Star armens aktuelle vinkel må maksimalt afvige med 10% fra styresignalets maksimal amplitude i frekvensspektret 0,5-0,9[rad/s]. Dette er illustreret på figur 5.3 (A).
- Wave Star armens aktuelle vinkel må maksimalt have en forsinkelse (en positiv faseforskydning) på 2% i forhold til styresignalet i frekvensspektret 0,5-0,9[rad/s]. Dette er illustreret på figur 5.3 (B).
- Regulatoren skal kunne regulere vinklen af Wave Star armen op til en amplitude på 0,05[rad]. Positionsændringen er fra flyderens udgangspunkt, hvor den flyder i stillestående vand. Endvidere skal positionsændringen på  $\pm 0,05[rad]$  kunne foregå i frekvensspektret 0,5-0,9[rad/s].

Grunden til, at vinkelregulatoren skal kunne ændre armens vinkel med  $\pm 0.05[rad]$  er, at flyderen stikker det, der svarer til 0.05[rad] i armens vinkel over vandoverfladen (i stillestående vand), og at det ikke ønskes at dykke flyderen under vandoverfladen. Dette efterstræbes i kraft af, at test og målinger vil blive foretaget i stillestående vand.



Figur 5.3: (A) Viser den maksimale afvigelse af den relative amplitude i forhold til styresignalet. (B) Viser den maksimale forsinkelse (faseforskydning) i forhold til styresignalet. De røde kurver er styresignalet og de sorte er grænsen for maksimal afvigelse. Figurerne gælder både for regulering af vinklen af og momentet i Wave Star armens arm.

#### Krav til regulering af moment

For regulatoren til regulering af momentet i Wave Star armens arm opstilles følgende krav:

- Det aktuelle moment i Wave Star armens arm må maksimalt afvige med 10% fra styresignalets maksimale amplitude i frekvensspektret 0,5-0,9[rad/s]. Dette er illustreret på figur 5.3 (A).
- Det aktuelle moment i Wave Star armens arm må maksimalt have en forsinkelse (en positiv faseforskydning) på 2% i forhold til styresignalet i frekvensspektret 0.5-0.9[rad/s]. Dette er illustreret på figur 5.3 (B).
- Regulatoren skal kunne regulere momentet i Wave Star armens arm op til en amplitude på 0.05[rad]. Positionsændringen er fra flyderens udgangspunkt, hvor den

flyder i stillestående vand. Endvidere skal positionsændringen på  $\pm 0.05[rad]$  kunne foregå i frekvensspektret 0.5-0.9[rad/s].

Den maksimale afvigelse, kombineret af forsinkelse og fejl i amplituder for både vinkel og moment er illustreret på figur 5.4.



Figur 5.4: Viser den maksimale afvigelse fra styresignalet kombineret af afvigelse i amplitude og forsinkelse. Grafen gælder for både regulering af vinkel og moment. Den røde kurve er styresignalet, mens den sorte er den maksimale afvigelse.

#### 5.2.2 Acceptspecifikation

Idet acceptspecifikationerne for regulering af vinkel og regulering af moment er tilsvarende, vil de blive beskrevet under ét. Der udføres tre grundlæggende acceptteste for at verificere, at kravene til regulatorerne overholdes. Til alle accepttestene benyttes følgende udstyr:

- Wave Star armen.
- Terminalen.
- Et vandkar med vand.

#### Konstant vinkelfrekvens

Formålet med denne test er at verificere, at kravene til afvigelse i amplitude og forsinkelse overholdes ved forskellige faste frekvenser i området 0.5-0.9[rad/s]. Testen fortages med maksimal amplitude på 0.05[rad] for også at efterprøve dette krav.

Fremgangsmåden for forsøget er først at placere Wave Star armen således, at flyderen flyder i karet med vand. Derefter tilsluttes terminalen til Wave Star armen for at kunne sende styresignalet og opsamle data. Først foretages testen med en vinkelfrekvens på 0.5[rad/s], hvorefter den øges til 0.6[rad/s]. Denne procedure fortsættes indtil en vinkelfrekvens på 0.9[rad/s] opnås.

#### Frekvenssweep

Formålet med denne test er at verificere, at kravene til afvigelse i amplitude og forsinkelse overholdes i et frekvenssweep fra 0.5[rad/s] til 0.9[rad/s]. Testen fortages med maksimal

amplitude på 0.05[rad] for også at efterprøve dette krav.

Fremgangsmåden for forsøget er først at placere Wave Star armen således, at flyderen flyder i karet med vand. Derefter tilsluttes terminalen til Wave Star armen for at kunne sende styresignalet og opsamle data. Selve testen foretages ved at give et frekvenssweep fra 0.5[rad/s] til 0.9[rad/s] som styresignal.

På denne måde kan testene "Konstant vinkelfrekvens" og "Frekvenssweep" verificere, om kravene til regulatorerne overholdes.

#### Step

Denne test er i bund og grund ikke relevant for at efterprøve kravene. Den fortages udelukkende for at se, hvor godt modellen, der udledes i kapitel 6, stemmer overens med virkeligheden, når der reguleres med regulatorerne. Testen går ud på at sende et step som styresignal og på den måde måle stepresponsen af det samlede system.

Fremgangsmåden for forsøget er først at placere Wave Star armen således, at flyderen flyder i karet med vand. Derefter tilsluttes terminalen til Wave Star armen for at kunne sende styresignalet og opsamle data. Der sendes et step som styresignal fra terminalen og dataene for vinkel og moment optages for at blive sammenlignet med resultaterne fra modellen.

# Kapitel 6 MODELLERING

I dette kapitel opstilles en matematisk model af Wave Star armen. Modellen går fra spænding over motoren til vinklen af Wave Star armen og momentet i armen. For at opstille modellen undersøges det først, hvordan en flyder, der bevæger sig i vand, kan modelleres. Derefter opstilles modellen for vinklen af Wave Star armen, hvorefter modellen for momentet i armen udledes. Begge modeller bliver lineariseret og de lineariserede modeller opstilles som et simuleringsdiagram, der senere benyttes til at tilpasse modellerne virkeligheden. Endvidere laplacetransformeres modellerne, således at de kan benyttes til at designe reguleringer af vinkel og moment. Regulatorerne designes i kapitel 9 og 10.

## 6.1 Modellering af en flyder

I dette afsnit gennemgås, hvordan en flyder, der bevæger sig i vertikal retning i bølger, kan modelleres. Der tages udgangspunkt i regulære bøger dvs. bølger, der opfører sig som rene sinuskurver. Hvis det tilstræbes at modellere for uregulære bølger, benyttes samme princip i sammenspil med reglen om superposition. Princippet er illustreret på figur 5.2 side 24. Følgende afsnit er skrevet ud fra kilde [6] s.359-360, hvis ikke andet er nævnt.

For at opstille en model for en flyder i vand er det først nødvendigt at foretage en kraftbetragtning af de kræfter, der spiller ind. Den overordnede sammenhæng for flyderen er, at flyderens inerti/masse multipliceret med accelerationen er lig den kraft, der tilføres flyderen, f.eks. med Wave Star armen, adderet med den kraft, der kommer fra interaktion med vandet. Dette kan opskrives som:

$$m\ddot{x} = F_f + F_m \tag{6.1}$$

Hvor m er massen. x er positionen og er lig nul i stillestående vand, hvis der ikke tilføres en ekstern kraft, det vil sige i flyderens hvilepunkt.  $F_m$  er den kraft som f.eks. tilføres med Wave Star armen og kan opskrives som (hvor det er antaget, at den tilførte kraft er proportional med hastigheden):

$$F_m = C\dot{x} \tag{6.2}$$

Hvor C er en konstant.

 $F_f$  er den kraft, der kommer fra vandet.  $F_f$  kan deles op i tre dele, således at:

$$F_f = F_e + F_{hd} + F_{hs} \tag{6.3}$$

Her er  $F_e$  eksitationskraften, dvs. den kraft, som kommer fra bølgen, der påvirker flyderen.  $F_e$  er altså den kraft der kommer fra den energi, som bølgerne flytter. Eksitationskraften vil ikke blive behandlet yderligere, da den vil blive betragtet som en forstyrrelse, idet den ikke er direkte påvirkelig af Wave Star armen.

 $F_{hd}$  er den hydrodynamiske kraft, der kan betragtes, ifølge kilde [6], som en virkning af en adderet masse og en viskose friktion. Friktionen opstår i og med, at flyder og vand bevæger sig op af hinanden og denne friktion regnes for at være en viskosefriktion. Denne adderede masse kan forklares ud fra figur 6.1.



Figur 6.1: Viser, hvordan en flyder, der bevæges vertikalt ned i vand, skubber vandet væk, [10].

Det antages, at vand er et inkompressibelt materiale, hvilket er en god antagelse, når der ikke arbejdes med større kræfter end dem, der kan komme fra en flyder. Inkompressibel vil sige, at vandet ikke ændrer sit volumen, når det udsættes for et tryk. Hvis en flyder presses ned i vandet, som på figuren, kan vandet ikke dekomprimere, hvorfor det i stedet skubbes væk af flyderens skrog. Det er således inertien fra det vand, der flyttes, der kommer til at virke som den adderede masse. Det samme gør sig gældende, når flyder trækkes op igen, da vandet skal flyttes tilbage, ([10] s. 1-2).

 $F_{hd}$  kan således skrives om som:

$$F_{hd} = -A\ddot{x} - B\dot{x} \tag{6.4}$$

Hvor A er den adderede masse og B er dæmpningskoefficienten. Både den adderede masse og dæmpningskoefficienten er frekvensafhængige, men de antages at være konstante, idet der arbejdes med et meget smalt frekvensbånd: 0,5-0,9[rad/s]. Udtryk 6.4 er derfor ikke en fuld ud beskrivelse af dynamikken, men kun for et udsnit.

Den sidste kraft fra udtryk 6.3,  $F_{hs}$ , er den hydrostatiske kraft, som kommer fra Archimedes' lov om masse fortrængelse. Den hydrostatiske kraft kan udtrykkes som:

$$F_{hs} = -\rho g S x \tag{6.5}$$

Hvor  $\rho$  er vands massefylde, g er tyngdeaccelerationen og S er flyderens tværsnitsareal. Når x er lig nul, er flyderen i sit "steady state", hvilket betyder, at den hydrostatiske kraft er lig nul.

I dette projekt er styresignalet til Wave Star armen en black box. Hvis det var formålet at finde det optimale styresignal, der kan trække mest mulig energi ud af bølgerne, er følgende værd at bemærke: For at trække mest mulig energi ud af bølgerne skal C = B. Altså skal den kraft, der tilføres med Wave Star armen være tilsvarende bidraget fra friktionen med vandet. Dette giver også intuitiv mening, da friktionen er det eneste led, der ikke kan lagre energi. Hvis ikke sammenhængen overholdes, vil det kun give anledning til en energioverførelse mellem de resterende elementer i systemet, hvilket ikke giver ekstra udbytte.

## 6.2 Vinkelmodellen

Som tidligere beskrevet er formålet med dette projekt at udvikle to regulatorer, der kan regulere henholdsvis vinklen og momentet af Wave Star armen. For at kunne udvikle passende regulatorer er det først nødvendigt at udlede en matematisk model af Wave Star armen. På den måde er det muligt at udvikle regulatorerne ud fra modellerne. I dette afsnit vil der blive udledt en model for Wave Star armens vinkel. I udledningen vil princippet for modellering af en flyder fra afsnit 6.1 blive benyttet. Endvidere vil modellen tage udgangspunkt i stillestående vand, hvorfor bølger vil blive betragtet som en forstyrrelse. Grunden til dette er, at Wave Star armen ikke har direkte kontrol over bølgerne.

#### 6.2.1 Blokdiagram for vinkel

Først betragtes et blokdiagram for reguleringssløjfen af vinklen. Dette blokdiagram ses på figur 6.2.



Figur 6.2: Viser et blokdiagram for reguleringssløjfen af Wave Star armens vinkel.

Diagrammet består først af en regulator, som skal styre DC-motoren således, at den ønskede vinkel opnås. I kapitel 9 findes der frem til den regulator, der skal benyttes. Efter regulatoren er selve systemet, som går fra en spænding på motoren til vinkel af armen. Det er denne overføringsfunktion, der findes frem til i dette afsnit. Til den vinkel som motor og stillestående vand danner tilsammen, adderes en forstyrrelse, som stammer fra eventuelle bølger og fra eksitationskraften. På denne måde haves den endelige vinkel af armen, hvilket bliver målt og tilbagekoblet til styresignalet. Fejlen mellem styresignalet og den målte vinkel bliver således sendt videre til regulatoren.

#### 6.2.2 Free-body for vinkelmodel

For at udlede modellen for vinklen af Wave Star armen analyseres de forskellige krafter og kraftmomenter, der virker på systemet. Dette gøres ud fra et free-body diagram, som er opstillet på figur 6.3.



Figur 6.3: Viser det free-body diagrammet der benyttes til at udlede vinkelmodellen.

Free-body diagrammet tager udgangspunkt i motoren som omdrejningspunkt. Som det ses, består free-body diagrammet af tre kraftmomenter, hvilke er:  $\tau_m$  som er kraftmomentet fra motor og gear,  $\tau_J$  som er kraftmomentet, der kommer fra arm og flyders inertimoment og  $\tau_f$  som er det kraftmoment, der kommer fra de kræfter, vandet påvirker flyderen med samt tyngdekraften. Den samlede kraft, som virker på flyderen er  $F_f$ .

Til udledningen af modellen tages der endvidere udgangspunkt i den situation, hvor der påtrykkes en spænding på motoren således, at den forsøger at presse flyderen ned i vandet. Derudover antages det, at vandet er stillestående, så det kun er modellen for selve systemet, der findes. Derudover tages der udgangspunkt i, at flyderen har positionen 0 i det tilfælde, hvor der ikke påføres en kraft fra motoren og at flyderen står stille i vandet. Endvidere antages det, at vinkehastigheden og vinkelaccelerationen af Wave Star armen er nul til tiden nul. Dette gøres for at kunne udlede modellen omkring et arbejdspunkt, for dernæst at kunne udlede en lineær model af systemet.

I modellerne for vinklen af Wave Star armen og momentet i armen vil der ikke blive taget højde for tør og statisk friktion, da disse ikke er lineære. Sidst skal det oplyses, at inerti og friktion i motor og gear ikke medtages i modellerne (både for modellen for vinklen af Wave Star armen og modellen for momentet i armen), da de vurderes til at have en ubetydelig størrelse i forhold til inerti og friktion i resten af systemet. Inerti og friktion i motor og gear vil dog blive indirekte medtaget i modellerne i kraft af, at modellerne tilpasses virkeligheden efter måleresultater, hvorved inertien og friktionen i motor og gear vil være skjult i de led, som tilpasses.

Hvis der påtrykkes en positiv spænding på motoren, vil den skabe et kraftmoment, som vil accelerere flyderen ned i vandet, hvilket i modellen regnes for positiv retning. Denne acceleration vil give et modsatrettet inertimoment fra massen af armen og flyderen. Det, at flyderen presses ned i vandet, vil medføre, at hydrokræfterne overvinder tyngdekraften, hvilket giver endnu et modsatrettet moment,  $\tau_f$ . Denne sammenhæng giver følgende momentligning med motoren som omdrejningspunkt:

$$\tau_m = \tau_J + \tau_f \tag{6.6}$$

I det følgende vil udtrykkene for  $\tau_m$ ,  $\tau_J$  og  $\tau_f$  blive fundet.

#### 6.2.3 Motormomentet

Den mekaniske ligning for momentet af en DC-motor med gearing kan modelleres som:

$$\tau_m = NkI \tag{6.7}$$

N: Gearing [-]k: DC-motorens motorkonstant  $\left[\frac{N \cdot m}{A}\right]$ I: Motorstrømmen [A]

Den elektriske model, der benyttes for DC-motoren med gear, kan ses på figur 6.4.



Figur 6.4: Viser den elektriske model, der benyttes for DC-motoren med gearing. Det ses, at modellen består af en ekstern spændingskilde, en intern modstand og en elektromotorisk kraft.

Modellen består af en spændingskilde i serie med en modstand og en EMF. Spændingskilden er den, der kan styres. EMF'en er givet ved  $kN\dot{\theta}[V]$  og modstanden er motorens interne modstand. Der skal gøres opmærksom på, at en DC-motormodel normalt indeholder en selvinduktans. Denne ses der imidlertid bort fra, da den kun vil bidrage med en tidskonstant, som er betydeligt lavere end for mekanikken af Wave Star armen. Ud fra figuren kan følgende udtryk udledes:

$$V = RI + kN\theta \tag{6.8}$$

$$I = \frac{V - kN\dot{\theta}}{R} \tag{6.9}$$

- V: Spænding over motoren [V]R: Motorens interne modstand  $[\Omega]$
- $\theta$ : Wave Star armens vinkelhastighed  $\left[\frac{rad}{s}\right]$

Indsættes udtryk 6.9 i 6.7 fås udtryk 6.10, der beskriver det kraftmoment, som motor og gear bidrager med.

$$\tau_m = Nk \frac{V - kN\dot{\theta}}{R} \tag{6.10}$$

#### 6.2.4Inertimoment

Nu vil kraftmomentet, der er forårsaget af inertimomentet, blive udledt. Dette kraftmoment er givet ved:

$$\tau_J = J\ddot{\theta} \tag{6.11}$$

- J: Arm og flyders inertimoment  $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$  $\ddot{\theta}$ : Wave Star armens vinkelacceleration  $\left[\frac{rad}{s^2}\right]$

Wave Star armens inertimoment består dels af armens inertimoment og dels af flyderens. Således bliver inertimomentet:

$$J = J_a + J_f \tag{6.12}$$

 $J_a$ : Armens inertimoment  $[kg \cdot m^2]$  $J_f$ : Flyderens inertimoment  $[kg \cdot m^2]$ 

Inertimomentet for armen kan betragtes som inertimomentet for en stang med en ubetydelig tykkelse og den ene ende monteret til rotationspunktet, hvilket er givet ved [8]:

$$J_a = \frac{1}{3}m_a r_a^2 \tag{6.13}$$

 $m_a$ : Masse af armen [kg] $r_a$ : Længden af armen [m]

Med hensyn til inertimomentet for flyderen, da simplificeres flyderen til at være en masse i et punkt. Dette mindsker kompleksiteten og antages ikke for at være en stor fejl, da flyderen befinder sig med armens længde væk fra rotationspunktet. Derved er flyderens inertimoment givet ved [8]:

$$J_f = m_f r_a^{\ 2} \tag{6.14}$$

#### $m_f$ : Masse af flyderen [kg]

Ud fra ovenstående kan udtrykket for kraftmomentet, forårsaget af inertimomentet, udledes til:

$$\tau_J = \left(\frac{1}{3}m_a + m_f\right) r_a{}^2\ddot{\theta} \tag{6.15}$$

#### 6.2.5 Hydrokræfter

Således er der fundet frem til kraftmomentet forårsaget af både motor og inertimoment. Derfor vil kraftmomentet forårsaget af hydrokræfterne og tyngdekraften blive udledt i det følgende. Som beskrevet i afsnit 6.1 medtages kun den hydrodynamiske og hydrostatiske kraft i modellen. For at give et overblik over de forskellige kræfter og størrelser er figur 6.5 (A) og (B) blevet udarbejdet.



Figur 6.5: Illustrerer de forskellige kræfter, størrelser og retninger, der benyttes til udledningen af kraftmomentet, der stammer fra flyderen.  $F_{hd}$  er den hydrodynamiske kraft,  $F_{hs}$ er den hydrostatiske kraft og  $F_g$  er tyngdekraften.

Figur 6.5 (A) illustrerer Wave Star armens arbejdspunkt. Det vil sige, der hvor motormomentet er nul og vandet er stillestående.  $\overline{\theta}$  er vinklen af armen i arbejdspunktet og  $r_a \sin \overline{\theta}$ er afstanden mellem motoren og flyderens top i vertikal retning til arbejdspunktet, hvor  $r_a$ er armens længde.  $\overline{x_0}$  er afstanden mellem flyderes top og vandoverfladen i arbejdspunktet, tet, mens  $\overline{x_k}$  er afstanden mellem vandoverfladen og flyderens bund i arbejdspunktet.

Figur 6.5 (B) viser den situation, hvor flyderen er blevet presset ned i vandet i forhold til arbejdspunktet. Læg her mærke til, at dette er den positive retning for x, som er positionen af flyderen. x er således angivet som afstanden fra vandoverfladen til bunden af flyderen subtraheret med  $\overline{x_k}$ . Vinklen af armen er angivet som  $\theta$ , hvis positive retning følger pilen. Afstanden mellem motoren og flyderen er nu angivet som  $r_a sin\theta$ . Sidst er  $x_k$ højden af den del af flyderen, som er sænket under vand.

