

Examensarbete, Högskolan på Åland, Utbildningsprogrammet för elektroteknik

KRAFTMÄTNING AV VINGSEGEL

**- Metod för experimentell mätning av
ett vingsegels lyftkraft**

Niklas Ekman



2022:11

Datum för godkännande: 13.05.2022

Handledare: Matias Waller

EXAMENSARBETE

Högskolan på Åland

| | |
|----------------------------|---|
| Utbildningsprogram: | Elektroteknik |
| Författare: | Niklas Ekman |
| Arbetets namn: | Kraftmätning av vingsegel - Metod för experimentell mätning av ett vingsegels lyftkraft |
| Handledare: | Matias Waller |
| Uppdragsgivare: | |

Abstrakt

Arbetet ger en inblick i processen av att ta fram ett sätt att mäta lyftkraften som ett vingsegel skapar. Utsläppen från sjöfarten kan minskas märkvärt med hjälp av vindassisterad framdrift. Utvärdering av olika sorters segelriggar kommer att behövas för att utveckla dem. I stället för att beräkna lyftkraften utifrån den skenbara vindens hastighet med hjälp av en lyftkraftskoefficient föreslås här en metod baserad på töjningsgivare monterade på masten för att mäta både riktning och storleken av kraften masten utsätts för. Töjningsgivare har monterats i form av två mätbryggor vinkelrätt mot varandra på ett kolfiberrör. En jigg för att kalibrera den instrumenterade masten har konstruerats och använts för att utvärdera metoden. Resultaten visar att medan de två bryggorna har en obefintlig känslighet i tvärriktningen ger deras kombinerade känslighet ändå användbara mätvärden. Slutsatsen är att metoden kan användas för det planerade ändamålet tack vare givarnas linjära karaktäristik som möjliggör en enkel kalibrering av mätutrustningen.

Nyckelord (sökord)

vingsegel, kraftmätning, töjningsgivare

| | | | |
|--------------------------------|--------------|---------------|------------------|
| Högskolans serienummer: | ISSN: | Språk: | Sidantal: |
| 2022:11 | 1458-1531 | Svenska | 75 |

| | | |
|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| Inlämningsdatum: | Presentationsdatum: | Datum för godkännande: |
| 22.04.2022 | 13.05.2022 | 13.05.2022 |

DEGREE THESIS

Åland University of Applied Sciences

| | |
|-----------------------------|---|
| Degree Programme: | Electrical Engineering |
| Author: | Niklas Ekman |
| Title: | Wingsail force measurement - A method for experimentally determining the lift force of a wingsail |
| Academic Supervisor: | Matias Waller |
| Commissioned by: | |

Abstract

This thesis gives an insight into the process of developing a method for measuring the lift force of a wingsail. Emissions from the shipping industry can be reduced remarkably by wind assisted propulsion. Evaluation of different sail rigs will be necessary to develop them further. Instead of calculating the lift force based on the apparent wind speed and a coefficient of lift it is proposed here to use a method of attaching strain gauges on the mast to measure both the direction and magnitude of the force the mast is subjected to. Strain gauges have been mounted as two full bridges perpendicular to each other on a carbon fiber tube. A jig has been constructed for calibration of the strain gauges and evaluation of the method. Results show that despite the strain gauges having a practically non-existent sensitivity in the transverse direction their combined sensitivity still gives usable measurements. The conclusion is that the proposed method can be used for the desired purpose since the linearity of the strain gauges make an easy calibration procedure possible.

Keywords

wingsail, force measurement, strain gauge

| | | | |
|-----------------------|--------------|------------------|-------------------------|
| Serial number: | ISSN: | Language: | Number of pages: |
| 2022:11 | 1458-1531 | Swedish | 75 pages |

| | | |
|-------------------|------------------------------|------------------|
| Handed in: | Date of presentation: | Approved: |
| 22.04.2022 | 13.05.2022 | 13.05.2022 |

INNEHÅLL

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inledning | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.2 | Teoretisk referensram | 3 |
| 1.2.1 | Vingsegel | 3 |
| 1.2.2 | Vingform | 9 |
| 1.2.3 | Aerodynamik | 11 |
| 1.2.4 | Kraftmätning med töjningsgivare vid böjning | 13 |
| 1.3 | Syfte | 18 |
| 1.4 | Begränsningar | 19 |
| 2 | Metod | 20 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Design och konstruktion | 23 |
| 3.1 | Mättekniska lösningar | 24 |
| 3.1.1 | Kalibreringsprogram | 32 |
| 3.2 | CAD-lösningar | 38 |
| 4 | Teoretisk beräkning av givarutslag | 41 |
| 4.1 | Val av belastningsfall | 42 |
| 4.2 | Beräkning med enkelt belastningsfall | 47 |
| 5 | Experiment | 49 |
| 5.1 | Kalibrering | 50 |
| 5.2 | Mätresultat | 53 |
| 5.3 | Analys | 56 |
| 6 | Sammanfattning och slutsatser | 59 |
| A | Kalibrerings- och mätdata | 60 |
| B | Ritningar | 64 |

1. INLEDNING

Enligt (Khan m. fl., 2021) transporteras 90% av världens frakt över havet. I.o.m. att krav på sänkta utsläpp ökar måste utsläppen naturligtvis minskas även inom shipping. Man ser på olika sätt att minska utsläppen av växthusgaser och konstaterar att hybrida driftsätt som kombinerar vind och förbränning av fossila bränslen kan minska utsläppen med över 30%. Det konstateras att framdrift med hjälp av vinden kommer att vara en del av framtiden eftersom detta har den största långsiktiga potentialen för att sänka utsläppen.