Det samlede kraftmoment fra flyderen er den vinkelrette kraft, i forhold til armen, multipliceret med armens længde. Derfor skal der først findes frem til den vinkelrette kraft. Dette gøres ud fra figur 6.6.



Figur 6.6: Viser  $F_f$ 's komposanter, vinkelret og parallel med armen.

Det kan således uddrages fra figur 6.5 og 6.6, at momentet fra flyderen bliver:

$$\tau_f = r_a cos \theta F_f \tag{6.16}$$

 $F_f$ : Samlet kraft, der virker på flyderen [N]

Hvor:

$$F_f = F_{hd} + F_{hs} - F_g \tag{6.17}$$

 $F_{hd}$ : Hydrodynamisk kraft [N] $F_{hs}$ : Hydrostatisk kraft [N] $F_{hd}$ : Tyngdekraft [N]

Det ønskes derfor at finde et udtryk for hver af disse tre kræfter.

#### Hydrodynamisk kraft

Først findes den hydrodynamiske kraft. Her benyttes modellen fra afsnit 6.1, hvor retningen af kraften er rettet til i forhold til figur 6.5. Der tages umiddelbart ikke højde for, at flyderen flytter sig i vandret retning, men idet kraften senere findes eksperimentelt, medtages denne vandret bevægelse derigennem. Den hydrodynamiske kraft bliver derfor:

$$F_{hd} = A\ddot{x} + B\dot{x} \tag{6.18}$$

- A: Funktion for adderet masse [kg]
- B: Funktion for dæmpningen  $\left[\frac{N \cdot m}{rad_{s}}\right]$
- $\ddot{x}$  Acceleration af x fra figur 6.5  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
- $\dot{x}$  Hastighed af x fra figur 6.5  $\left\lceil \frac{m}{s} \right\rceil^{\circ}$

Det ses, at den hydrodynamiske kraft er afhængig af x. Idet det ønskes at udtrykke den hydrodynamiske kraft ved vinklen af Wave Star armen, er det nødvendigt at beskrive xsom en funktion af  $\theta$ . Betragtes figur 6.5 kan det udledes, at x er givet ved sinus til vinklen af armen multipliceret med armens længde subtraheret med arbejdspunktet, altså:

$$x = r_a \sin \theta - r_a \sin \overline{\theta} \tag{6.19}$$
Idet den hydrodynamiske kraft er afhængig af hastighed og acceleration, er det nødvendigt at differentiere dette udtryk to gange med hensyn til tiden:

$$\dot{x} = r_a \cos\left(\theta\right) \dot{\theta} \tag{6.20}$$

$$\ddot{x} = r_a \cos\left(\theta\right)\ddot{\theta} - r_a \sin\left(\theta\right)\dot{\theta}^2 \tag{6.21}$$

Således kan det endelige udtryk for den hydrodynamiske kraft, som funktion af armens vinkel sammensættes til:

$$F_{hd} = A\left(r_a\cos\left(\theta\right)\ddot{\theta} - r_a\sin\left(\theta\right)\dot{\theta}^2\right) + Br_a\cos\left(\theta\right)\dot{\theta}$$
(6.22)

#### Hydrostatisk kraft

Den hydrostatiske kraft er, som beskrevet i afsnit 6.1, givet ved den opdrift, som flyderen giver, idet den fortrænger noget af vandet. Efter den hydrostatiske krafts retning er rettet til i forhold til modellen, er den givet ved:

$$F_{hs} = \rho_v g S_k x_k \tag{6.23}$$

 $\rho_v$ : Vands massefylde  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  g: Tyngdeaccelerationen  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$ 

 $S_k$ : Tværsnitsarealet af en kugle til et givent punkt  $[m^2]$ 

 $x_k$ : Højde af flyderen, som er dækket af vand [m]

 $S_k x_k$  er den volumen af flyderen, som er dækket af vand og giver opdriften. Idet flyderen jf. kapitel 3 består af en cylinder ovenpå en halvkugle, skal volumen tilsvneladende beskrives af flere funktioner. Volumen, der er dækket af vand, kan deles op i fire:

- 1. Hvis intet af flyderen er dækket af vand, er volumen nul.
- 2. Hvis noget af eller hele halvkuglen er dækket af vand, kan volumen beskrives som en kugletop.
- 3. Hvis hele halvkuglen og noget af eller hele cylinderen er dækket af vand, kan volumen beskrives som hele halvkuglen og en del af en cylinder.
- 4. Hvis hele flyderen er dækket af vand, er volumen hele halvkuglen samt cylinderen.

Denne beskrivelse af volumen er langt fra lineær, og idet det i sidste ende ønskes at komme frem til en lineær model af Wave Star armen, er det nødvendigt at analysere problemstillingen. Først bør det mest forekommende tilfælde af ovenstående vælges. Når flyderen er i sit arbejdspunkt, hvor den hydrostatiske kraft bliver ophævet af tyngdekraften, flugter vandoverfladen cylinderdelen (positionen er nul jf. afsnit 6.1). I det rum, som det ønskes at bevæge flyderen, vil vandoverfladen flugte enten cylinderdelen eller det øverste af halvkuglen. Derfor bør der foretages et valg mellem at beskrive volumen med enten en kugletop eller en cylinder.

Hvis volumen beskrives som en kugletop, passer det overens med virkeligheden, indtil vandoverfladen flugter med cylinderen. Derfor vil der komme en fejl, idet volumen i virkeligheden vil fortsætte som en cylinder og ikke en kugle. Modellen vil således give et betydeligt mindre volumen end i virkeligheden, hvilket ikke er optimalt.

Hvis volumen i stedet beskrives som en cylinder, vil modellen give et betydeligt større volumen end i virkeligheden, da kugledelen beskrives som en cylinder. Dette vil først og fremmest give en stor offset-fejl. Men denne fejl kan korrigeres ved at tage højde for den i beskrivelsen af tyngdekraften. Hvis tyngdekraften sættes til at være lig med flyderens dækkede volumens (beskrevet som en cylinder) opdrift i arbejdspunktet, vil der ikke opstå en offset-fejl. Men idet vandoverfladen flugter halvkuglen, vil modellen give en større opdrift end i virkeligheden. Betragtes det arbejdsrum, som flyderen forventes at skulle være i, er det kun den øverste del af halvkuglen, der vil komme til at flugte med vandoverfladen. Den øverste del af en halvkugle minder meget (i forhold til volumen) om en cylinder, hvorfor fejlen er begrænset.

Derfor bliver valget, at beskrive volumen som en cylinder, hvilket giver:

$$S_k x_k = \pi r_k^2 x_k \tag{6.24}$$

 $r_k$ : Radius af flyderens kugle- og cylinderdel [m]

Ligesom ved den hydrodynamiske kraft ønskes det også her at udtrykke den hydrostatiske kraft som en funktion af Wave Star armens vinkel og ikke af placeringen i vertikal retning. Derfor skal  $x_k$  erstattes med en funktion af  $\theta$ . Betragtes figur 6.5, kan det udledes, at  $x_k$ er lig med x bare adderet med  $\overline{x_k}$  ( $x_k$  i arbejdspunktet):

$$x_k = r_a \sin \theta - r_a \sin \theta + \overline{x_k} \tag{6.25}$$

Erstattes  $x_k$  i udtryk 6.24 med udtryk 6.25 og indsættes i udtryk 6.23, findes det endelige udtryk for den hydrostatiske kraft:

$$F_{hs} = \rho_v g \pi r_k^2 \left( r_a \sin \theta - r_a \sin \overline{\theta} + \overline{x_k} \right)$$
(6.26)

## 6.2.6 Tyngdekraft og samlet kraft på flyderen

Som beskrevet skal offset-fejlen fra beskrivelsen af den hydrostatiske kraft korrigeres ved beskrivelsen af tyngdekraften. For at korrigere for fejlen skal tyngdekraften sættes lig med den hydrostatiske kraft i arbejdspunktet. Derfor bliver tyngdekraften, der virker på flyderen:

$$F_g = \overline{F_{hs}} = \rho_v g \pi r_k^{\ 2} \overline{x_k} \tag{6.27}$$

Således er der fundet frem til de kræfter, der påvirker flyderen. Ved at indsætte udtryk 6.22, 6.26 og 6.27 i udtryk 6.17 findes udtrykket for  $F_f$ :

$$F_{f} = F_{hd} + F_{hs} - F_{g} = A \left( r_{a} \cos\left(\theta\right) \ddot{\theta} - r_{a} \sin\left(\theta\right) \dot{\theta} \right)$$

$$+ Br_{a} \cos\left(\theta\right) \dot{\theta} + \rho_{v} g \pi r_{k}^{2} \left( r_{a} \sin\theta - r_{a} \sin\overline{\theta} + \overline{x_{k}} \right) - \overline{F_{hs}}$$

$$(6.28)$$

Indsættes udtryk 6.28 i udtryk 6.16, fås det samlede kraftmoment, der stammer fra flyderen:

$$\tau_{f} = r_{a} cos\theta F_{f} = r_{a} cos\theta A \left( r_{a} cos(\theta) \ddot{\theta} - r_{a} sin(\theta) \dot{\theta} \right)$$

$$+ r_{a} cos\theta B r_{a} cos(\theta) \dot{\theta} + r_{a} cos\theta \rho_{v} g \pi r_{k}^{2} \left( r_{a} sin\theta - r_{a} sin\overline{\theta} + \overline{x_{k}} \right) - r_{a} cos\theta \overline{F_{hs}}$$

$$\uparrow$$

$$\tau_{f} = r_{a} cos\theta F_{f} = r_{a}^{2} cos\theta A \left( cos(\theta) \ddot{\theta} - sin(\theta) \dot{\theta} \right)$$

$$+ r_{a}^{2} cos(\theta)^{2} B \dot{\theta} + r_{a} cos\theta \rho_{v} g \pi r_{k}^{2} \left( r_{a} sin\theta - r_{a} sin\overline{\theta} + \overline{x_{k}} \right) - r_{a} cos\theta \overline{F_{hs}}$$

$$(6.29)$$

$$(6.29)$$

$$(6.30)$$

## 6.2.7 Samlet vinkelmodel og linearisering

I det følgende vil den samlede vinkelmodel blive sammensat og lineariseret. Desuden vil der blive fundet frem til en overføringsfunktion fra spænding på motoren til vinkel af armen. Regulatoren til regulering vil blive designet, i kapitel 9, ud fra denne overføringsfunktion.

#### Samlet vinkelmodel

Idet der er fundet frem til et udtryk for motormomentet (udtryk 6.10), momentet forårsaget af inertien (udtryk 6.15) og momentet forårsaget af flyderen (udtryk 6.29), kan disse udtryk indsættes i udtryk 6.6. Dette giver den samlede model for vinklen af armen:

$$Nk\frac{\sqrt{-k_{IV0}}}{R} = (1/_{3}m_{a} + m_{f})r_{a}^{2}\dot{\theta} + r_{a}^{2}\cos\theta A\left(\cos\left(\theta\right)\dot{\theta} - \sin\left(\theta\right)\dot{\theta}\right)$$

$$+ r_{a}^{2}\cos\left(\theta\right)^{2}B\dot{\theta} + r_{a}\cos\theta\rho_{v}g\pi r_{k}^{2}\left(r_{a}\sin\theta - r_{a}\sin\overline{\theta} + \overline{x_{k}}\right) - r_{a}\cos\theta\overline{F_{hs}}$$

$$(6.32)$$

#### Linearisering af vinkelmodel

Som det ses af vinkelmodels udtrykket, er de sidste fire led ulineære. Idet det er ønsket at finde frem til en lineær model, skal disse led lineariseres ud fra et arbejdspunkt. Arbejdspunktet er det tilfælde, hvor flyderen befinder sig i ro og vandet er stillestående. Desuden er motormomentet nul i arbejdspunktet. Dette tilsammen giver endvidere, at vinkelhastigheden og vinkelaccelerationen er nul i arbejdspunktet. Der skal gøres opmærksom på, at symbolet med en streg over sig er et arbejdspunkt og symboler efterfulgt af en hævet trekant/delta er småsignal variable.

Lineariseringen af de fire led foregår efter samme princip: Først findes arbejdspunktet af leddet, derefter fortages en første ordens Taylor approksimation af leddet og til sidst fratrækkes arbejdspunktet fra approksimationen og eventuelle led, der giver nul, fjernes. Der skal gøres opmærksom på, at denne lineariseringen vil medføre, at den lineariserede model bliver en småsignalsmodel. Dette er acceptabelt, idet arbejdsrummet for Wave Star armen er begrænset.

Først lineariseres følgende led, som stammer fra den hydrodynamiske kraft:

$$r_a^2 \cos\theta A \left( \cos\left(\theta\right) \ddot{\theta} - \sin\left(\theta\right) \dot{\theta} \right)$$
(6.33)

Der indsættes arbejdspunkt og småsignal varaiable, hvorefter arbejdspunktet findes:

$$r_a^2 \cos\left(\overline{\theta} + \theta^{\Delta}\right) A\left(\cos\left(\overline{\theta} + \theta^{\Delta}\right) \left(\overline{\ddot{\theta}} + \ddot{\theta}^{\Delta}\right) - \sin\left(\overline{\theta} + \theta^{\Delta}\right) \left(\overline{\dot{\theta}} + \dot{\theta}^{\Delta}\right)\right)$$
(6.34)  
$$\Downarrow$$

$$r_a^2 cos\overline{\theta} A\left(\cos\left(\overline{\theta}\right)\overline{\ddot{\theta}} - \sin\left(\overline{\theta}\right)\overline{\dot{\theta}}\right)$$
(6.35)

Herefter foretages en første ordens Taylor approksimation, hvilket giver:

$$r_{a}^{2}cos\overline{\theta}A\left(\cos\left(\overline{\theta}\right)\overline{\ddot{\theta}}-\sin\left(\overline{\theta}\right)\overline{\dot{\theta}}\right)-\left(2\left(\cos\overline{\theta}\right)^{2}\overline{\dot{\theta}}^{2}+2\sin\overline{\theta}\cos\left(\overline{\theta}\right)\overline{\ddot{\theta}}-\overline{\dot{\theta}}^{2}\right)r_{a}^{2}A\theta^{\Delta}$$

$$-2\overline{\dot{\theta}}\sin\overline{\theta}\cos\overline{\theta}r_{a}^{2}A\dot{\theta}^{\Delta}+\left(\cos\overline{\theta}\right)^{2}r_{a}^{2}A\ddot{\theta}^{\Delta}$$

$$(6.36)$$

Således kan arbejdspunktet fratrækkes og led, der giver nul, fjernes:

$$\left(\cos\overline{\theta}\right)^2 r_a{}^2 A \ddot{\theta}^\Delta \tag{6.37}$$

Herefter lineariseres næste led, som også stammer fra den hydrodynamiske kraft:

$$r_a^2 \cos(\theta)^2 B \dot{\theta} \tag{6.38}$$

Arbejdspunktet udledes:

$$r_a^2 cos \left(\overline{\theta} + \theta^{\Delta}\right)^2 B \left(\overline{\dot{\theta}} + \dot{\theta}^{\Delta}\right)$$

$$\downarrow \qquad (6.39)$$

$$r_a^2 cos(\overline{\theta})^2 B \overline{\dot{\theta}}$$
(6.40)

Der fortages en første ordens Taylor approksimation:

$$r_a^2 \cos(\bar{\theta})^2 B \bar{\dot{\theta}} - 2\sin\bar{\theta}\cos\bar{\theta}r_a^2 B \bar{\dot{\theta}}\theta^{\Delta} + B(\cos\theta)^2 r_a^2 \dot{\theta}^{\Delta}$$
(6.41)

Så fratrækkes arbejdspunktet og led, der giver nul, fjernes, således at leddet bliver lineært:

$$B(\cos\theta)^2 r_a{}^2 \dot{\theta}^{\Delta} \tag{6.42}$$

Herefter fortsættes med at linearisere leddet det beskriver den hydrostatiske kraft:

$$r_a \cos\theta \rho_v g \pi r_k^2 \left( r_a \sin\theta - r_a \sin\overline{\theta} + \overline{x_k} \right) \tag{6.43}$$

Endnu engang findes arbejdspunktet:

$$\begin{aligned} r_a \cos \overline{\theta} \rho_v g \pi r_k^2 \left( r_a \sin \overline{\theta} - r_a \sin \overline{\theta} + \overline{x_k} \right) \\ & \updownarrow \end{aligned}$$
(6.45)

$$r_a \cos \overline{\theta} \rho_v g \pi r_k^2 \overline{x_k} \tag{6.46}$$

Dette arbejdspunkt benyttes som tidligere beskrevet også til udledningen af tyngdekraften. Den første ordens Taylor approksimation bliver:

$$r_a \cos\overline{\theta}\rho_v g\pi r_k^2 \overline{x_k} + \left(\cos\left(\overline{\theta}\right)^2 r_a - \sin\overline{\theta}\overline{x_k}\right)\rho_v g\pi r_k^2 r_a \theta^{\Delta}$$
(6.48)

Arbejdspunktet kan fratrækkes fra approksimationen og leddet er nu liniært:

$$\left(\cos\left(\overline{\theta}\right)^2 r_a - \sin\overline{\theta}\overline{x_k}\right) \rho_v g \pi r_k^2 r_a \theta^\Delta \tag{6.49}$$

Det sidste led, som skal lineariseres, er det, der kommer fra tyngdekraften:

$$-r_a cos \theta \overline{F_{hs}} \tag{6.50}$$

Som kan lineariseres til:

$$\sin \bar{\theta} r_a \overline{F_{hs}} \tag{6.51}$$

Arbejdspunktet af den hydrostatiske kraft er tidligere fundet og kan således indsættes:

$$\sin \overline{\theta} r_a \rho_v g \pi r_k^2 \overline{x_k} \theta^\Delta \tag{6.52}$$

Eftersom alle ulineære led er blevet lineariseret, kan den endelige småsignalsmodel sammensættes til følgende udtryk:

$$Nk\frac{V-kN\dot{\theta}^{\Delta}}{R} = (1/_{3}m_{a}+m_{f})r_{a}^{2}\ddot{\theta}^{\Delta} + (\cos\bar{\theta})^{2}r_{a}^{2}A\ddot{\theta}^{\Delta} + B(\cos\theta)^{2}r_{a}^{2}\dot{\theta}^{\Delta}$$

$$+ \left(\cos(\bar{\theta})^{2}r_{a} - \sin\bar{\theta}\overline{x_{k}}\right)\rho_{v}g\pi r_{k}^{2}r_{a}\theta^{\Delta} + \sin\bar{\theta}r_{a}\rho_{v}g\pi r_{k}^{2}\overline{x_{k}}\theta^{\Delta}$$

$$\stackrel{Nk}{R}V^{\Delta} = \left(1/_{3}m_{a} + m_{f} + (\cos\bar{\theta})^{2}A\right)r_{a}^{2}\ddot{\theta}^{\Delta} + \left(B(\cos\theta)^{2}r_{a}^{2} + \frac{k^{2}N^{2}}{R}\right)\dot{\theta}^{\Delta}$$

$$+ \left(\cos(\bar{\theta})^{2}r_{a} - \sin\bar{\theta}\overline{x_{k}} + \sin\bar{\theta}\overline{x_{k}}\right)\rho_{v}g\pi r_{k}^{2}r_{a}\theta^{\Delta}$$

$$\stackrel{Nk}{R}V^{\Delta} = \left(1/_{3}m_{a} + m_{f} + (\cos\bar{\theta})^{2}A\right)r_{a}^{2}\ddot{\theta}^{\Delta} + \left(B(\cos\theta)^{2}r_{a}^{2} + \frac{k^{2}N^{2}}{R}\right)\dot{\theta}^{\Delta}$$

$$\frac{Nk}{R}V^{\Delta} = \left(1/_{3}m_{a} + m_{f} + (\cos\bar{\theta})^{2}A\right)r_{a}^{2}\ddot{\theta}^{\Delta} + \left(B(\cos\theta)^{2}r_{a}^{2} + \frac{k^{2}N^{2}}{R}\right)\dot{\theta}^{\Delta}$$

$$(6.53)$$

Dette udtryk er imidlertid forholdsvist u<br/>overskueligt, hvorfor konstanterne: E, F, G og H indføres:

$$E = \cos(\overline{\theta})^2 \rho_v g \pi r_k^2 r_a^2 \tag{6.56}$$

$$F = \left(B(\cos\theta)^2 r_a^2 + \frac{k^2 N^2}{R}\right) \tag{6.57}$$

$$G = \left(\frac{1}{3}m_a + m_f + \left(\cos\overline{\theta}\right)^2 A\right) r_a^2 \tag{6.58}$$

$$H = \frac{Nk}{R} \tag{6.59}$$

Således kan der fremskrives en mere overskuelig småsignalsmodel for vinklen af armen:

$$HV^{\Delta} = G\ddot{\theta}^{\Delta} + F\dot{\theta}^{\Delta} + E\theta^{\Delta} \tag{6.60}$$

#### Vinkelmodellens overføringsfunktion

Som tidligere beskrevet, er det ønsket at finde en overføringsfunktion fra spændingen på motoren til vinklen af armen, således der senere kan designes en regulator derudfra. Derfor laplacetransformeres udtryk 6.60 og omskrives, så overføringsfunktionen findes til:

$$HV(s) = s^{2}G\theta(s) + sF\theta(s) + E\theta(s)$$

$$(6.61)$$

$$G_v(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$
(6.62)

Således er der fundet frem til en lineær småsignalsmodel af Wave Star armens vinkel og der er endvidere fundet frem til overføringsfunktionen deraf. Det ses, at overføringsfunktionen indeholder to poler.

# 6.3 Momentmodellen

En model for momentet i armen skal benyttes som grundlag for at udvikle en regulator af momentet, hvilket bliver gjort i kapitel 10. Blokdiagrammet for reguleringssløjfen af momentet i Wave Star armen er tilsvarende reguleringssløjfen for vinklen (figur 6.2 side 31), blot at der reguleres efter momentet, og at modellen går fra spænding over motoren til moment i armen.

For at opstille en model for momentet i armen er det først nødvendigt at betragte, hvordan momentet måles. Momentet måles med en strain gauge, som måler, hvor meget armen bøjer i et bestemt punkt. Der skal således opstilles en model for netop dette. For at kunne gøre dette må armen deles op i to dele forbundet med en rotationsfjeder, hvorved det er muligt at bøje armen. Dette er illustreret på figur 6.7 (A).



Figur 6.7: Viser hvordan Wave Star armen er delt op i to dele og hvilke kræfter og kraftmomenter der indvirker. (B) Viser det udsnit fra (A), hvor armen er delt op i to.

Figur 6.7 (A) og (B) illustrerer endvidere de forskellige størrelser, kræfter og momenter, der har indflydelse på det punkt, hvor armen er splittet og på motorakslen. Figuren er således det free-body diagram, som benyttes til at opstille modellen for momentet i armen. Figur 6.7 (B) viser skillepunktet fra figur 6.7 (B) blot forstørret. Kræfternes og momenternes retninger er indtegnet efter den situation, hvor motoren prøver at presse flyderen ned i vandet. Det er derfor også denne retning, der regnes for positiv, ligesom ved opstillingen af vinkelmodellen.

Først betragtes figur 6.7 (A), hvor det ses at motormomentet  $\tau_m$  og et modsatrettet inertikraftmoment  $\tau_{Jx}$  virker direkte på motorakslen. Inertikraftmomentet er forårsaget af inertimomentet, der stammer fra den del af armen, som er forbundet med motoren. Som det også ses, er der indtegnet en længde:  $r_x$ , som er længden fra motorakslen til placeringen af strain gaugen. Endvidere er der indtegnet massemidtpunktet for den del af armen, der er koblet til flyderen og flyderen selv, hvilket benyttes senere. I denne sammenhæng er længden  $r_m$  defineret som længden fra motoren til massemidtpunktet.

Herefter betragtes figur 6.7 (B). For, at de to dele af armen ikke kan glide fra hinanden, må der nødvendigvis være nogle kræfter, der holder dem sammen. Den ene kraft er  $F_{a \angle}$ , som er den kraft, der sørger for, at de to dele ikke glider vertikalt fra hinanden.  $F_{a \angle}$  virker på begge dele af armen, bare modsatrettet hinanden, da  $F_{a \angle}$  på den ene del af armen er skyllet af  $F_{a \angle}$  på den anden del. Retningen af  $F_{a \angle}$  er bestemt ud fra, at hver del af armen er betragtet som et free-body og at motoren prøver at presse flyderen ned i vandet. Således vil den del af armen, der er koblet til flyderen, prøve at skubbe den anden del af armen opad og omvendt. Den anden kraft, der sørger for, at de to dele af armen ikke glider fra hinanden, er:  $F_{a\parallel}$ , som sørger for, at delene af armen ikke glider fra hinanden i horisontal retning.  $F_{a\parallel}$  virker ligeledes på begge dele af armen og er modsatrettet af samme grund. Retningen af  $F_{a\parallel}$  må nødvendigvis være ind mod skillepunktet.

Hvis motoren udøver et moment og prøver at presse flyderen ned i vandet, vil flyderen give et modmoment gennem armen. Momentet i armen er kaldet  $\tau_a$  og på den del af armen, der er koblet til motoren, vil momentet virke om motorakslen og være modsatrettet af motormomentet grundet førstående. På samme måde vil der være et lige så stort og modsatrettet moment på den anden del af armen, der virker omkring det indtegnede massemidtpunkt fra figur 6.7 (A). De kræfter, der forsager  $\tau_a$ , er kaldet  $F_{\tau}$ , og kommer fra, at de to dele af armen vil skubbe til hinanden i toppen og hive i hinanden i bunden. For den del af armen, der er koblet til motoren, vil  $F_{\tau}$  skabe  $\tau_a$  omkring motorakslen med "armen"d/2, hvor d er tykkelsen af armen. Retningerne af  $F_{\tau}$  bekræfter derfor retningerne af  $\tau_a$ .

Ud fra ovenstående forklaringer og figur 6.7 kan der nu findes frem til en momentligning for momentet i armen ( $\tau_a$ ). Der tages udgangspunkt i motorakslen og den del af armen, som er koblet til motoren. Idet motoren prøver at få flyderen længere ned i vandet, vil der komme et modmoment fra følgende: armens inertimoment (den del, som er koblet til motoren),  $\tau_a$  og kraften  $F_{a \angle}$  multipliceret med armens længde (den del, som er koblet til motoren). Momentligningen bliver således:

$$\tau_m = \tau_{Jx} + \tau_a + F_{a \angle} r_x \tag{6.63}$$

$$\tau_a = \tau_m - \tau_{Jx} - F_{a\angle} r_x \tag{6.64}$$

Der skal således findes et udtryk for  $\tau_m$ ,  $\tau_{Jx}$  og  $F_{a \angle}$ .  $\tau_m$  er i vinkelmodellen fundet til:

1

$$\tau_m = Nk \frac{V - kN\dot{\theta}}{R} \tag{6.65}$$

Inertimoment for den del af armen, der er koblet til motoren, findes på samme måde, som det er fundet for hele armen tidligere. Derfor bliver kraftmoment  $\tau_{Jx}$ :

$$\tau_{Jx} = \frac{1}{3}m_x r_x^2 \hat{\theta} \tag{6.66}$$

Således mangler der kun at blive fundet et udtryk for  $F_{a \angle}$ . Dette gøres ud fra figur 6.8.



Figur 6.8: Viser den del af armen, som er koblet til flyderen, og de kræfter der virker derpå.

Figuren viser den del af armen, som er koblet til flyderen og som det ses, er samme translatoriske kræfter fra figur 6.7 indtegnet. Derudover er kraften  $F_{mm}$  også indtegnet, som virker fra massemidtpunktet. Kraften er armens (den del, der er koblet til flyderen) og flyderens inerti. Fmm peger vinkelret armen væk fra vandet. Dette skyldes, at arm og flyder vil accelereres, vinkelret armen, ned imod vandet, når motoren presser flyderen længere ned i vandet. Der kan således fortages en free-body analyse, af translatoriske kræfter vinkelret på armen, hvorved der findes et udtryk for  $F_{a \angle}$ :

$$0 = F_{a\angle} - F_{mm} - \cos\theta F_f \tag{6.67}$$

Som beskrevet er  $F_{mm}$  den kraft, der kommer fra armens og flyderens inerti og er givet ved:

$$F_{mm} = (m_f + m_a - m_x) r_m \ddot{\theta} \tag{6.69}$$

 $m_x$ : Massen af den del af armen, der er koblet til motoren [kg]

Indsættes udtryk 6.69 i udtryk 6.68, fås:

$$F_{a\angle} = \cos\theta F_f + (m_f + m_a - m_x) r_m \dot{\theta}$$
(6.70)

Der er således fundet et udtryk for henholdsvis  $\tau_m$ ,  $\tau_{Jx}$  og  $F_{a \angle}$ . Disse udtryk indsættes i

momentligningen, udtryk 6.64:

$$\tau_a = \tau_m - \tau_{Jx} - F_{a \angle} r_x \tag{6.71}$$

$$\tau_a = Nk \frac{V - kN\dot{\theta}}{R} - \frac{1}{3}m_x r_x^2 \ddot{\theta} - \left(\cos\theta F_f + (m_f + m_a - m_x)r_m\ddot{\theta}\right)r_x$$
(6.72)

$$\tau_a = \frac{Nk}{R}V - \frac{k^2 N^2}{R}\dot{\theta} - \frac{1}{3}m_x r_x^2\ddot{\theta} - (m_f + m_a - m_x)r_m r_x\ddot{\theta} - r_x\cos\theta F_f$$
(6.73)

$$\tau_a = \frac{Nk}{R} V + \left( \left( m_x - m_f - m_a \right) r_m - \frac{1}{3} m_x r_x \right) r_x \ddot{\theta} - \frac{k^2 N^2}{R} \dot{\theta} - r_x \cos \theta F_f$$
(6.74)

Leddet  $r_x \cos \theta F_f$  er tilsvarende leddet  $r_a \cos \theta F_f$  fra vinkelmodellen. Det var netop dette led, der ikke var lineært og idet det ønskes at komme frem til en lineær momentmodel, skal  $r_x \cos \theta F_f$  lineariseres. Da den eneste forskel på de to led er konstanterne  $r_x \text{ og } r_a$ , vil den lineariserede smasignalsmodel for  $r_x \cos \theta F_f$  være den samme som for  $r_a \cos \theta F_f$ , hvor der er taget hensyn til konstanterne. Derfor fås følgende:

$$r_{x}\cos\theta F_{f}^{\Delta} = \left(\cos\overline{\theta}\right)^{2} r_{a} r_{x} A \ddot{\theta}^{\Delta} + B(\cos\theta)^{2} r_{a} r_{x} \dot{\theta}^{\Delta} + \left(\cos\left(\overline{\theta}\right)^{2} r_{a} - \sin\overline{\theta}\overline{x_{k}}\right) \rho_{v} g \pi r_{k}^{2} r_{x} \theta^{\Delta} + \sin\overline{\theta} r_{x} \rho_{v} g \pi r_{k}^{2} \overline{x_{k}} \theta^{\Delta}$$

$$(6.75)$$

Udtrykket for momentet i armen (udtryk 6.74) kan således udformes som en lineær småsignalsmodel:

Idet småsignalsmodellen, udtryk 6.77, er forholdsvis u<br/>overskuelig, indføres konstanterne I, J og K. Konstanten H blev indført i vinkelmodellen:

$$H = \frac{Nk}{R} \tag{6.78}$$

$$I = -\cos(\overline{\theta})^2 r_a \rho_v g \pi r_k^2 r_x \tag{6.79}$$

$$J = -B(\cos\theta)^2 r_a r_x - \frac{k^2 N^2}{R}$$
(6.80)

$$K = \left( \left( m_x - m_f - m_a \right) r_m - \frac{1}{3} m_x r_x - \left( \cos \overline{\theta} \right)^2 r_a A \right) r_x \tag{6.81}$$

Småsignalsmodellen, udtryk 6.77, kan ved hjælp af konstanterne omskrives til:

$$\tau_a{}^\Delta = HV^\Delta + K\ddot{\theta}{}^\Delta + J\dot{\theta}{}^\Delta + I\theta^\Delta \tag{6.82}$$

Der er således fundet frem til en model for momentet i Wave Star armen.

## 6.3.1 Momentmodellens overføringsfunktion

Formålet er at finde en overføringsfunktion fra spændingen på motoren til momentet i armen, således at der kan designes en regulator med udgangspunkt deri. Derfor laplacetransformeres momentmodellen, hvilket giver:

$$\tau_a(s) = HV(s) + s^2 K\theta(s) + sJ\theta(s) + I\theta(s)$$

$$(6.83)$$

$$\tau_a(s) = HV(s) + (s^2K + sJ + I) \theta(s)$$

$$(6.84)$$

$$\frac{\tau_a(s)}{V(s)} = H + \left(s^2 K + sJ + I\right) \frac{\theta(s)}{V(s)} \tag{6.85}$$

Heraf fremgår det, at momentmodellens overføringsfunktion indeholder vinkelmodellens overføringsfunktion, som blev fundet til:

$$\frac{\theta\left(s\right)}{V\left(s\right)} = \frac{1}{\frac{G}{H}s^{2} + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$
(6.86)

Vinkelmodellens overføringsfunktion indsættes i momentmodellens overføringsfunktion og der fås:

$$\frac{\tau_a(s)}{V(s)} = H + \frac{s^2 K + sJ + I}{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$

$$(6.87)$$

$$\frac{\tau_a(s)}{V(s)} = H \frac{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}} + \frac{s^2K + sJ + I}{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$

$$(6.88)$$

$$G_m(s) = \frac{\tau_a(s)}{V(s)} = \frac{(K+G)s^2 + (J+F)s + I + E}{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$
(6.90)

Således er der fundet frem til en overføringsfunktion fra spænding på motoren til momentet i Wave Star armen. Det ses, at denne overføringsfunktion består af to poler og to nulpunkter.

## 6.4 Simuleringsmodellen

I dette afsnit opsamles modellen for vinkel og modellen for moment. Formålet med dette er, at opbygge en simuleringsmodel af Wave Star Armen, som skal benyttes til at tilpasse modellen til virkeligheden. Specielt skal simuleringsmodellen benyttes til at bestemme den adderede masse og dæmpningsfaktoren (som kommer fra, at flyderen bevæger sig i vand) eksperimentelt. Derfor opsummeres modelligningerne for vinkel (udtryk 6.91) og moment (udtryk 6.92):

$$HV^{\Delta} = G\ddot{\theta}^{\Delta} + F\dot{\theta}^{\Delta} + E\theta^{\Delta} \tag{6.91}$$

$$\tau_a{}^\Delta = HV^\Delta + K\ddot{\theta}{}^\Delta + J\dot{\theta}{}^\Delta + I\theta{}^\Delta \tag{6.92}$$

Som det ses, er modelligningerne afhængige af konstanterne: E, F, G, H, I, J og K. Derfor opsummeres også disse konstanter:

$$E = \cos\left(\overline{\theta}\right)^2 \rho_v g \pi r_k^2 r_a^2 \tag{6.93}$$

$$F = \left(B(\cos\theta)^2 r_a^2 + \frac{k^2 N^2}{R}\right) \tag{6.94}$$

$$G = \left(\frac{1}{3}m_a + m_f + \left(\cos\overline{\theta}\right)^2 A\right) r_a^2 \tag{6.95}$$

$$H = \frac{N\kappa}{R} \tag{6.96}$$

$$I = -\cos(\overline{\theta})^2 r_a \rho_v g \pi r_k^2 r_x \tag{6.97}$$

$$J = -B(\cos\theta)^2 r_a r_x - \frac{k^2 N^2}{R}$$
(6.98)

$$K = \left( \left( m_f + m_a - m_x \right) r_m - \frac{1}{3} m_x r_x - \left( \cos \overline{\theta} \right)^2 r_a A \right) r_x \tag{6.99}$$

Disse konstanter er afhængige af de fysiske konstanter fra Wave Star armen. I denne forbindelse skal der gøres opmærksom på, at motoren er en Maxon 148866 og at gearet er et Maxon 223108. Oplysninger herom er hentet fra de respektive datablade, kilde [13] for motoren og kilde [12] for gearet. De fysiske konstanter er således fundet til:

- $\overline{x_k}$ : Længden af flyderen, der er dækket af vand i arbejdspunktet, 0, 135 [m]
- $r_k$ : Radius af flyderen, 0, 135 [m]
- $r_a$ : Længden af armen, 0,500 [m]
- $r_x$ : Længde fra motor til strain gauge, 0, 410 [m]

 $r_m$ : Længde fra motor til massemidtpunktet af flyder og den del af armen, der er koblet dertil, 0, 440 [m]

- $m_f$ : Massen af flyderen, 4,500 [kg]
- $m_a$ : Massen af armen, 1,200 [kg]
- $m_x$ : Massen af den del af armen, som er koblet til motoren, 0,948 [kg]
- $\rho_v$ : Vands massefylde, 1000  $[kg/m^3]$
- g: Tyngdeaccelerationen,  $9, 82 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$
- k: Motorkonstanten,  $0,0165 \left[\frac{Nm}{A}\right]$
- N: Gearingen, 488 [-]
- *R*: Motorens interne modstand,  $0, 117 [\Omega]$
- $\theta$ : Vinkel af armen i arbejdspunktet, 0, 593 [rad]
- A: Adderet masse, ?[kg]
- B: Vandets dæmpningskoefficient, ?  $\left| \frac{Nm}{rad_{l_{\alpha}}} \right|$

Som det fremgår, er der ikke fundet nogen værdi af A og B. Værdierne af A og B vil blive

fundet eksperimentelt i afsnit 6.5.

Eftersom alle konstanterne, med undtagelse af A og B, er fundet, vil modelligningen for vinklen af Wave Star Armen blive omskrevet, således at det bliver lettere tilgængeligt at opstille et blokdiagram for simuleringsmodellen:

$$G\ddot{\theta}^{\Delta} = HV^{\Delta} - F\dot{\theta}^{\Delta} - E\theta^{\Delta} \tag{6.100}$$

Således er det nu muligt at opstille et blokdiagram for simuleringsmodellen ud fra modelligningerne 6.100 og 6.92. Blokdiagrammet kan ses på figur 6.9.



Figur 6.9: Viser det samlede blokdiagram for vinkel og momentmodellen.

Som det ses, er der opstillet et samlet blokdiagram for vinkel og momentmodellen. Pilene illustrerer signalvejene, trekanterne er forstærkninger/gains, cirklerne summerer signaler, firkanterne med integraltegn er integratorer. Det ses, at blokdiagrammet går fra inputsignal/spænding til både vinklen af Wave Star armen og momentet i armen. Det er denne model, der benyttes til at tilpasse vinkel og momentmodellen til virkeligheden.

## 6.5 Tilpasning af modellerne

I kapitlet er der indtil videre fundet frem til en model for Wave Star armens vinkel og en model for momentet i armen. Modellerne er opstillet som en samlet simuleringsmodel og i det følgende skal denne anvendes til at tilpasse modellerne til virkeligheden. Det er specielt den adderede masse og dæmpningsfaktoren, der kommer fra vandet, som er ønsket at finde. Først undersøges den adderede masse teoretisk, hvorefter både den adderede masse og dæmpningsfaktoren findes eksperimentelt ud fra diverse forsøg.

## 6.5.1 Teoretisk adderet masse

Som beskrevet undersøges den adderede masse først teoretisk - dette for, at have et udgangspunkt til når den skal findes eksperimentelt. Oplysninger i det følgende er alle fra kilde [10].

I afsnit 6.1 blev der fundet frem til, at der skal regnes med en adderet masse, hvis et legeme bevæger sig i et inkompressibelt stof. Det er antaget, at vand er inkompressibelt, hvorfor der skal regnes med en adderet masse, når flyderen bevæger sig i vandet. Der blev endvidere fundet frem til, at den adderede masse er afhængig af den frekvens, som flyderen bevæger sig med.

Den adderede masse er imidlertid, udover frekvensen, kun afhængig af størrelse og form af flyderen. Der er tidligere fundet frem til, at det er primært kugledelen af flyderen, der befinder sig i vandet i det arbejdsrum, hvor det ønskes at benytte Wave Star armen. Den adderede masse vil derfor blive undersøgt for en halvkugle, der bevæger sig i vertikal retning. Der vil ikke blive gået nærmere ind i, hvordan den adderede masse kan findes, men i stedet fokuseres der på at finde en værdi, der skal passe til flyderen.

Den adderede masse for en halvkugle sænket i vand, er givet ved:

$$A = A' \rho_v V \tag{6.101}$$

A': Adderet masse koefficient [-]  $\rho_v$ : Vands masseflyde  $[{}^{kg}\!/\!m^3]$ V: Volumen af halvkuglen  $[m^3]$ 

Det ses, at den adderede masse er givet som en funktion af: massefylden af den væske, som halvkuglen befinder sig i, volumen af halvkuglen og en adderet masse koefficient. Her er det specielt den adderede masse koefficient, der er interessant, da det er den, der ændrer sig som funktion af frekvensen. I kilde [10] er den adderede masse koefficient fundet for frekvenser, der nærmer sig nul og for frekvenser, der nærmer sig uendelig. Den adderede masse koefficient er fundet med fire forskellige approksimationer, hvor den for frekvenser, der nærmer sig nul er 0.8-0.83[kg] og for frekvenser, der nærmer sig uendelig er masse koefficienten 0.4-0.5[kg].

Wave Star armen er tiltænkt at skulle arbejde i frekvensspektret 0, 5 - 0, 9[rad/s], hvilket normalt betragtes som en meget lille frekvens. Men derfor kan der alligevel ikke regnes med, at der kan benyttes den adderede masse koefficient for frekvenser, der nærmer sig nul. Dette skyldes, at en hvilken som helst frekvens altid vil ligge uendeligt langt væk fra både uendelig og nul. Derfor beregnes den adderede masse for begge grænsetilfælde:

$$A_{\omega \to 0} = A'_{\omega \to 0} p V = 4,28 \, [kg] \tag{6.102}$$

$$A_{\omega \to \infty} = A'_{\omega \to \infty} pV = 2,06 \, [kg] \tag{6.103}$$

Det ses, at den teoretiske adderede masse for flyderen vil være 2,06 - 4,28[kg]. Idet den reelle masse fra armen og flyder er 5,7[kg], vil den adderede masse teoretisk have en betydelig indflydelse på modellen af Wave Star armens vinkel og modellen af momentet i armen. Til gengæld vil der højest sandsynligt ikke kunne ses variation af den adderede masse som funktion af frekvensen. Dette skyldes, at Wave Star armens frekvensspekter er meget smalt og at den adderede masse kun ca. halveres, når frekvensen går fra nul til uendelig. Således er der fundet et udgangspunkt for værdien af den adderede masse, som kan benyttes til at tilpasse simuleringsmodellen til virkeligheden.

## 6.5.2 Praktisk tilpasning af modellerne

I det følgende vil modellerne for vinklen af Wave Star armen og momentet i armen blive tilpasset virkeligheden efter målinger. Det er specielt den adderede masse og dæmpningen fra vandet, der ønskes at findes. Først undersøges det, om Wave Star armen i praksis opfører sig lineært ved små signaler. Derefter tilpasses modellerne ud fra stepresponsen.

Det var oprindeligt meningen at finde den adderede masse og dæmpningen fra vandet til forskellige frekvenser i frekvensbåndet 0.5-0.9[rad/s]. Da der er to variable, ville det være nødvendigt at foretage tilpasningen ud fra to forskellige frekvenser. Ideen var således at finde den adderede masse og dæmpningen ud fra et sinusinputsignal på 0.5[rad/s] og 0.6[rad/s], 0.6[rad/s] og 0.7[rad/s] og så videre. Men idet der viste sig at være adskillige betydelige fejlkilder ved forsøgene, ville det ikke give et brugbart resultat. Derfor er der nøjes med at tilpasse den adderede masse og dæmpningen ud fra stepresponsen af systemet, og derefter undersøges det, om resultaterne også kan benyttes i forhold til frekvensbåndet 0.5-0.9[rad/s].

Til alle test er der dog kun målt vinklen af Wave Star armen, idet det viste sig, at strain gaugen ikke virkede efter hensigten. Dette er yderligere beskrevet i afsnit 8.3. Alligevel burde det være muligt at tilpasse momentmodellen i en hvis grad, da de mest usikre elementer (adderet masse og dæmpning) også indgår i vinkelmodellen.

## Test af linearitet

Som beskrevet, ønskes det først at teste om Wave Star armen reagerer nogenlunde lineært på små signaler i det frekvensspektrum, som der ønskes at arbejde med. Derfor er Wave Star armens motor blevet påtrykket en sinusspænding med en amplitude på 0,77[V] og med en frekvens på 1[rad/s]. Resultatet heraf kan ses på figur 6.10. Forsøgets målejournal kan læses i appendiks A.1.



Figur 6.10: Viser resultatet af at påtrykke Wave Star armens motor en 1[rad/s] sinusspænding med en amplitude op 0,77[V]. Spændingen er divideret med 20, således at amplituden er i samme størrelsesorden som vinklen.

Læg mærke til, at spændingen er divideret med 20, således at amplituden er i samme størrelsesorden som vinklen. Som det ses af figuren, er vinklen ikke helt sinusformet, hvilket betyder, at Wave Star armen ikke reagerer helt lineært på små signaler. Det ses desuden, at det virker som om, at vinklen følger en sinuskurve, blot at toppene er afskåret. De afskårede toppe skyldes sandsynligvis, at der er statisk og tørfriktion i Wave Star armen. Det kan se ud til, at Wave Star armens tørfriktion overvinder motormomentet og at armen derfor stopper med at bevæge sig. Endvidere ses det af figuren, at armen først begynder at bevæge sig væk fra toppunktet længe efter, at motormomentet begynder at falde. Dette kan tyde på, at motormoment skal overvinde Wave Star armens statiske friktion, før den igen begynder at bevæge sig.

Det ses også af figuren, at der er en betydelig faseforskydning mellem spænding og vinkel. Dette kan skyldes, at systemet indeholder en pol i nærheden af den testede frekvens. Men forskydelsen kan også forklares med årsagen til de afskårede toppe. Nemlig, at systemets statiske friktion først skal overvindes, før armen begynder at flytte sig.

Hvis det er tør og statisk friktion, der er grunden til, at Wave Star armen ikke opfører sig lineært, kan styresignalet korrigeres, således at det tager højde for friktionen. Hvis det er dette, der gør sig gældende, forventes Wave Star armen at reagere lineært efter en sinuskurve på det korrigerede styresignal. For at kunne korrigere for friktionen, er grundsinussignalet adderet med et pulssignal, der svinger omkring 0[V]. Pulssignalet har samme "frekvens" som sinussignalet og skifter fortegn kort efter, at en sinustop er nået. På den måde er der taget højde for den statiske friktion, idet bevægelsen af Wave Star armen burde skifte retning, når pulssignalet skifter retning. Det antages, at det adderede pulssignal også eliminerer tørfriktionen.

Wave Star armen er således blevet testet med ovenstående korrigerede signal. Resultatet



heraf ses på figur 6.11 og målejournalen findes i appendiks A.1.

Figur 6.11: Viser resultatet af, at påtrykke Wave Star armens motor en 1[rad/s] sinusspænding med en amplitude på 0,77[V] adderet med et pulssignal. Spændingen er divideret med 20, således at amplituden er i samme størrelsesorden som vinklen.

Det ses af figuren, at vinklen af Wave Star armen er meget tæt på at følge en sinuskurve. Det antages derfor, at det var tør og statisk friktion, der var grunden til ulineariteten. Forsøget viste, at pulssignalets amplitude skal være på 0,38[V], hvorved det samlede signals amplituder bliver på 1,05[V]. Det er denne amplitude, der vil blive taget udgangspunkt i ved senere sammenligninger med den opstillede model.

#### Steptest

Efter, at det har vist sig, at Wave Star armen reagerer nogenlunde lineær i det ønskede frekvensområde, er det nu hensigten at tilpasse modellerne. Modellerne vil blive tilpasset ud fra den målte steprespons af systemet. Det er vigtigt, at den målte steprespons ikke arbejder uden for det område, hvor modellerne forventes at virke. Derfor skal der sørges for, at flyderen ikke presses helt under vandet eller hæves over vandoverfladen. På figur 6.12 ses den målte steprespons for, når der påtrykkes en spænding på 0,77[V], som tilsvarer, at flyderen top ca. flugter vandoverfladen. Målejournalen for forsøget kan læses i appendiks A.1.



Figur 6.12: Viser stepresponsen, både den målte og den simulerede (fra modellen). Stepresponsen er ud fra, at der er blevet påtrykket en spænding på 0,77[V].

Figuren viser også stepresponsen for den opstillede model, hvor den adderede masse er sat til 4[kg] og dæmpningen er sat til 210[Nm/rad/s]. Det ses, at stepresponsen for modellen ikke ligger i nærheden af den målte. Det ses, at slutværdien for modellen vil være væsentlig større end for det målte. Endvidere ses det, at resultatet fra modellen ændrer vinkel betydeligt hurtigere end det målte. Dette kan justeres ved at ændre på de led, der er afhængige af vinkelhastigheden og vinkelaccelerationen, altså den adderede masse og dæmpningen. Men så længe, at "DC-værdien" er så forskellig, vil det ikke give mening at ændre på disse led, da dette også kan have indvirkning.

Derfor ønskes det først at finde årsagen til, hvorfor de to kurves slutværdi er så forskellig. Under forsøgene med at påtrykke en sinusspænding på Wave Star armen viste det sig, at vinklen nogle gange hoppede. Med dette menes der, at selv om det var den samme sinusspænding, der blev påtrykt, kunne toppunkterne for den målte vinkel godt ligge forskellige steder. Grunden er sandsynligvis, at Wave Star armen har et vist slør, og at vinklen derfor også er afhængig af, hvor armen befinder sig i sløret. En anden årsag kan være, at der under testen dannes bølger i karet og at de kan bidrage til resultatet. Men i forhold til et step, hvor der ingen bølger er til at starte med, vil dette ikke have nogen effekt i forhold til forskellen på slutværdierne. Derfor undersøges sløret i Wave Star armen. For at finde ud af, hvor meget slør der er i systemet, blev der implementeret en testregulator, hvis formål var at holde en bestemt vinkel. Derefter blev armen flyttet fysisk så langt som muligt uden at vinklen ændrede sig. Dette viste, at der var et slør på op til 8[cm] i vertikal retning. Dette er et stort problem, da det stort set er hele det område, Wave Star armen skal arbejde i. Det skal dog nævnes, at sløret kom forskellige steder fra (noget fra gear, noget fra kobling og noget fra lejrene), og at der var stor forskel på, hvor stor en kraft, der skulle til for at bevæge armen ud i sløret. Wave Star armen er endvidere forsøgt forbedret, således at sløret er blevet reduceret betydeligt.

Det kan alligevel stadig formodes, at responsen for et step ligeledes kan give forskellige

resultater. Derfor er Wave Star armen blevet forsynet med en pulsspænding med en amplitude på 0,68[V]. Pulslængden er tilstrækkelig lang til, at det kan betragtes som en række steps efter hinanden. Resultatet for forsøget ses på figur 6.13 og målejournalen findes i appendiks A.1.



Figur 6.13: Viser den målte vinkel for, hvor Wave Star armen er blevet påtrykket et pulssignal med en amplitude på 0,68[V].

Det ses af figuren, at vinklen varierer til trods for, at det er de samme "steps", der påtrykkes på Wave Star armen. Dette kan tyde på, at der er forskel på, hvor armen befinder sig i sløret. Men det ses også, at denne fejlkilde er så lille, at den ikke kommer i nærheden af at kunne forklare forskellen på stepresponsen fra modellen og den målte. Derfor må der være en anden fejlkilde.

Der er blevet testet forskellige fejlkilder, der er mere eller mindre sandsynlige, men intet har kunnet forklare fejlen. Derfor blev der til sidst sat spørgsmålstegn ved de data, der er opgivet for DC-motoren, [13]. Det hænger nemlig sammen således, at Wave Star armen bevæger sig for meget ifølge modellen i forhold til det målte. Det, der får Wave Star armen til at flytte, sig er motoren, så hvis den ikke er lige så kraftig, som angivet, vil det kunne forklare forskellen i resultaterne (da motoren ifølge modellen er så kraftig, som den er opgivet til). Derfor er det ønsket at måle, hvor kraftig motoren er, altså hvor stor den indre modstand er og værdien af motorkonstanten. Motorkonstanten kan findes ud fra motorens momentligning ved at sætte vinkelhastigheden til nul:

$$\tau_m = Nk \frac{V - kN\dot{\theta}}{R} \tag{6.104}$$

$$\tau_m|_{\dot{\theta}=0} = Nk \frac{V}{R} \tag{6.105}$$

$$k = \frac{\tau_m R}{NV} \tag{6.106}$$

Det ses, at det først er nødvendigt at finde motorens egen modstand for at kunne finde motorkonstanten. Dette kan gøres ud fra motorens elektriske ligning, hvor vinkelhastigheden sættes til nul:

$$I = \frac{V - kN\dot{\theta}}{R} \tag{6.107}$$

$$I|_{\dot{\theta}=0} = \frac{V}{R} \tag{6.108}$$

$$R = \frac{V}{I} \tag{6.109}$$

Således kan motorens modstand findes ved at fiksere Wave Star armen og måle strøm og spænding. Dette er blevet gjort ved forskellige spændinger og resultatet ses i tabel 6.1. Målejournalen findes i appendiks A.2.

Spænding	Strøm	Beregnet modstand
[V]	[A]	[Ohm]
0,77	0,84	0,92
1,22	$1,\!85$	0,66
1,66	3,75	0,44
2,1	4,9	0,43
2,3	$5,\!6$	0,41
2,5	6,8	0,37

Tabel 6.1: Viser resultaterne for målingen af motorens modstand.

Det ses, at modstanden får forskellige værdier, men alle ligger over de opgivet  $0,117[\Omega]$ , hvilket resulterer i, at motormoment vil blive mindre. Grunden til de forskellige værdier af modstanden kan være, at motorens induktans også giver et bidrag. Men idet resultaterne først er noteret, idet de har stabiliseret sig (hvor der kan regnes med en DC-værdi), skulle induktansen ingen indflydelse have. Det kan derfor konkluderes, at motoren højest sandsynligt ikke opfører sig lineært.

Eftersom modstanden er blevet målt, er det nu muligt at måle motorkonstanten. Motorkonstanten kan findes ved at fiksere Wave Star armen og måle motormomentet til en bestemt spænding. Der er fortaget et antal af forsøg og det gennemsnitlige motormoment er udregnet. Målejournalen findes i appendiks A.2. Motorkonstanten er beregnet ud fra den gennemsnitlige modstand på  $0.54[\Omega]$  og resultatet ses i tabel 6.2.

Spænding	Gennemsnitlig moment	Beregnet motorkonstant
[V]	[Nm]	[Nm/A]
0,27	2,11	0,0087
0,51	5,06	0,0110
0,78	6,78	0,0096
1,00	8,94	0,0099
1,22	13,01	0,0118
1,39	16,60	0,0132
1,65	23,08	0,0155
1,89	24,55	0,0144
2,07	28,23	0,0151
2,25	31,62	0,0156
2,40	38,79	0,0179
2,60	40,75	0,0173

Tabel 6.2: Viser resultaterne for målingen af motorkonstanten.

Det ses, at motorkonstanten generelt er stigende i takt med, at spændingen stiger. Det tyder altså på, at motoren ikke opfører sig lineært, men bliver stærkere og stærkere (mere end den burde) i takt med, at spændingen stiger. Dette kan både skyldes motoren, men også tab i gear og resten af konstruktionen, idet målingerne er fortaget på armen og ikke på motoren. Resultaterne giver i denne sammenhæng et udtryk for hvilket motormoment der virker i armen, og ikke i motoren. Det ses endvidere, at motorkonstanten er lavere for lave spændinger, end den opgivede på 0,0163[Nm/A]. Idet stepresponsen er blevet målt ved 0,77[V] (hvilket betragtes som en lav spænding), vil dette også bidrage til at kunne forklare fejlen mellem model og det målte.

Det kan således konkluderes, at motoren er betydeligt mindre kraftig, end det er opgivet i databladet, gældende det område, hvor der er fortaget målinger. Derfor kan der igen forsøges at korrigere modellen efter målingerne. Der skal således tages udgangspunkt i den modstand og motorkonstant, der er målt, ved den spænding som steppet har. Der er således målt en steprespons for 0,77[V] (figur 6.14 (A)) og -1,00[V] (figur 6.14 (B)) for Wave Star armen. Derefter er modellen blevet tilpasset til bedste kompromis ved at justere på modstanden, motorkonstanten, den adderede masse og dæmpningen fra vandet. Resultatet ses på figur 6.14 og målejournalen findes i appendiks A.1.



Figur 6.14: (A) Viser det målte steprespons og resultatet fra den korrigerede model til 0,77[V]. (B) Viser det målte steprespons og resultatet fra den korrigerede model til - 1,00[V].

Det ses, at Wave Star armen stadig bevæger sig for meget i forhold til det målte. Årsagen hertil vurderes til at være den tidligere omtalte tørfriktion, som ikke er taget med i modellen. Desuden ses det, at risetime'en ikke stemmer overens med modellen. Idet den modellerede risetime er for langsom til (A) og for hurtig til (B), måtte der indgås et kompromis mellem de to stepresponse. Det bedste kompromis ses på figuren og giver følgende:

$$R = 0,91\,[\Omega] \tag{6.110}$$

$$k = 0,0103 \left[\frac{Nm}{A}\right] \tag{6.111}$$

$$A = 4,00\,[kg] \tag{6.112}$$

$$B = 210 \left\lfloor \frac{Nm}{rad/s} \right\rfloor \tag{6.113}$$

Det kan således konkluderes, at motoren teoretisk er ca. 10 gange stærkere end i praksis. Endvidere blev den adderede masse eksperimentelt fastsat til 4,00[kg], hvilket ligger inden for det område, som der teoretisk blev fundet frem til (2,06[kg]-4,28[kg]).

#### Sinussignaler og model

Oprindeligt var det meningen eksperimentelt at finde den adderede masse og dæmpningen fra vandet som en funktion af frekvensen i området 0.5-0.9[rad/s]. Men på grund af de mange fejlkilder, der er blevet fundet, vurderes det, at det ikke vil kunne udlede noget brugbart. I stedet er der fortaget målinger af, hvordan Wave Star armen reagerer på korrigerede sinussignaler (med adderet pulssignal) i frekvensspektret. Formålet med dette er at vurdere om den fundne model, i sammenspil med de fundne konstanter, er i nogenlunde overensstemmelse med virkeligheden. Det er vigtigt, at modellen til en vis grad stemmer overens med måleresultaterne for sinussignalerne, da det er denne type af signaler, som Wave Star armen skal forsynes med.

Alle målingerne er fortaget med et korrigeret sinussignal med en amplitude på 1,05[V]

(inklusiv pulssignalet) og målejournalen ses i appendiks A.1. Først vurderes resultat og model ud fra et signal med frekvensen 1,00[rad/s]. Resultatet heraf ses på figur 6.15.



Figur 6.15: Den røde kurve viser måleresultatet af at påtrykke Wave Star armen en korrigeret sinusspænding med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 1,00[rad/s]. Den sorte kurve viser samme resultat, blot fra modellen, som er påtrykket en normal sinusspænding med samme amplitude og frekvens.

Som det ses af figuren, stemmer måleresultat og simulering af modellen stort ses fuldkommen overens. Der vil altså ingen problem være i at benytte modellen ved denne type af signal.

Herefter er det testet, hvordan Wave Star armen reagerer på en korrigeret sinus med en frekvens på 0.83[rad/s]. Dette er sammenlignet med, hvordan modellen reagerer på denne frekvens. Resultatet ses på figur 6.16.



Figur 6.16: Den røde kurve viser måleresultatet af at påtrykke Wave Star armen en korrigeret sinusspænding med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,83[rad/s]. Den sorte kurve viser samme resultat, blot fra modellen, som er påtrykket en normal sinusspænding med samme amplitude og frekvens.

Igen ses det, at model og måleresultater stemmer fint overens. Dog giver modellen et lidt større udslag i vinklen, end det målte. Fejlen er dog så lille, at den ikke anses for at have nogen betydning.

Således er der fortsat med at fortage samme test, bolt med frekvensen 0.69[rad/s]. Resultatet ses på figur 6.17.



Figur 6.17: Den røde kurve viser måleresultatet af at påtrykke Wave Star armen en korrigeret sinusspænding med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,69[rad/s]. Den sorte kurve viser samme resultat, blot fra modellen, som er påtrykket en normal sinusspænding med samme amplitude og frekvens.

Det ses, at ved 0.69[rad/s] er der en større afvigelse mellem model og måleresultat end

ved 1[rad/s] og 0.83[rad/s]. Modellen giver større udslag i vinklen end det målte. Dog er forskellen ikke større end, at den kan accepteres.

Der kan således fortsættes med at udføre testen med en frekvens på 0.58[rad/s]. Resultatet heraf ses på figur 6.18.



Figur 6.18: Den røde kurve viser måleresultatet af at påtrykke Wave Star armen en korrigeret sinusspænding med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,58[rad/s]. Den sorte kurve viser samme resultat, blot fra modellen, som er påtrykket en normal sinusspænding med samme amplitude og frekvens.

Ved 0.58[rad/s] stemmer model og måleresultat igen godt overens. Det ses dog, at den målte vinkel flader ud i sinus top og bund, hvilket tyder på, at der kunne være fortaget en bedre korrektion af styresignalet. Der lægges dog mærke til, at model og virkelighed hænger tæt sammen, hvorfor at resultatet accepteres.

Sidst er testen fortaget med en frekvens på 0.48 [rad/s] og resultatet ses på figur 6.19.



Figur 6.19: Den røde kurve viser måleresultatet af at påtrykke Wave Star armen en korrigeret sinusspænding med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,48[rad/s]. Den sorte kurve viser samme resultat, blot fra modellen, som er påtrykket en normal sinusspænding med samme amplitude og frekvens.

Det fremgår, at også sidste måling stemmer godt overens med modellen. Derfor vurderes det, at modellen med de fundne konstanter er en god beskrivelse af virkeligheden.

# 6.6 De endelige modeller og overføringsfunktioner

I afsnit 6.2 og 6.3 blev der fundet frem til en model for Wave Star armens vinkel og en model for momentet i armen samt overføringsfunktionerne deraf. Modellerne og overføringsfunktionerne viste sig at være afhængige af de sammensatte konstanter E, F, G,H, I, J og K. Eftersom modellerne er blevet tilpasset virkeligheden ud fra måleresultater, er det nu muligt at fastsætte de sammensatte konstanter til:

$$E = 96,61 \tag{6.114}$$

$$F = 63,84$$
 (6.115)

$$G = 1,91$$
 (6.116)

$$H = 5,52$$
 (6.117)

$$I = -79,22 \tag{6.118}$$

$$J = -57,35 \tag{6.119}$$

$$K = -1,47 \tag{6.120}$$

Modellen for vinklen af Wave Star armen bliver således:

$$5,52V^{\Delta} = 1,91\ddot{\theta}^{\Delta} + 63,84\dot{\theta}^{\Delta} + 96,61\theta^{\Delta}$$
(6.122)

Og overføringsfunktionen bliver:

$$G_{v}(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{1}{\frac{G}{H}s^{2} + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$

$$\downarrow \qquad (6.123)$$

$$G_v(s) = \frac{1}{0,346s^2 + 11,56s + 17,49}$$
(6.124)

Modellen for momentet i Wave Star armen kan på samme måde udregnes til:

$$\tau_a{}^{\Delta} = 5,52V^{\Delta} - 1,47\ddot{\theta}^{\Delta} - 57,35\dot{\theta}^{\Delta} - 79,22\theta^{\Delta}$$
(6.126)

Hvorved overføringsfunktionen bliver:

$$G_m(s) = \frac{\tau_a(s)}{V(s)} = \frac{(K+G)s^2 + (J+F)s + I + E}{\frac{G}{H}s^2 + \frac{F}{H}s + \frac{E}{H}}$$
(6.127)  
$$\Downarrow$$

$$G_m(s) = \frac{0,44s^2 + 6,50s + 17,39}{0,346s^2 + 11,56s + 17,49}$$
(6.128)

Således er der, som tilstræbt, fundet frem til en overføringsfunktion fra spænding på motoren til vinkel af armen og fra spænding på motoren til momentet i armen. Det er ud fra disse overføringsfunktioner, at reguleringerne vil blive designet.

# KAPITEL 7 DELKONKLUSION - ANALYSE

I analysen findes grundlag for at udvikle en regulator til regulering af Wave Star armens vinkel og at udvikle en regulator til regulering af momentet i Wave Star armen.

I analysen blev Wave Star Energy projektet undersøgt og der blev fundet frem til, at projektet er baseret på en grundliggende idé om at skabe en vedvarende stabil og jævn energikilde ved hjælp af bølgerne i havet. Der blev endvidere fundet ud af, at projektet har massiv opbakning i form af en stærk aktionær, der også kan bidrage til konstruktionen af Wave Star Energy maskinen. Wave Star Energy maskinen er i den sidste udviklingsfase og er på trapperne til at blive kommercialiseret som et produkt på markedet. Fremtidsperspektivet med maskinen er stort og der regnes med, at maskinen kan komme til at konkurrere med de store havvindmøller. Det kan konkluderes, at Wave Star Energy projektet er en vedvarende energikilde med gode fremtidsudsigter.

I dette projekt arbejdes der dog ikke direkte med Wave Star Energy maskinen, men med en miniaturemodel: Wave Star armen. I analysen blev opbygningen af bølger i havet undersøgt og der viste sig, at det var flere forskellige typer af bølger. Undersøgelsen viste, at Wave Star Energy maskinens princip passer bedst til ensartede bølger, som forekommer forholdsvist tæt på kysten. Bølgerne i dette område er ikke homogene, men har nogle fællestræk. Konkluderende på dette er der opstillet nogle krav til, hvordan Wave Star armen skal kunne styres, således at der kan trækkes mest mulig energi ud af bølgerne.

Sidst i analysen blev der opstillet en matematisk model for vinklen og for momentet i Wave Star armen. Modellerne bliv lineariseret og der blev fundet frem til to overføringsfunktioner. I modellerne blev der medtaget de hydrokræfter, som virker på flyderen. I den forbindelse viste det sig, at hydrokræfterne er afhængige af bølgernes frekvens. Dette kan være et problem, da modellerne således vil ændre sig, hvis der arbejdes med forskellige frekvenser, hvilket der er blevet. Ud fra målinger viste det sig, at hydrokræfterne kan beskrives med konstanter i det frekvensspektre, som der arbejdes med i dette projekt.

Modellerne blev tilpasset virkeligheden ud fra måleresultater. Dette afslørede, at modellerne og virkeligheden lå langt fra hinanden. Efter en større undersøgelse af afvigelsen viste det sig, at det var dataene for motoren, der var problemet. Der blev derfor korrigeret for dette og det resulterede i, at modellen kom til at stemme overens med virkeligheden. Det kan konkluderes, at der på trods af, at hydrokræfterne er frekvensvariable, er opstillet en model, som fint beskriver virkeligheden i det arbejdsrum, Wave Star armen er tiltænkt. Modellen kan således benyttes til at udvikle de to regulatorer.

# Del II Udvikling

# Struktur af Udvikling

Følgende afsnit er et strukturafsnit for Udvikling (del II). Denne del består af fire kapitler: Implementering af terminalen og Wave Star armen (kapitel 8), Regulering af vinkel (kapitel 9), Regulering af moment (kapitel 10) og Delkonklusion - Udvikling (kapitel 11).

Det første kapitel i Udviklingen, kapitel 8 (Implementering af terminalen og Wave Star armen), omhandler, hvordan terminalen og Wave Star armen er implementeret. Med hensyn til terminalen gennemgås, hvordan en computer er opsat til at afvikle realtidsprogrammer i Linux. Endvidere forklares, hvordan der kan programmeres direkte fra Simulink og hvordan data fra målinger kan fremvises. Med hensyn til Wave Star armen gennemgås, hvordan transducere og aktuator virker.

Kapitel 9 og 10 (Regulering af vinkel og Regulering af moment) har samme struktur. I begge kapitler gennemgås reguleringssløjfen, hvorefter kravene til regulatorerne opsamles og opstilles. Kravene bliver omsat til krav til frekvensresponsen. Således kan regulatorerne designes efter frekvensrespons-designmetoden. Regulatorerne designes primært ud fra åbensløjfefrekvensresponsen og til sidst undersøges det, om kravene fra kapitel 5 er overholdt ud fra frekvensresponsen af lukketsløjfen.

Det sidste kapitel i denne del er kapitel 11 (Delkonklusion - Udvikling). I kapitlet opsummeres, hvad der er fundet frem til i Udviklingen og der bliver konkluderet på de resultater, der er fundet frem til.

KAPITEL 8

# IMPLEMENTERING AF TERMINALEN OG WAVE STAR ARMEN

Dette kapitel omhandler blandt andet, hvordan terminalen implementeres. I kapitel 4 blev der fundet frem til, at det er terminalen, der skal regulere vinkel og moment. Endvidere er det terminalen, der skal kunne ændre reguleringer og fremvise relevante måledata. Endvidere indeholder dette kapitel, hvordan terminalen måler vinkel og moment samt hvordan terminalen aktuerer Wave Star armen.

## 8.1 Terminalen

Som beskrevet er det terminalen, der skal styre Wave Star armen. Terminalen implementeres på en computer. For at sikre, at terminalen kan arbejde i realtid, er der installeret RTAI (RealTime Application Interface). RTAI er en udvidelse af Linux, der sikrer, at styresystemet prioriterer tråde med realtidskrav højest. [18]

For at kunne generere den kode, der skal køre på terminalen, benyttes RTAI-lab, som blandt andet kan kompilere realtidskode til RTAI. Endvidere indeholder RTAI-lab en monitor, som er et program, der kan overvåge, hvad der sker og kan ændre parametre under kørsel af et program i RTAI. RTAI-lab kan implementeres i Simulinks RTW (Real-Time Workshop), således at blokdiagrammer opstillet i Simulink kan kompileres direkte til programmer, der kan køres i RTAI. Derved kan alle funktioner i Simulink benyttes. Således kan RTAI-lab monitoren også ændre parametre fra det opstillede blokdiagram fra Simulink [19]. På figur 8.1 ses et eksempel på, hvordan RTAI-lab monitorprogrammet benyttes til at overvåge vinklen af Wave Star armen ved hjælp en "SCOPE-funktion.



Figur 8.1: Viser RTAI-lab monitoren, hvor vinklen af Wave Star armen overvåges med et scope.

På denne måde er det sikret, at terminalen kan regulere, ændre parametre samt vise og opsamle data. Men for at opsamle måledata og aktuere er det nødvendigt, at terminalen har et link til den analoge verden. Dette sikres med et I/O kort DAQ PCI6024E fra National Instruments. I/O kortet tilsluttes gennem en af computerens PCI porte. I/O kortet indeholder 16 ADC kanaler, 2 DAC kanaler, 8 digitale I/O og et 64 kanals tilslutningsprint. For at få I/O kortet til at arbejde sammen med RTAI er der installeret en driverpakke ved navn COMEDI, som understøtter DAQ PCI6024E. Denne driverpakke tilføjer endvidere nogle I/O blokke til Simulink, således at kortet kan benyttes direkte af programmet kompileret i Simulink. [17] [9]

Der er på denne måde sammensat en terminal, der i realtid kan regulere Wave Star armen, fremvise relevante data og ændre parametre. For at give et bedre overblik af terminalens opsætning, betragtes figur 8.2.



Figur 8.2: Viser opsætningen af terminalen.

Opsummeret ses det af figuren, at RTW i Simulink er opsat, så den indeholder elementer fra både COMEDI og RTAI-lab. På den måde kan blokdiagrammer, der indeholder I/O

funktioner, kompileres til programmer, der kan køres i RTAI. Et program kan således afvikles i RTAI, som også har forbindelse til I/O kortet gennem driverpakken COMIDI. Sidst kan RTAI-lab monitoren udveksle data med det kørende program.

# 8.2 Måling af vinklen

For at kunne tilbagekoble reguleringssløjfen til regulering af Wave Star armens vinkel er det nødvendigt at kunne måle den aktuelle vinkel. På Wave Star armens motor er der implementeret en encoder, der kan måle vinklen/positionen af motoren. Encoderen er af typen Maxon 228856 og giver 1000 digitale pulser pr. omgang [14]. Derudover har encoderen en digital udgang, der indikerer, hvilkn vej motoren drejer [14]. Idet der er en gearing fra armen til motoren på 1:488, giver encoderen 480.000 pulser pr. omgang af armen.

For at kunne måle vinklen er der fra anden side udviklet et tilhørende tællerkredsløb. Tællerkredsløbet består af en 12 bit tæller, som kan tælle både op og ned afhængigt af, hvilken vej encoderen indikerer, at motoren kører. Tællerkredsløbet kan maksimalt tælle op til 4095 pulser, før det får et overflow. Dette tilsvarer, at armen kan ændre sig maksimalt 3,02°, før der kommer et overflov fra tællerkredsløbet. Imidlertid kan tællerkredsløbet ikke indikere et overflov på anden måde end, at tællerens værdi går fra 4095 til 0 eller omvendt. Derfor er det nødvendigt softwaremæssigt at detektere dette overflov. Endvidere vil vinklen altid starte med at være nul (uanset den aktuelle vinkel af armen), idet encoderen kun indikerer, når den drejes og ikke dens absolutte vinkel.

Det overordnede flowchart for den funktion, der finder Wave Star armens aktuelle vinkel i forhold til start vinklen, ses på figur 8.3.



Figur 8.3: Viser det overordnede flowchart for programmet, der finder vinklen af Wave Star armen.

Tællerkredsløbet er koblet til I/O kortet, således tællerens værdi kan samples af terminalen. Programmet starter i henhold til flowchartet med at sample tællerværdien. Herefter undersøges det, om der har været et overflow. Da tællerkredsløbet ikke indikerer, at der har været et overflow, detekteres overflowet ved at undersøge, om ændringen i tællerværdien i forhold til sidste sampling er over halvdelen af tællerens maksimale værdi. Hvis dette er gældende, antages det, at der har været et overflow. Hvis armen ændrer sin vinkel meget siden forrige sample, kan der opstå den fejl, at softwaren tror, at der har været et overflow, selvom det ikke er tilfældet. Idet der samples med 200[Hz], skal armen ændre sin vinkel med ca.  $300[^{\circ}/s]$ , hvilket ikke er sandsynligt. Derfor ses der bort fra, at denne fejlkilde kan opstå.

Hvis der har været et overflow, tages der højde for dette i beregningen af den nye vinkel. Den nye vinkel beregnes ud fra, hvilken vej encoderen drejer, ændringen i tællerværdien og den gamle vinkel. Sidst gemmes den nye vinkel og funktionen afsluttes. Hvis ikke der har været et overflov, beregnes den nye vinkel direkte ud fra, hvilken vej encoderen drejer, ændringen i tællerværdien og den gamle vinkel, hvorefter vinklen gemmes. Hvis ikke der er en gammel vinkelværdi (i det tilfælde, hvor Wave Star armen lige er opstartet), benyttes nul som den gamle vinkel.

Programmet kan således kun finde ændringen i vinklen i forhold til udgangspunktet, hvor programmet startes. Dette er imidlertid ikke noget problem, da modellen i kapitel 6 er lineariseret og tager udgangspunkt i ændringen fra arbejdspunktet. Sidst skal det nævnes, at funktionen udregner vinklen i [rad], hvilket medfører, at tilbagekoblingen er én, hvis der ikke regnes med en tidsforsinkelse (hvilket der ikke bliver).

# 8.3 Måling af moment

Der er fra anden side også implementeret en strain gauge på Wave Star armen, således at det er muligt at måle momentet i armen. Der er fra anden side også udviklet et biaskredsløb, som kobler strain gaugen op.

En strain gauge fungerer i princippet ved, at den ændrer sin modstand i takt med, at den bøjes. På den måde fås der et udtryk for momentet i armen som funktion af, at armen og dermed strain gaugen bøjer. Strain gaugen er således opstat i et bias, således at kredsløbet giver en spænding svarende til, hvor meget strain gaugen er bøjet (hvor stort momentet er i armen). Ved hjælp af biaset giver strain gaugen en spænding, der svinger lineært omkring 2,5[V], alt afhængig af momentet. Det er således simpelt at opstille en funktion, der kan måle momentet. Dette gøres ved at sample spændingen, fratrække de 2,5[V] og multiplicere resultatet med en faktor, der omregner spændingen til momentet i armen.

Der er dog begået den fejl at vælge en strain gauge, hvis modstand, som udover at være afhængig af, hvor meget den bøjes, er afhængig af luftfugtigheden. Idet Wave Star armen arbejder i vand, er dette ikke hensigtsmæssigt. Hvis det alligevel forsøges at måle momentet, er resultatet meget usikkert og har store udsving. Hvis der endvidere kommer bare en dråbe vand på strain gaugen, giver strain gaugen i samarbejde med biaset, fuld udslag (til forsyningsspændingen), hvilket svarer til et meget stort moment, som i virkeligheden ikke er der.

Det er forsøgt at rette op på fejlen ved at isolere strain gaugen med blandt andet silikone, tape og lak, men intet har kunnet fjerne fejlen. Derfor er det opgivet at fortage målinger af momentet i Wave Star armen. Dette er også årsagen til, at modellerne i kapitel 6 kun blev tilpasset virkeligheden ud fra målinger af vinklen. Endvidere medfører det, at regulatoren fra kapitel 10 (Regulering af moment) kun kan udvikles teoretisk og ikke kan afprøves i praksis i accepttesten, kapitel 12.

# 8.4 Effektforstærker

Når terminalen skal aktuere Wave Star armen, sker dette ved at sende et styresignal fra I/O kortet til en effektforstærker. Effektforstærkeren forsyner således Wave Star armens motor som ønsket. Effektforstærkeren er fra Aalborg Universitet og har AAU nr. 06069. Effektforstærkeren er en klasse AB forstærker og virker i alle fire kvadranter, således at den både kan afsætte og modtage energi fra motoren. Effektforstærkeren har endvidere en spændingsforstærkning på 2,8 gange og et maksimalt strømtræk på 10[A]. Derfor vil effektforstærkeren komme til at indgå i reguleringssløjfen som et gain på 2,8 mellem regulator og systemet.

I dette kapitel designes regulatoren til regulering af Wave Star amens vinkel. Kapitlet er delt op i to afsnit, hvor der i det første genopsættes reguleringssløjfen med de elementer, der er fundet frem til gennem projektrapporten. Herefter opsamles de krav, der er til reguleringen, som ligger til baggrund for det efterfølgende design. I det andet afsnit designes selve regulatoren. Regulatoren bliver designet ud fra frekvensrespons-designmetoden, hvor der som navnet siger, tages udgangspunkt i frekvensresponsen. I denne sammenhæng er det vigtigt, at kravene fra første afsnit opstilles i forhold til frekvensresponsen.

# 9.1 Opsamling af krav og elementer

Som beskrevet, startes der med at genopstille reguleringssløjfen. Der er siden kapitel 6 tilføjet effektforstærkeren jf. afsnit 8.4. På figur 9.1 ses blokdiagrammet for reguleringssløjfen.



Figur 9.1: Viser reguleringssløjfen for reguleringen af Wave Star armens vinkel.

I dette kapitel er det regulatoren  $D_v(s)$ , der tilstræbes at designe. Overføringsfunktionen for effektforstærkeren blev i afsnit 8.4 fundet til  $C_v(s) = 2, 8$ . Overføringsfunktionen fra spænding på motoren til vinklen af armen blev i afsnit 6.6 s. 63 fundet til:

$$G_v(s) = \frac{1}{0,346s^2 + 11,56s + 17,49}$$
(9.1)

Endelig blev overføringsfunktionen for tilbagekoblingen i afsnit 8.2 fundet til  $H_v(s) = 1$ . Det er disse overføringsfunktioner, der tages udgangspunkt i ved udviklingen af regulatoren. Ved design af ragulatoren tages der ikke højde for forstyrrelsen fra bølgerne, hvorfor
denne sættes til nul.

Eftersom reguleringssløjfen og de tilhørende overføringsfunktioner er på plads, skal kravene til regulatoren opstilles. I kapitel 5 blev der opstillet følgende to krav til regulatoren. Der må højst forekomme en faseforskydning på 2% mellem den ønskede vinkel og den aktuelle. Dette gør sig gældende for sinusstyresignaler i frekvensspektret 0,5-0,9[rad/s]. En faseforskydning på 2% svarer til 7,2°. Det andet krav er, at der højst må forekomme en fejl i amplituden af vinklen på 10% i forhold til styresignalets maksimale amplitude. Dette er også gældende for frekvensspektret 0,5-0,9[rad/s].

Ud fra dette kan der opstille nogle krav til reguleringssløjfen i forhold til frekvensresponsen. For at sikre, at der højst er 7,2° faseforskydning i frekvensspekteret 0,5-0,9[rad/s], skal båndbredden for lukketsløjfen være mindst ca. en dekade højere end den højeste frekvens. Den højeste frekvens er 0,9[rad/s], så båndbredden skal være på mindst 9[rad/s]. På den måde kommer den førstliggende pol til at ligge mindst en dekade efter den højeste frekvens.

For at sikre stabilitet af reguleringen ønskes en fasemargin af åbensløjfen på mindst 45°. Endvidere ønskes det, at samplingsfrekvensen skal være mindst 20 gange så høj som båndbredden af lukketsløjfen. Idet terminalen opsættes til en samplingsfrekvens på 200[Hz], må båndbredden maksimalt være 63[rad/s].

For at sikre, at der er så lille en fejl som mulig i amplituden af vinklen, skal regulatoren være så hurtig/kraftig som muligt. Hastigheden af regulatoren bestemmes af båndbredden. Jo større en båndbredde jo hurtigere er regulatoren. Derfor bør båndbredden være så høj som mulig uden at stride imod ovenstående krav.

Det sidste krav, der opstilles, udledes også fra kravet om maksimal 10% amplitudeafvigelse. For at sikre dette må der ikke forekomme en stady-state fejl af Wave Star armens vinkel. Dette sikres ved at have uendelig forstærkning ved DC i åbensløjfen.

Opsummeret kan kravene til frekvensresponsen opstilles til følgende tre krav:

- Båndbredden skal ligge mellem 9<br/>[rad/s] og 63[rad/s],gerne så tæt på 63<br/>[rad/s] som muligt.
- Åbensløjfen skal have en fasemargin på mindst 45°.
- Åbensløjfen skal have uendelig forstærkning ved DC.

I denne forbindelse gøres der opmærksom på, at der er følgende sammenhæng mellem båndbredden af lukketsløjfen og cross-over frekvensen af åbensløjfen ([7] s. 913):

$$\omega_{BW} \simeq \omega_c \quad for \quad PM = 90^\circ \tag{9.2}$$

$$\omega_{BW} \simeq 2\omega_c \quad for \quad PM = 45^\circ$$

$$\tag{9.3}$$

 $omega_{BW}$ : Båndbredden [rad/s] $omega_c$ : Cross-over frekvensen [rad/s]PM: Fasemargin °

Dette medfører, at regulatoren i første omgang kan designes ud fra åbensløjfen, hvilket er fordelagtigt, da åbensløjfen er let at arbejde med.

# 9.2 Design af vinkelregulator

Eftersom der er opstillet nogle gode og håndterbare krav til frekvensresponsen, er det muligt at designe regulatoren, således at den opfylder kravene. Da alle kravene kan tilfredsstilles gennem arbejde med åbensløjfen, analyseres åbensløjfen først. Åbensløjfen er feedforward forstærkningen af reguleringssløjfen og er givet som:

$$L_{v}(s) = D_{v}(s) C_{v}(s) G_{v}(s)$$

$$(9.4)$$

Hvis regulatoren sættes til  $D_v(s) = 1$ , bliver overføringsfunktionen for åbensløjfen:

$$L_v(s) = 2,8 \frac{1}{0,346s^2 + 11,56s + 17,49}$$
(9.5)

Ud fra dette kan det udregnes, at DC-gainet af åbensløjfen er 0,16 gange og at der er to poler beliggende i -1,59 og -31,80. Bodeplottet for åbensløjfen ses på figur 9.2.



Figur 9.2: Viser bodeplottet for åbensløjfen, hvor regulatoren er sat til  $D_v(s) = 1$ .

Som det ses af figuren, opfylder åbensløjferesponsen ikke alle kravene. Først og fremmest har åbensløjfen ikke uendeligt forstærkning af DC. Endvidere er cross-over frekvensen ikke defineret, da forstærkningen aldrig krydser 1 gangs forstærkning, hvilket medfører, at der ikke er styr på, hvad båndbredden bliver. Da cross-over frekvensen ikke er defineret, har åbensløjfen dog uendelig fasemargin. Dette betyder, at det eneste krav, der er overholdt, er kravet om mindst 45° fasemargin.

Ideen er, at designe regulatoren, således at kravene opfyldes. Hvis regulatoren tilføjes et

integratorled i regulatoren (en pol i nul), vil åbensløjfen få uendelig forstærkning ved DC. Dette vil imidlertid komme til at konflikte med de andre krav. Hvis der indsættes et integratorled, vil faseforskydningen allerede være forskudt -90° ved DC. Problemet ved dette er, at faseforskydningen vil være -135° allerede ved placeringen af den første pol. Dette medfører igen, at hvis kravet med 45° fasemargin skal overholdes, kan cross-over frekvensen senest ligge ved polens placering, 1,59[rad/s]. Her vil der være 45° fasemargin, hvilket medfører, at båndbredden vil være ca. den dobbelte frekvens af cross-over frekvensen. Dette er imidlertid ikke nok, hvorfor der må findes en læsning.

Løsningen på problemet kan være at tilføje et nulpunkt oven i den førstkommende pol, hvilket medfører, at faseforskydningen på -135° først forekommer til den anden pol, altså ved 31,80[rad/s]. På denne måde vil der være mulighed for at opfylde alle kravene. Derfor vælges det også at tilføje et nulpunkt, hvilket kan gøres med en PI-regulator. Nulpunktet kan placeres ved hjælp af følgende beregning:

$$D_v\left(s\right) = k_{Pv} + \frac{k_{Iv}}{s} \tag{9.6}$$

$$D_v\left(s\right) = \frac{sk_{Pv} + k_{Iv}}{s} \tag{9.7}$$

Det ses, at nulpunktet således bliver placeret i  $-\frac{k_{Iv}}{k_{Pv}}$  og da det er ønsket at placere nulpunktet i -1,59, skal integratorleddet være 1,59 gange så stort som proportionalleddet. Derfor undersøges åbensløjfen med en PI-regulator med  $k_{Iv} = 1,59$  og  $k_{Pv} = 1$ . Bodeplottet ses på figur 9.3.

1



Figur 9.3: Viser bodeplottet for åbensløjfen med en PI-regulator med  $k_{Iv} = 1,59$  og  $k_{Pv} = 1$ .

Det ses, at kravet til uendelig forstærkning ved DC og kravet om minimum  $45^{\circ}$  fasemargin er overholdt. Til gengæld er cross-over frekvensen 0.255[rad/s], hvilket resulterer i, at kravet til båndbredden ikke overholdes. For at flytte cross-over frekensen højere op, skal åbensløjfen forstærkes. Dette kan gøres ved at øge regulatorens proportionalled. I den forbindelse er det vigtigt, at integratorleddet også ændres, så forholdet beholdes.

Som tidligere beskrevet, er der  $-135^{\circ}$  faseforskydning ved den pol, der er placeret i -31,80. Hvis cross-over frekvensen flyttes ud til de 31,80[rad/s], vil der stadig være  $45^{\circ}$  fasemargin. Endvidere vil båndbredden blive ca. det dobbelte, hvilket medfører at kravet til fasemargin og båndbredden overholdes. Derfor ønskes det at placere cross-over frekvensen ved 31,80[rad/s].

Amplituden af åbensløjfen ved 31,80[rad/s] kan beregnes til 0,0057 gange, hvilket medfører, at åbensløjfen skal forstærkes 176,9 gange. For at opfylde dette og beholde placeringen af nulpunktet sættes  $k_{Pv} = 176,9$  og  $k_{Iv} = 1,59 \cdot 176,9 = 281,2$ . Bodeplottet for den nye åbensløjfe ses på figur 9.4.



Figur 9.4: Viser bodeplottet for åbensløjfen med en PI-regulator med  $k_{Iv} = 281, 2$  og  $k_{Pv} = 176, 9.$ 

Som det ses af figuren, er alle kravene nu overholdt. Fasemarginen er på  $45^{\circ}$ , cross-over frekvensen er ca. halvt så høj, som den ønskede båndbredde og der er uendelig forstærkning ved DC. For at sikre, at det praktiske krav med maksimal 2% afvigelse i fase og 10% i amplitude overholdes, undersøges lukketsløjfen for reguleringssløjfen. Da tilbagekoblingen er 1, er lukketsløjfen givet ved:

$$T_{v}(s) = \frac{L_{v}(s)}{1 + L_{v}(s)}$$

$$(9.8)$$

Således kan bodeplottet for lukketsløjfen ses på figur 9.5.



Figur 9.5: Viser bodeplottet for lukketsløjfen med en PI-regulator med  $k_{Iv} = 281, 2$  og  $k_{Pv} = 176, 9.$ 

Det ses, at faseforskydningen er tæt på nul og at forstærkningen er ca. 0[dB] ved den mest kritiske frekvens, 0.9[rad/s]. Forstærkningen ved 0.9[rad/s] kan beregnes til 1,0004 gange, hvilket er under den maksimale afvigelse i amplituden på 10%. Faseforskydningen kan beregnes til 1,15° ved 0.9[rad/s], hvilket også er betydeligt under de maksimale 2%. Endvidere kan båndbredden af lukketsløjfen beregnes til 51,24[rad/s], hvilket også ligger inden for kravet. Derved kan det konkluderes, at der er fundet frem til en regulator, der teoretisk sikrer, at systemet er tilpas hurtigt, er stabilt og opfylder kravene fra kravspecifikationen kapitel 5. Vinkelregulatoren er således givet ved:

$$D_v(s) = 176, 9 + \frac{281, 2}{s} \tag{9.9}$$

Idet regulatoren er forholdsvis kraftig, kan der være risiko for, at effektforstærkeren går i sin strømbegrænsning. Men idet formålet med regulatoren er at regulere efter sinusformede signaler, er dette ikke et problem. Problemet kan til gengæld opstå ved test af stepresponsen, men dette er ikke interessant, da det ikke er formålet med regulatoren.

I kapitel 12 udføres en accepttest, hvor vinkelregulatoren er implementeret i terminalen.

I dette kapitel designes regulatoren til regulering af momentet i Wave Star armen. Kapitlet er ligesom kapitel 9 delt op i to afsnit. I det første afsnit opstilles de krav, der er til reguleringen og i det næste designes regulatoren efter frekvensrespons-designmetoden. Da krav og designemetode minder meget om, dem der er benyttet i reguleringen af vinkel, kapitel 9, vil der i dette kapitel ofte blive refereret til kapitel 9.

# 10.1 Opstilling af krav og elementer

Reguleringssløjfen for momentreguleringen er i princippet tilsvarende vinkelreguleringen. Der er dog den forskel, at Wave Star armens overføringsfunktion går fra spænding over motoren til momentet i armen. Derudover tilbagekobles der på momentet, og styresignalet er selvfølgelig et ønsket moment. På baggrund af dette henvises blokdiagrammet for reguleringssløjfen til figur 9.1 side 72 med ovenstående ændringer. På figur 9.1 er alle signaler og overføringsfunktioner benævnt med et undersinket "v"for at hentyde, at der er tale om vinklen. I dette kapitel benævnes signaler og overføringsfunktioner på samme måde bare med et undersinket "m", for at hentyde, at der er tale om momentet.

Overføringsfunktionen for effektforstærkeren er igen givet ved  $C_v(s) = 2, 8$ . Overføringsfunktionen fra spænding på motoren til moment i armen blev i afsnit 6.6 fundet til:

$$G_m(s) = \frac{0,44s^2 + 6,50s + 17,39}{0,346s^2 + 11,56s + 17,49}$$
(10.1)

I afsnit 8.3 blev der ikke fundet frem til en overføringsfunktion for tilbagekoblingen, da den opstillede momentmåler ikke virkede efter hensigten (og derfor ikke kan benyttes). Hvis strain gaugen blev udskiftet med en mere hensigtsmæssig type, ville der i softwaren kunne sørges for, at tilbagekoblingen blev én under den forudsætning, at der antages ikke at være en betydelig tidsforsinkelse. Regulatoren vil derfor blive designet efter, at tilbagekoblingen er lig med én.

I forhold til momentreguleringen er der i kapitel 5 opstillet samme krav, som der er til vinkelreguleringen. Altså en maksimal afvigelse på 2% i faseforskydning mellem ønsket moment og det aktuelle moment samt en maksimal afvigelse på 10% i amplituden. Da der også ønskes samme krav til stabilitet og ingen stady-state fejl, som ved vinkelreguleringen, kan frekvensresponskravene opstilles med samme argumentation. Derfor genopfriskes kravene til frekvensresponsen:

- Båndbredden skal ligge mellem 9[rad/s] og 63[rad/s], gerne så tæt på 63[rad/s] som muligt.
- Åbensløjfen skal have en fasemargin på mindst 45°.
- Åbensløjfen skal have uendelig forstærkning ved DC.

Derfor designes momentregulatoren også efter disse krav.

# 10.2 Design af momentregulator

Designmetoden for momentregulatoren er den samme som for vinkelregulatoren. Derfor betragtes først åbensløjfen. Hvis overføringsfunktionen for regulatoren sættes til én, bliver åbensløjfen:

$$L_m(s) = 2,8 \frac{0,44s^2 + 6,50s + 17,39}{0,346s^2 + 11,56s + 17,49}$$
(10.2)

Det ses, at åbensløjfen består af to poler, to nulpunkter samt en DC forstærkning (ikke de 2,8). De to poler har samme placering som ved åbensløjfen for vinkelåbensløjfen, altså en pol i -1,59 og en i -31,80. De to nulpunkters placering kan beregnes til -3,52 og -11,14. Derudover kan DC forstærkningen beregnes til 2,78 gange. Dette kan således analyseres med et bodeplot. Bodeplottet for åbensløjfen ses på figur 10.1.



Figur 10.1: Viser bodeplottet for åbensløjfen, hvor regulatoren er sat til  $D_m(s) = 1$ .

Som det fremgår af bodeplottet, er ikke alle kravene til frekvensresponsen opfyldt. Igen er der ikke uendelig forstærkning ved DC, altså er der ikke sikret mod stady-state fejl. Endvidere indeholder åbensløjfen lige mange poler og nulpunkter, hvilket i dette tilfælde medfører, at båndbredden af lukketsløjfen bliver uendelig. Dette er i den grad usædvanligt, da alle fysiske kontrolsystemer har en lavpasvirkning (altså flere poler end nulpunkter) ([7] s. 321). Grunden til, at åbensløjfen har lige mange poler og nulpunkter er, at overføringsfunktionerne ikke indeholder en højfrekvensanalyse. Således er poler, som blandt andet den, der kommer fra motorens selvinduktans og polen, der opstår af samplingsfrekvensen, ikke taget med. Dette er imidlertid ikke noget problem, da regulatoren ikke designes efter så høje frekvenser. Sidst ses det, at fasemarginen er uendelig, da der ikke er defineret en cross-over frekvens.

For at skabe uendelig forstærkning ved DC kan der benyttes en integrator som regulator. Til forskel fra vinkelreguleringen vil en ren integrator ikke skabe problemer her. Dette skyldes, at forskydningen i forvejen er så lille, at der selv med de -90°, der kommer fra integratoren, vil det ikke være noget problem at få en fasemargin på minimum 45°. Grunden til, at faseforskydningen er så lille, er, at der er lige mange poler og nulpunkter, og at de ligger forholdsvis tæt på hinanden (modvirker hinandens virkning).

Derfor indsættes en ren integratorregulering (I-regulering) med  $k_{Im} = 1$ . Bodeplottet for åbensløjfen med denne regulator ses på figur 10.2.



Figur 10.2: Viser bodeplottet for åbensløjfen med en I-regulator med  $k_{Iv} = 1$ .

Som det ses, er fasemargin som forventet overholdt. Endvidere vil der være uendelig forstærkning ved DC. Men kravet til båndbredden er ikke overholdt, da denne ligger til ca. samme frekvens som cross-over frekvensen (da der er ca. 90° fasemargin). Som det ses er cross-over frekvensen 2,01[rad/s], hvilket ikke er nok.

Derfor ønskes det at flytte cross-over frekvensen, hvilket kan gøres ved at øge  $k_{Im}$  i integratoren. Da fasemarginen altid vil ligge i nærheden af 90°, vil båndbredden blive ca. det samme som cross-over frekvensen. Dette medfører, at det ønskes at placere crossover frekvensen til 63[rad/s]. Derfor beregnes den nuværende forstærkning ved 63[rad/s] til 0,0516 gange. Hvis der ønskes en forstærkning til denne frekvens på 1 gang, skal  $k_{Im} = 19,38$ . Bodeplottet for åbensløjfen med en I-regulator med  $k_{Im} = 19,38$  ses på figur 10.3.



Figur 10.3: Viser bodeplottet for åbensløjfen med en I-regulator med  $k_{Iv} = 19,38$ .

Som det fremgår, er der nu uendelig forstærkning ved DC, cross-over frekvensen er 63[rad/s] og der er en fasemargin på 105°. Derfor er alle krav til åbensløjfen opfyldt.

For at sikre, at kravene fra kapitel 5 med maksimal afvigelse på 10% i amplitude og 2% i faseforskydning (i frekvensspektret 0.5-0.9[rad/s]) er overholdt, undersøges lukketsløjfen for reguleringssløjfen. Bodeplottet for lukketsløjfen ses på figur 10.4.



Figur 10.4: Viser bodeplottet for lukketsløjfen med en I-regulator med  $k_{Iv} = 19, 38$ .

Det ses, at ved den mest kritiske frekvens, 0.9[rad/s], er forstærkningen ca. 0[dB] og at faseforskydningen er meget tæt på nul. Det kan udregnes, at forstærkningen er 1,004 gange ved 0.9[rad/s], hvilket er betydeligt under en afvigelse på de 10%. Faseforskydningen kan beregnes til -1,06°, hvilket også er betydeligt under de tilladte 2% afvigelse. Endvidere er båndbredden af lukketsløjfen beregnet til 40,37[rad/s], hvilket opfylder kravet.

Det kan derfor konkluderes, at der er designet en I-regulator, der opfylder alle krav (i teorien) og som er givet ved:

$$D_m(s) = \frac{19,38}{s} \tag{10.3}$$

Idet momentmåleren ikke virker, er det ikke muligt at afprøve regulatoren i praksis. Derfor vil der ikke blive foretaget en accepttest af momentregulatoren.

# Kapitel 11 Delkonklusion - Udvikling

I udviklingen blev der først gennemgået, hvordan terminalen er implementeret. Terminalen er implementeret i en computer med en realtids Linux kerne. Endvidere er terminalen opsat, således at der kan kompileres realtidsprogrammer direkte fra Simuling. På den måde er det let og hurtigt at implementere en reguleringssløjfe. På terminalen er der installeret et program, der arbejder sammen med kernen og Simulink, således relevante data kan fremvises og gemmes. Desuden muliggør dette også, at parametre fra de blokdiagrammer, der er opstillet i Simulink, kan ændres live. Det kan således konkluderes, at alle use casene fra kapitel 4 er opfyldt. Det er nemlig muligt at regulere enten vinkel eller moment i Wave Star armen, ændre parametre og fremvise relevante data.

For at terminalen kan styre og fortage målinger af Wave Star armen, er der tilsluttet et I/O kort til terminalen. I/O kortet har en række ADC'er, DAC'er og digitale I/O porte. I/O kortet er tilsluttet Wave Star armens vinkel og momenttransducere, således det er mulig at måle den aktuelle vinkel af og det aktuelle moment i armen. Det viste sig dog, at momenttransduceren (fra anden side) ikke er valgt hensigtsmæssigt, da den er afhængig af luftfugtigheden. Da Wave Star armen arbejder i vand, kan momentmålingerne ikke benyttes, da de ikke er troværdige. Det kan således konkluderes, at det med vinkeltransduceren og I/O kortet er muligt at tilbagekoble reguleringssløjfen af vinkelreguleringen. Til gengæld er det ikke muligt at tilbagekoble reguleringssløjfen for moment, da moment-transduceren ikke er troværdig. Det vil derfor ikke være muligt at opstille en accepttest af momentreguleringen.

I/O kortet er også tilsluttet en effektforstærker, som forsyner Wave Star amens motor med den ønskede spænding. Det kan derfor konkluderes, at det er muligt at fuldføre reguleringssløjfen i praksis for reguleringen af vinklen.

I udviklingen er der også designet to regulatorer: en til regulering af vinkel og en til regulering af moment. Vinkelregulatoren er af typen PI-regulator og moment regulatoren er af typen I-regulator. Begge regulatorer opfylder i teorien de krav, der blev opstillet i kravspecifikationen, kapitel 5. Det er som tidligere beskrevet ikke muligt at efterprøve momentregulatoren i praksis. Til gengæld er det muligt at efterprøve vinkelregulatoren.

Det kan opsamlende konkluderes, at der er udviklet en vinkelregulator og en momentregulator, hvor det er muligt at afprøve vinkelregulatoren i praksis. Der er blevet opsat en terminal, der gør det muligt at implementere regulatorerne, ændre parametre og fremvise relevante data. Derfor er alle use casene opfyldt, med undtagelse af praktisk implementation af momentregulatoren. Endvidere er alle krav i teorien overholdt.

# Del III Afslutning

# Struktur af Afslutning

I det følgende beskrives strukturen af delen Afslutning (del III) og hvad de enkelte kapitler indeholder. Afslutningen indeholder følgende kapitler: Accepttest (kapitel 12), Konklusion (kapitel 13) og Perspektivering (kapitel 14).

Kapitel 12 (Accepttest) indeholder en accepttest af vinkelregulatoren. Testen består af tre forskellige typer af teste, som blev defineret i acceptspecifikationerne afsnit 5.2. Testene er: test af konstant vinkelfrekvens, test af frekvenssweep og test af stepresponsen. Formålet med kapitlet er at vurdere om vinkelregulatoren lever op til de opstillede krav.

Kapitel 13 (Konklusion)er en opsummering af, hvad der igennem projektet er fundet frem til. Dette benyttes løbende til at konkludere på de enkelte emner og problemstillinger. Til sidst konkluderes, hvad der er opnået i projektet.

Kapitel 14 (Perspektivering) indeholder projektets perspektivering. I kapitlet fremhæves, hvilke forbedringer, der bør udføres på Wave Star armen for, at den er velegnet som en standart forsøgsopstilling på Aalborg Universitet. Derudover klargøres, hvad der skulle have været arbejdet videre med, hvis projektet var fortsat. Sidst perspektiveres til nogle af de samfundskonsekvenser, som en kommende energikrise kan medføre.

# $\begin{array}{c} \text{Kapitel 12} \\ \textbf{ACCEPTTEST} \end{array}$

Dette kapitel indeholder accepttesten for vinkelregulatoren. Som tidligere beskrevet, virker momentmåleren ikke, hvorfor det ikke har været muligt at udføre en accepttest af momentregulatoren. Der kunne dog være fortaget en accepttest af momentregulatoren udelukkende baseret på simuleringer. Men idet regulatoren er designet således, at den opfylder alle krav, er det vurderet, at det ikke vil bidrage med ny information.

Med hensyn til accepttesten af vinkelregulatoren er accepttesten udført i overensstemmelse med acceptspecifikationen afsnit 5.2. Målejournalen for alle resultater i accepttesten findes i appendiks A.3. Formålet med accepttesten er at verificere, hvorvidt kravspecifikationen overholdes. Endvidere er formålet at sammenligne teori og praksis.

Accepttesten er delt op i tre afsnit, et for hver type af test. De tre typer af teste er: konstant vinkelfrekvens, frekvenssweep og step.

# 12.1 Konstant vinkelfrekvens

Første accepttest af vinkelregulatoren er en test af, hvordan regulatoren reagerer på konstante vinkelfrekvenser i spekteret 0,5-0,9[rad/s]. I acceptspecifikationen blev testens formål og fremgangsmåde fastlagt til:

Formålet med denne test er at verificere, at kravene til afvigelse i amplitude og forsinkelse overholdes ved forskellige faste frekvenser i området 0,5-0,9[rad/s]. Testen fortages med maksimal amplitude på 0,05[rad] for også at efterprøve dette krav.

Fremgangsmåden for forsøget er først at placere Wave Star armen således, at flyderen flyder i karet med vand. Derefter tilsluttes terminalen til Wave Star armen for at kunne sende styresignalet og opsamle data. Først foretages testen med en vinkelfrekvens på 0,5[rad/s], hvorefter den øges til 0,6[rad/s]. Denne procedure fortsættes indtil en vinkelfrekvens på 0,9[rad/s] opnås.

Fremgangmåden er blevet fulgt og resultaterne ses på figur 12.1 til 12.5. Alle figurerne er opstillet på samme måde, hvor grafen til højre viser vinklen af Wave Star armen og grafen til venstre viser spændingen over motoren. På vinkelgrafen er der plottet fem kurver. De to grønne kurver viser den maksimale afvigelse, der blev fastlagt i kravspecifikationen kapitel 5. Den stiplede sorte kurve viser det styresignal, der er benyttet og som regulatoren skal forsøge at følge. Den røde kurve viser måleresultatet af Wave Star armens vinkel,

dvs. resultatet af den praktiske implementation af vinkelregulatoren. Den blå kurve viser Wave Star amens teoretiske simulerede vinkel.

På spændingsgrafen er der plottet to kurver. Den røde kurve er den målte spænding på motoren (spændingen fra forsøget). Den sorte kurve er den simulerede spænding på motoren.



Figur 12.1: Højre graf viser vinklen af Wave Star armen, mens venstre graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for en sinuskurve med en frekvens på 0,5[rad/s] og en amplitude på 0,05[rad] som styresignal.

På højre graf figur 12.1 ses vinklen af Wave Star armen, når den skal følge en sinuskurve med en frekvens på 0.5[rad/s]. Det ses, som ønsket, at både simulering og måling af vinklen ligger næsten lige oven i styresignalet. Ved nøje betragning ses det, at ved hver sinustop og bund, er den målte vinkel lidt langsommere end den simulerede til at finde ind til styresignalet. Dette skyldes, at bevægelsen stoppes kortvarigt ved både top og bund. Derfor skal den statiske friktion overvindes, før flyderen i praksis begynder at bevæge sig igen. Denne statiske friktion blev allerede påpeget ved tilpasningen af modellen, afsnit 6.5. Den statiske friktion blev ikke medtaget i modellen, hvilket er årsagen til simuleringsresultatet ikke agerer på samme måde.

Overordnet ses det, at hverken den simulerede eller målte vinkel på noget tidspunkt er i nærheden af at overskride den maksimale afvigelse. Det kan derfor konkluderes, at regulatoren overholder det opstillede krav for et sinusformet styresignal med en frekvens på 0.5[rad/s] og en amplitude på 0.05[rad].

Betragtes grafen til højre, figur 12.1, ses det, at der er en del forskel på den målte og den simulerede spænding over motoren. Det ses, at den simulerede spænding bevæger sig som en perfekt sinuskurve, hvilket var forventet, da simuleringen er baseret på den lineære model med den lineære regulator.

Det interessante er forskellen mellem de to kurver. Først ses det, at den målte spænding er meget riflet. Allerede ved tilpasningen af modellen, afsnit 6.5, viste disse rifler sig. Dette var på tråds af, at spændingen var styret af et "rent" signal og ikke af en regulator. Derfor vurderes hovedårsagen til riflerne at være sammenspillet mellem DAC'en og effektforstærker samt måling med ADC'en. Det kan tyde på, at der er noget støj i signalvejen, der gør, at spændingen svinger omkring den ønskede spænding. Som det ses, arbejdes der med små spændinger, hvilket også gør signalvejen mere følsom. Større udslag i spændingen kan skyldes, at der i praksis forekommer forstørrelser i reguleringssløjfen, som ikke er medtaget i simuleringen. En betydelig forstyrrelse, som også tidligere er blevet beskrevet, er, at bølgerne i vandet også påvirker Wave Star armen.

Det ses endvidere, at den målte spænding giver et stort udslag kort efter en sinustop eller bund på den simulerede spænding. Det er i dette punkt, hvor regulatoren prøver at overvinde den statiske friktion (som ikke er medtaget i modellen). I den forbindelse ses det, at den målte spænding minder meget om den korrigerede sinusspænding fra tilpasningen af modellen, afsnit 6.5. Formålet var netop, at få et sinusformet output af Wave Star amens vinkel.

Sidst ses det, at spænding fra målingen og fra simuleringen har ca. samme amplitude, hvilket er et tegn på, at den fundne model er en god approksimation af virkeligheden i forhold til amplituden.

Det kan konkluderes i forhold til spændingen, at der er visse forskelle mellem målings- og simuleringsresultater. Forskellen kan dog forklares ud fra, at den statiske friktion ikke er medtaget i modellen og at der højst sandsynligt er støj i signalvejen i systemet.



Figur 12.2: Højre graf viser vinklen af Wave Star armen, mens venstre graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for en sinuskurve med en frekvens på 0,6[rad/s] og en amplitude på 0,05[rad] som styresignal.

Figur 12.2 viser samme test som ovenstående, blot med en frekvens på 0.6[rad/s]. Det ses, at resultatet for både vinkel og spænding er tilsvarende resultatet for 0.5[rad/s]. Derfor konkluderes det, at vinkelregulatoren også overholder kravene ved 0.6[rad/s].



Figur 12.3: Højre graf viser vinklen af Wave Star armen, mens venstre graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for en sinuskurve med en frekvens på 0,7[rad/s] og en amplitude på 0,05[rad] som styresignal.

På figur 12.3 ses resultatet af konstant vinkelfrekvenstesten med en frekvens på 0.7[rad/s]. Det ses igen, at resultatet minder meget om de to foregående teste. Derfor kan det igen konkluderes, at vinkelregulatoren lever op til kravene ved en frekvens på 0.7[rad/s].



Figur 12.4: Højre graf viser vinklen af Wave Star armen, mens venstre graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for en sinuskurve med en frekvens på 0.8[rad/s] og en amplitude på 0.05[rad] som styresignal.

Figur 12.4 viser samme test, blot for 0.8[rad/s]. Igen ses det, at resultatet er tilsvarende de tidligere teste. Dog ser det ud til, at nulpunktet for den målte spænding er forskudt i forhold til den simulerede. Det ser ud til, at der i praksis skal en større kraft til at skubbe flyderen ned i vandet og en mindre kraft for at hive flyderen op af vandet. Dette kan skyldes, at Wave Star armen, i praksis ikke er startet i arbejdspunktet. Dette kan forekomme på grund af, at den statiske friktion gør det muligt, at Wave Star armen står stille selv om, at der er en større hydrostatisk kraft end tyngdekraften og omvendt. Hvis flyderen fra start af har været skubbet lidt for langt ned i vandet, vil det medføre resultatet fra figuren, da motoren således skal yde et større moment for at skubbe flyderen ned i vandet og omvendt. Det kan således konkluderes, at regulatoren også lever op til kravene ved en frekvens på 0.8[rad/s].



Figur 12.5: Højre graf viser vinklen af Wave Star armen, mens venstre graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for en sinuskurve med en frekvens på 0,9[rad/s] og en amplitude på 0,05[rad] som styresignal.

Sidst er samme test udført for 0.9[rad/s]. Det ses af figur 12.5, at resultatet er tilsvarende de andre teste. Det ses også, ligesom ved 0.8[rad/s], at Wave Star armen sandsynligvis endnu engang ikke er startet i arbejdspunktet. Det kan dog konkluderes, at vinkelregulatoren også overholder kravene for 0.9[rad/s].

Opsummerende kan det nævnes, at vinkelregulatoren overholder kravene i alle testene. Det er dermed sandsynliggjort, at vinkelregulatoren overholder kravene i hele det frekvensspektre, der arbejdes med.

# 12.2 Frekvenssweep

I anden accepttest undersøges det, hvordan vinkelregulatoren reagerer på et frekvenssweep fra 0.5[rad/s] til 0.9[rad/s]. I acceptspecifikationen blev testens formål og fremgangsmåde fastlagt til:

Formålet med denne test er at verificere, at kravene til afvigelse i amplitude og forsinkelse overholdes i et frekvenssweep fra 0.5[rad/s] til 0.9[rad/s]. Testen fortages med maksimal amplitude på 0.05[rad] for også at efterprøve dette krav.

Fremgangsmåden for forsøget er først at placere Wave Star armen således, at flyderen flyder i karet med vand. Derefter tilsluttes terminalen til Wave Star armen for at kunne sende styresignalet og opsamle data. Selve testen foretages ved at give et frekvenssweep fra 0.5[rad/s] til 0.9[rad/s] som styresignal.

På denne måde kan testene "Konstant vinkelfrekvens" og "Frekvenssweep" verificere, om kravene til regulatorerne overholdes.

Resultatet for denne test ses på figur 12.6, hvor sweepet er udført over 50[s]. Grafernes opbygning er tilsvarende graferne fra test af konstant vinkelfrekvens. Der er dog den forskel, at den øverste graf er for Wave Star armens vinkel og den nederste er for spændingen over motoren.



Figur 12.6: Øverste graf viser vinklen af Wave Star armen, mens nederste graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for et frekvenssweep fra 0,5[rad/s] til 0,9[rad/s] og en amplitude på 0,05[rad] som styresignal.

Det ses af figuren, at resultatet af testen er tilsvarende resultaterne for konstante frekvenser. Derfor henvises forklaringerne af testen til afsnit 12.1. Ligesom tidligere ser det ud til, at Wave Star armen endnu engang ikke er startet i det definerede arbejdspunkt.

Det kan således konkluderes ud fra testene af konstante frekvenser og frekvenssweep, at vinkelregulatoren overholder de opstillede krav i hele frekvensspektret 0.5-0.9[rad/s].

# 12.3 Step

Sidste accepttest af vinkelregulatoren er, hvor regulatoren udsættes for et step. Fremgangsmåde og formål blev fastlagt i acceptspecifikationen til:

Denne test er i bund og grund ikke relevant for at efterprøve kravene. Den fortages udelukkende for at se, hvor godt modellen, der udledes i kapitel 6, stemmer overens med virkeligheden, når der reguleres med regulatorerne. Testen går ud på at sende et step som styresignal og på den måde måle stepresponsen af det samlede system.

Fremgangsmåden for forsøget er først at placere Wave Star armen således, at flyderen flyder i karet med vand. Derefter tilsluttes terminalen til Wave Star armen for at kunne sende styresignalet og opsamle data. Der sendes et step som styresignal fra terminalen og dataene for vinkel og moment optages for at blive sammenlignet med resultaterne fra modellen.

Resultatet af testen ses på figur 12.7. Graferne er opbygget på samme måde som ved test af konstante frekvenser. Dog er de grønne kurver, der viste den maksimale afvigelse, ikke medtaget, da der ikke er opstillet krav til stepresponsen af regulatoren. Grunden til, at der ikke er opstillet krav til stepresponsen er, at styringssignalet til Wave Star armen jf. afsnit 5.1 forventes at være en summation sinuskurver.



Figur 12.7: Højre graf viser vinklen af Wave Star armen, mens venstre graf viser spændingen over motoren. Begge grafer er for et step med en amplitude på 0,05[rad] som styresignal.

Først betragtes vinklen af Wave Star armen. Det ses, at den målte og simulerede steprespons overordnet følges ad. Det ses endvidere, at stepresponsen har en vis stigetid og oversving, hvilket kunne forventes ud fra båndbredden og en fasemargin på 45°. Båndbredden er således tæt relateret til stigetiden og fasemargin til oversvinget.

Det ses, at både det simulerede og måleresultatet indfinder sig til steppet ca. ligeså hurtigt og at der i begge tilfælde ikke forekommer en stady-state fejl (som forventet). Men den målte steprespons svinger betydeligt mere end den simulerede i indsvingningsfasen. Dette skyldes højst sandsynligt forstyrrelsen fra de bølger, steppet forsager i vandet. Denne forstyrrelse er nemlig ikke medtaget i modellen.

En anden årsag til, at det målte svinger mere end simuleringen, kunne være, at fasemarginen i praksis er mindre end den teoretiske på 45°. Årsager til dette kan være: at den sidste pol i praksis ligger tidligere end i føle modellen og at højfrekvente poler, som ikke er medtaget i modellen, bidrager til fasedrejet ved cross over frekvensen. Dette kunne f.eks. være den pol, der kommer fra motorens selvinduktans. Men idet fasemaginen er tæt forbundet med oversvinget og indsvingningstiden (hvor måling og simulering er tilsvarende), vurderes det, at det ikke er fasemarginen, men forstyrrelsen fra bølgerne, der er årsagen til, at den målte steprespons svinger mere end den simulerede.

Det kan således konkluderes, at det målte og simulerede stemmer forholdsvist overens, dog med ovenstående afvigelse. Det kan også konkluderes, at vinkelregulatoren eliminerer stady-state fejlen for et step.

Med hensyn til spændingen, figur 12.7 grafen til højre, ses det, at der også er forskel på det målte og det simulerede. Det ses, at der er en offset fejl på den målte spænding. Dette skyldes højst sandsynligt, som ved de andre teste, at Wave Star armen ikke er startet i det teoretiske arbejdspunkt. Ses der bort fra dette, fremgår det, at også den målte spænding svinger mere end den simulerede. Årsagen er forbundet til svinget i vinklen, som blev vurderet til at komme fra forstyrrelsen fra bølgerne.

Sidst ses det, at både den målte og den simulerede spænding går i mætning. Dette skyldes først og fremmest, at der både i praksis og i simuleringen er indsat en begrænsning for spændingen. Årsagen til, at der er indsat begrænsningen i praksis er, at Wave Star armen ikke har indbygget en sikkerhed mod sine fysiske begrænsninger. Med dette menes der, at Wave Star armen ikke er begrænset i forhold til sin mekaniske udformning, dvs., at den ikke stopper, når den fysisk ikke kan dreje mere. Problemet opstår i, at motoren er så kraftig, at den kan rykke gearingen, som er udformet i plastic, i stykker. Begrænsningen er derfor implementeret for at beskytte Wave Star armen. Begrænsningen er medtaget i simuleringen for at efterligne virkeligheden bedst muligt.

Det kunne være undgået, at spændingen går i mætning ved stepresponsen, hvis regulatoren var designet efter stepresponsen. Men da dette ikke er formålet med projektet, er det ikke blevet gjort. Det kan dog konkluderes, at mætningen ikke gør systemet ustabilt.

Det skal nævnes, at under stepforsøget blev det observeret, at Wave Star armen så ud til at have et større oversving end det målte. Endvidere så det ud til, at vinklen svingede mere efter steppet end det målte. Årsagen til dette er sløret i maskinen. Vinklen måles direkte på motoren og idet der er slør ud til bevægelse af armen, er det ikke Wave Star armens aktuelle vinkel, der måles. Denne usikkerhed kan undgås, hvis vinklen blev målt direkte på armen.

Ud fra de tre acceptteste kan det opsamles: at vinkelregulatoren opfylder de opstillede krav og at vinkelregulatoren eliminerer en eventuel stady-state fejl for stepresponsen.

# KAPITEL 13 KONKLUSION

Udgangspunktet for dette projekt, er den kommende energikrise grundet: et stigende forbrug, vækst i verdensbefolkningen og at langt de fleste nuværende energikilder er baseret på fossile brændstoffer. Med udgangspunkt i vedvarende energikilder er der forsøgt at finde alternative løsningsmodeller, der kan afhjælpe krisen. Blandt andet har nyere forskning vist, at energipotentialet i bølger i havet svarer til ca. en tredjedel af verdens nuværende samlede energibehov. På den måde er der store fremtidsudsigter i at benytte bølgeenergi som en vedvarende energikilde. Der blev fundet frem til et bølgeenergiprojekt ved navn Wave Star Energy, som er udgangspunktet for dette projekt.

Wave Star Energy projektet er baseret på en grundlæggende idé om at skabe en vedvarende stabil og jævn energikilde ved hjælp af bølgerne i havet. Wave Star Energy projektet har massiv opbakning fra en stærk aktionær, som også kan bidrage til konstruktionen af Wave Star Energy maskinen. Wave Star Energy koncernen regner med inden for kort tid at kunne få den første maskine på det kommercielle marked. Endvidere forventer de, at næste generation af maskinen kan konkurrere (energimæssigt) med de store havvindmøller. Det kan således konkluderes, at Wave Star Energy er et meget seriøst bud, med gode fremtidsudsigter, på en vedvarende energikilde.

I projektet er der ikke arbejdet direkte med Wave Star Energy maskinen, men med en miniaturemodel (Wave Star armen), som er en forsimplet model af en af Wave Star Energy maskinens arme. I dette projekt er der blevet undersøgt, hvilke typer af bølger Wave Star Energy maskinen bedst egner sig til. Det viste sig, at maskinen er designet til ensartede bølger, der har en bølgefrekvens på ca. 0.5-0.9[rad/s]. Det er således denne type af bølger, der er taget udgangspunkt i ved arbejdet med Wave Star armen. Ud fra dette er der opstillet krav til reguleringen af Wave Star armen, som sikrer, at der kan trækkes mest mulig energi ud af bølgerne.

Der blev endvidere fundet ud af, at Wave Star amen skal kunne reguleres efter henholdsvis vinklen af og momentet i armen. For at kunne designe regulatorerne var det nødvendigt at opstille en matematisk model af Wave Star armen. Modellen kom således til at gå fra spænding over motoren til henholdsvis vinkel af og moment i armen. Idet nogle af elementerne i modellerne er afhængig af bølgernes frekvens, blev modellerne tilpasset virkeligheden ud fra måleresultater. Denne tilpasning viste, at Wave Star armens motor ikke virkede som oplyst i databladet. Denne fejlkilde blev derfor også korrigeret under tilpasningen. Det viste sig også, at der er nogle friktionselementer i Wave Star armen, som ikke er taget med i modellen. Efter tilpasningen af modellen kunne det konkluderes, at modellen er en udmærket beskrivelse af virkeligheden.

Modellerne blev lineariseret og laplacetransformeret med henblik på at kunne designe regulatorerne efter frekvensrespons-designmetoden. Regulatorerne blev således designet ud fra åbensløjfen til at overholde de opstillede krav. Der blev fundet frem til, at vinklen teoretisk kan reguleres tilfredsstillende med en PI-regulator og momentet med en I-regulator.

For at implementere regulatorerne benyttes terminalen. Terminalen kører på en computer, hvor styresystemet Linux er opgraderet med en realtidskerne. Computeren er forbundet med et I/O kort, således at det er muligt at opsamle data og styre Wave Star armen. På terminalen er der endvidere installeret et program (RTAI-lab), der kan samarbejde med kernen og Simulink. Programmer kan således kompileres direkte fra Simulink og parametre i programmet kan ændres live. Dette gør det let og hurtigt at implementere og ændre reguleringer af Wave Star armen. Endvidere gør RTAI-lab det muligt at opsamle og fremvise relevante data live. På den måde kan det konkluderes, at alle funktionaliteterne fra use casen er opfyldt.

I forbindelse med Wave Star armen er der visse elementer, der ikke virker efter hensigten. Specielt er momenttransduceren ikke egnet til formålet. Dette har resulteret i, at det ikke er muligt at måle et troværdigt moment i armen. Dette medfører, at det ikke har været muligt at implementere momentregulatoren, da der ikke kan tilbagekobles.

Vinkelregulatoren blev implementeret på terminalen for at udføre en accepttest og for at undersøge, om regulatoren i praksis også lever op til kravene. Testen viste at regulatoren uden problemer lever op til kravene. Der er sågar en stor margin til kravene. Testen viste endvidere, at regulatoren agerer forskelligt fra simulering til praksis. Årsagen til forskelligheden er vurderet til at ligge i de friktionselementer og forstyrrelsen fra bølgerne, som ikke er medtaget i modellen.

Det kan opsamlende konkluderes, at der er opstillet en model for både vinkel af og moment i Wave Star armen, som har god sammenhæng med virkeligheden. Endvidere er der designet og implementeret en vinkelregulator, som lever op til kravene. Vinkelregulatoren giver rig mulighed for i fremtiden at eksperimentere med, hvordan der trækkes mest mulig energi ud af bølger.

# KAPITEL 14 PERSPEKTIVERING

Da det er meningen, at Wave Star armen skal benyttes som en standartopstilling på Aalborg Universitet, vil den følgende perspektivering blandt andet indeholde en beskrivelse af, hvad der bør forbedres på maskinen. De erfaringer, der er blevet gjort med Wave Star armen i dette projekt, kan netop benyttes til at forbedre maskinen. Dette vil medføre, at Wave Star armen kan gøres mere hensigtsmæssig i forhold til sit fremtidige formål: at forske i, hvordan der trækkes mest mulig energi ud af bølger. Derudover vil der være refleksion over og perspektiver på en fremtidig ændring af den nuværende energiform.

Det første, der bør forbedres på Wave Star armen er momenttransduceren. Som tidligere beskrevet, er den baseret på en strain gauge, der er afhængig af luftfugtigheden. Dette er ikke optimalt, da Wave Star armen arbejder i vand. Derfor bør strain gaugen erstattes med en strain gauge, som ikke er afhængig af luftfugtigheden. På den måde vil det i fremtiden være muligt at tilbagekoble på momentet. En anden løsning kunne være at måle motormomentet og derefter regne frem til momentet i armen.

I denne sammenhæng kunne det også forstilles, at der kunne reguleres på motormomentet i stedet for momentet i armen. Dette ville også være fordelagtigt, idet den tilførte kraft fra motoren på flyderen, har stor sammenhæng med, hvor meget energi, der kan trækkes ud af bølgerne.

Et andet punkt, der bør forbedres ved Wave Star armen, er målingen af vinklen. Målingen af vinklen er i sig selv meget god og præcis. Men grundet den store grad af slør i Wave Star armen og at vinklen måles af motoren og ikke af armen, er målingerne ikke fuldstændig troværdige. Derfor bør vinkelsensoren flyttes, således at den måler vinklen af armen. På denne måde vil informationer ikke forsvinde i sløret.

Med hensyn til sløret i Wave Star armen bør maskinen gennemgås for forbedringer. Umiddelbart kunne sløret tages med i modellen, men da slør kan være meget besværligt at modellere, er det ikke en hensigtsmæssig løsning. Endvidere bidrager sløret kun til, at den energimængde, der kan trækkes ud af bølgerne, kun bliver mindre. Derfor bør den mekaniske konstruktion forbedres, således at sløret reduceres eller helt fjernes.

Sidst bør der udarbejdes en sikkerhedsforanstaltning, som sikrer, at Wave Star armen ikke kan ødelægge sig selv. I projektrapporten er det pointeret, at motoren er så kraftig, at hvis Wave Star armen går i et mekanisk stop, kan den ødelægge koblingen. En anden løsning kunne være at udforme koblingen i et stærkere materiale end plastik. Det foreslås dog, at der udvikles en sikkerhedsanordning, der sikrer at Wave Star armen ikke bevæger sig ud i sine mekaniske begrænsninger.

Hvis disse forbedringer blev fortaget, ville det være lettere at arbejde videre med Wave Star armens formål: at optimere energiudtaget fra bølger. Hvis dette projekt var fortsat, ville det også være dette emne, der ville blive arbejdet med.

Med hensyn til Wave Star Energy projektet er det et meget seriøst bud på et bidrag til, hvordan den kommende energikrise kan afværges. I projektet er der redegjort for, at det kun er et spørgsmål om tid før verdenen slipper op for fossile brændstoffer, som er grundlaget for størstedelen af al energiproduktion.

I den forbindelse skal der findes alternativer til fossile brændstoffer. Dette vil ikke kunne gøres fra den ene dag til den anden, da energiforbruget er baseret på den nuværende energiform. Der vil således skulle være en omstillings- og udfasningsperiode af energiforbruget og energiproduktionen. Denne omfasning vil få store konsekvenser for samfundet på mange områder. F.eks. vil hele transportsektoren, som den kendes i dag, højst sandsynligt blive omlagt. Mange forudser, at transportmidler generelt vil blive baseret på eldrevne motorer, f.eks. elbiler. Problemet herved er rækkevidden på en batteriopladning er begrænset og at det på nuværende tidspunkt tager lang tid at oplade batterierne. Problemet bliver kun større, når der tænkes på fragt med lastbiler, skibe og fly. En løsning for biler og lastbiler kunne være at erstatte tankstationer med batteriombytningsstationer. Men hverken skibe eller fly vil have muligheden for at lade op eller skifte batterier under transporten.

I forhold til Wave Star Energy projektet er det vigtigt, at maskinen sammenlignes med andre bølgemaskiner baseret på andre principper. F.eks. med hensyn til rentabelhed og effektivitet for, at undersøge bæredygtigheden. Endvidere er bølgeenergi en forholdsvis ny energikilde og i den sammenhæng bør den sammenlignes med udbyttet af andre og mere udforskede energikilder. Dog har det vist sig, at der er et stort energipotentiale i bølgerne, hvorfor det formodes, at der er fremtid i bølgeenergi.

# Litteratur

- Wave Star Energy A/S. 500kW maskinen. http://www.wavestarenergy.com/dk/ 500kw.htm, December 2009.
- Wave Star Energy A/S. Fremtidige projekter. http://www.wavestarenergy.com/ dk/future.htm, December 2009.
- [3] Wave Star Energy A/S. Historien bag. http://www.wavestarenergy.com/dk/ history.htm, December 2009.
- [4] Wave Star Energy A/S. Wave Star Energy brochure. http://www.wavestarenergy. com/dk/PDF/WSE%20dansk.pdf, December 2009.
- [5] Wave Star Energy A/S. Wave Star maskinen. http://www.wavestarenergy.com/ dk/machine.htm, December 2009.
- [6] António F. de O. Falcão. Phase control through load control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic PTO system. IDMEC, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal, 18 October 2007.
- [7] Abbas Emami Naeini Gene F. Franklin, J. David Powell. Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson, ISBN 0-13-149930-0, 2006.
- [8] Erik Øhlenschlæger. Grundlæggende Fysik 2. Gyldendal, ISBN 87-00-16899-8, 1993,
  3. udgave, 1. oplæg.
- [9] National Instruments. 6023E/6024E/6025E User Manual, 1999.
- [10] STORTI Mario A.; D'ELIA Jorge. Added Mass of an Oscillating Hemisphere at Very-Low and Very-High Frequencies. American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, ETATS-UNIS (1973) (Revue), 1973.
- [11] Jens Peter Kofoed. Når bølgerne går højt Bølgekraft som energikilde. http://dl.dropbox.com/u/2716723/091124%2C%20IDA%20Naar%20boelgerne% 20gaar%20hoejt.pdf, November 2009.
- [12] Maxon. Planetary Gearhead GP 52 C Ø 52 mm, 4 30 Nm.
- [13] Maxon. RE 40 Ø 40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt. http://shop.maxonmotor. com/maxon/assets\_external/Katalog\_neu/eshop/Downloads/Katalog\_PDF/ maxon\_dc\_motor/RE-programm/new/newpdf\_09/RE-40-148866\_09\_EN\_082.pdf.

- [14] Maxon. Encoder MR, Type L, 256 1024 CPT, 3 Channels, with Line Driver. http://shop.maxonmotor.com/maxon/assets\_external/Katalog\_neu/ eshop/Downloads/Katalog\_PDF/maxon-tacho/Encoder%20MR/new/newpdf\_09/ ENC-MR-1000imp-228456\_09\_EN\_265.pdf, Januar 2010.
- [15] Miguel Prado. Renewable Energy & Sustainability. http://twt.roelofschuitema. nl/Part3-Renewable-Energy.pdf, April 2009.
- [16] Miguel Prado. The World Energy Problem. http://twt.roelofschuitema.nl/ Part1-Energy-Problem.pdf, Juli 2009.
- [17] www.comedi.org. comedi linux control and measurement device interface. http: //www.comedi.org/, Januar 2010.
- [18] www.rtai.org. *RTAI* the RealTime Application Interface for Linux from DIAPM. https://www.rtai.org/, Januar 2010.
- [19] www.rtai.org. *RTAI-Lab tutorial: Scilab, Comedi, and real-time control.* https://www.rtai.org/RTAILAB/RTAI-Lab-tutorial.pdf, Januar 2010.

# Del IV Appendiks

Appendiks A MÅLEJOURNALER

# A.1 Målejournal for tilpasning af model

#### A.1.1 Testobjekt

Testobjektet i dette forsøg er Wave Star armen, der er placeret således, at flyderen flyder frit i et kar med vand.

#### A.1.2 Formål

Formålet med denne test er at fortage forskellige målinger af, hvordan Wave Star armen reagerer på forskellige styresignaler. Disse målinger anvendes til at tilpasse den fundne model af Wave Star armen, således at modellen stemmer overens med virkeligheden.

## A.1.3 Anvendt udstyr

Alt udstyret fra tabel A.1 er benyttet.

Instrument	AAU nr.	Fabrikant, type m.v.
Wave Star armen	-	Aalborg Universitet
DAQ PCI6024E	-	National Instruments
Terminalen	-	-
Effektforstærker	06069	-
Vandkar	-	-

Tabel A.1: Anvendt måleudstyr til forsøget.

## A.1.4 Måleopstilling og måleprocedure

Figur A.1 viser den anvendte måleopstilling.



Figur A.1: Viser den anvendte måleopstilling.

Terminalen kobles til I/O kortet DAQ PCI6024E. I/O kortet kobles til Wave Star armen for at kunne modtage målinger og sende dem videre til terminalen. I/O kortet kobles også til effektforstærkeren, således at den kan forsynes med det ønskede styringssignal. Styringssignalet sendes fra terminalen til I/O kortet. Endvidere modtager I/O kortet også outputtet fra effektforstærkeren og værdierne sendes til terminalen. Effektforstærkeren er tilsluttet Wave Star armen, og forsyner den med den ønskede spænding. Wave Star armen er placeret således, at flyderen flyder frit i vandet i vandkaret. Alt er indstillet således, at konstanterne fra side 6.4 overholdes.

Måleprocedure er, at terminalen sender det ønskede styresignal og opsamler vinklen af Wave Star armen samt outputtet fra effektforstærkeren. Forsøget er fortaget med et positivt og et negativt step, en pulsfunktion og fem korrigerede sinussignaler med hver deres frekvens. Samplingsfrekvensen for styresignalet og dataopsamling er 200[Hz].

#### A.1.5 Resultater

Måleresultaterne for forsøgene ses på figur A.2 til figur A.9. Læg mærke til, at spændingen er divideret med 20 for, at den har samme størrelsesorden som vinklen.



Figur A.2: Viser måleresultatet for et step med en amplitude på 0,77[V]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.3: Viser måleresultatet for et step med en amplitude på -1,00[V]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.4: Viser måleresultatet for et pulssignal med en amplitude på 0,68[V]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.5: Viser måleresultatet for et korrigeret sinussignal (adderet pulssignal) med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 1,00[rad/s]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.6: Viser måleresultatet for et korrigeret sinussignal (adderet pulssignal) med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,83[rad/s]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.7: Viser måleresultatet for et korrigeret sinussignal (adderet pulssignal) med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,69[rad/s]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.8: Viser måleresultatet for et korrigeret sinussignal (adderet pulssignal) med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,58[rad/s]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.



Figur A.9: Viser måleresultatet for et korrigeret sinussignal (adderet pulssignal) med en amplitude på 1,05[V] og en frekvens på 0,48[rad/s]. Den sorte graf er spændingen og den røde er vinklen af Wave Star armen.

### A.1.6 Fejlkilder og usikkerheder

Under denne test er der flere fejlkilder og usikkerheder. Der vil dog blive fokuseret på den mest betydende usikkerhed, da andre afvigelser er forsvindende i forhold til denne. Den store usikkerhed, der forekommer ved testene, er sløret i Wave Star armen. Wave Star armen kan som resultat af sløret give forskellige resultater alt afhængigt af, hvor i sløret der arbejdes. Sløret er målt til at være op til 8[cm] i vertikal bevægelse. Wave Star armen er dog forsøgt forbedret, hvorved sløret er reduceret.

# A.2 Målejournal for bestemmelse af motorkonstant og modstand

#### A.2.1 Testobjekt

Testobjektet i dette forsøg er Wave Star armen uden flyder monteret.

#### A.2.2 Formål

Denne målejournal indeholder to forsøg. Det ene forsøgs formål er at bestemme motorkonstanten af Wave Star armens motor. Det andet forsøgs formål er at bestemme motorens modstand.

#### A.2.3 Anvendt udstyr

Alt udstyr fra tabel A.1 og tabel A.2 er benyttet til forsøget med undtagelse af vandkaret.

Instrument	AAU nr.	Fabrikant, type m.v.
Oscilloskop	56685	Agilent 54621A
Multimeter	60766	Fluke 189
Vægt		

#### A.2.4 Måleopstilling og måleprocedure

Først beskrives forsøget, der skal bestemme motorens motorkonstant. Forsøgsopstillingen ses på figur A.10.


Figur A.10: Viser den benyttede måleopstilling til bestemmelse af motorkonstanten.

Som det ses af figuren, minder forsøgsopstillingen om forsøget fra appendiks A.1. Der er dog nogle forskelle, som vil blive beskrevet i det følgende. Den spænding, effektforstærkeren påtrykker Wave Star armen, måles med oscilloskobet. Derved benyttes dataene, som terminalen opsamler, kun til at verificere, at Wave Star armen ikke bevæger sig og verificere den spænding, der måles med oscilloskobet. Wave Star armens flyder er afmonteret, og armen er parallel med jorden. Dermed vil armen trykke vinkelret ned på vægten, som er placeret lige under armen. Således kan den vinkelrette kraft (i forhold til armen) måles med vægten og der kan regnes tilbage til et motormoment.

Måleproceduren er at påtrykke motoren en fast spænding, således armen presser ned på vægten. Derefter aflæses spændingen på oscilloskobet og "kraften" på vægten. Det er vigtigt, at armen står helt stille, når dataene aflæses, da de ønskes at findes til vinkelhastigheden nul. Denne procedure gentages med de spændinger, der ønskes at måle den resulterende kraft for. Der startes med den mindste spænding og forsøget gentages med stigende spændinger. Forsøget er gentaget fem gange for at mindske betydningen af usikkerheder.

Måleopstillingen for måling af motorens modstand er næsten identisk forsøget til bestemmelse af motorkonstanten. Der er dog den forskel, at multimeteret er sat i serie med Wave Star armen, så det kan måles, hvor stor en strøm effektforstærkeren leverer. Endvidere måles kraften i armen ikke, da den er ligegyldig til dette forsøg. I stedet er armen fikseret, så den ikke kan bevæge sig, da dette er nødvendigt for at komme frem til det rigtige resultat.

Måleproceduren er at påtrykke Wave Star armen en spænding, vente til strøm og spænding har stabiliseret sig, for derefter at aflæse spændingen på oscilloskobet og strømmen på multimeteret. Denne procedure gentages med de spændinger, der ønskes resultater for.

### A.2.5 Resultater

Resultaterne for forsøget til bestemmelse af motorkonstanten ses i tabel A.3.

Spænding	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Måling 4	Måling 5	Gennemsnit
[V]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,30	0,38	0,38	0,38	0,38	0,36
0,53	0,82	0,93	0,94	0,91	0,94	0,91
0,80	1,65	1,68	1,67	1,65	1,59	1,65
1,05	2,43	2,35	2,56	2,56	2,78	2,54
1,33	3,82	3,86	3,81	3,60	3,80	3,78
1,62	4,80	4,60	4,68	4,70	4,80	4,72

Tabel A.3: Viser resultaterne for forsøget til bestemmelse af motorkonstanten.

Resultaterne for forsøget til bestemmelse af motorens modstand ses i tabel A.4.

Spænding	Strøm
[V]	[A]
0,77	0,84
1,22	1,85
1,66	3,75
2,1	4,9
2,3	$5,\!6$
2,5	6,8

Tabel A.4: Viser resultaterne for forsøget til bestemmelse af motorens modstand.

### A.2.6 Fejlkilder og usikkerheder

Til forsøget er der den fejlkilde, at der ikke måles direkte på motoren, men i stedet på armen. Derved indeholder målingerne tab fra gear og resten af konstruktionen. Med henblik på usikkerheder, da er der dem, der kommer fra måleudstyrets tolerancer. Endvidere viste der sig at være en usikkerhed ved, at motoren kunne holde et større pres på vægten, hvis der blev gået fra en høj til en lavere spænding. Denne usikkerhed er dog elimineret ved at starte med den mindste spænding og derefter øge spændingen.

## A.3 Målejournal for accepttest af vinkelreguleringen

### A.3.1 Testobjekt

Testobjektet i dette forsøg er Wave Star armen, der er placeret således, at flyderen flyder frit i et kar med vand.

#### A.3.2 Formål

Formålet med denne test er at udføre accepttesten af vinkelregulatoren. Accepttesten benyttes til at vurdere om vinkeregulatoren opfylder de stillede krav. Accepttesten indeholder de forsøg, der er beskrevet i acceptspecifikationen afsnit 5.2 (konstant vinkelfrekvens, frekvenssweep og step).

# A.3.3 Anvendt udstyr

Alt udstyr fra tabel A.1, side 102 er benyttet.

## A.3.4 Måleopstilling og måleprocedure

Måleopstillingen er den samme som for "Målejournal for tilpasning af model", appendiks A.1. Måleproceduren er ligeledes tilsvarende. Der er dog den forskel, at i stedet for at sende styresignaler direkte til motoren, er vinkelregulatoren implementeret på terminalen og det er således regulatoren, der styrer motoren. Med terminalen opsamles det styresignal, som styrer regulatoren, den målte vinkel og spændingen over motoren. Samplingsfrekvensen for styresignaler og dataopsamling er 200[Hz].

Forsøget foretages med styresignalerne: konstant vinkelfrekvens på henholdsvis 0.5[rad/s], 0.6[rad/s], 0.7[rad/s], 0.8[rad/s] og 0.9[rad/s], frekvenssweep fra 0.5[rad/s] til 0.9[rad/s] over 50[s] og et step. Alle styresignaler har amplituden 0.05[rad].

### A.3.5 Resultater

Måleresultaterne for forsøget findes på den vedlagte DVD i mappen "Måleresultater". Måleresultaterne er i formatet .mat, som f.eks. kan analyseres i Matlab.

## A.3.6 Fejlkilder og usikkerheder

Testene har samme fejlkilder og usikkerheder, som "Målejournal for tilpasning af model", appendiks A.1.