1.1. Bakgrund

Projektet Oceanbird som utvecklas av ett gemensamt företag mellan Wallenius Marine och Alfa Laval tar steget ännu längre och planen är att bygga ett helt vinddrivet fartyg (Wallenius Marine, 2021).



Figur 1.1: Oceanbird (Wallenius Marine, 2021)

Vingsegel har enligt (Milić Kralj & Klarin, 2016) möjligheten att uppnå högst kvot mellan lyftkoefficient och vindmotstånd av de segelriggar som jämförts och är därför de mest intressanta att användas på en båt eller ett fartyg när alternativa driftsätt utvärderas.

Det är inte helt överraskande att man t.ex. oftast väljer ett vingsegel även när det handlar om robotsegelbåtar (Enqvist, 2016).

Eftersom det antagligen kommer att byggas en hel del båtar med vingsegel i framtiden är det intressant att ta reda på hur riggarna fungerar i praktiken. Vilka givare ger relevanta signaler med tanke på styrning och övervakning och vilka data hjälper till att ta fram bättre modeller av riggarna.

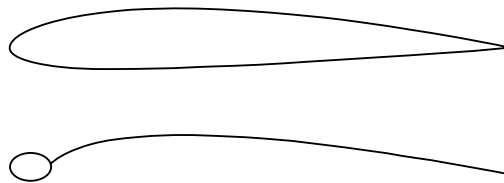
Min egen motivation till att välja ett projekt som anknyter till just vingsegel är mitt långvariga seglingsintresse och förhoppningar om att kunna kombinera det i arbetslivet med intresset för mät- och reglerteknik som jag utvecklat under

studierna.

1.2. Teoretisk referensram

1.2.1. Vingsegel

Ett vingsegel har per definitionen på (Wikipedia contributors, 2021b) dubbla symmetriska ytor som bildar en vinge jämförbar med en flygplansvinge. Detta till skillnad från det s.k. vanliga seglet som endast skapar en halv vingform ovanifrån sett.

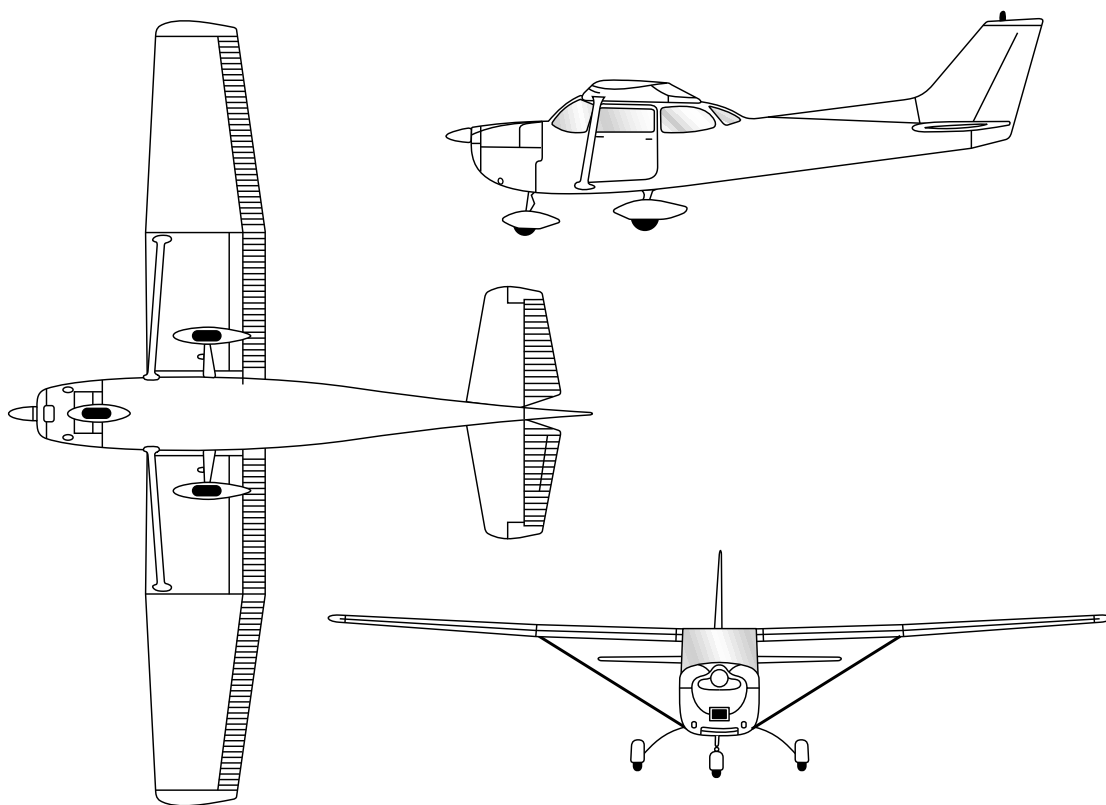


Figur 1.2: Profiler för en flygplansvinge, (ovan) och ett konventionellt segel samt mast (under).

När det kommer till att jämföra flygplansvingar med vingsegel är det viktigt att beakta den relativa vindhastigheten, d.v.s. vingens hastighet jämfört med den omgivande luftens, som vardera upplever. På grund av förhållandet mellan krafter som motverkar förändringar (tröghet) och friktion (viskositet) hos luften (Benson, 2021) som beskrivs av ekvation 1.2 beter sig en vinge på olika sätt beroende på hastigheten.

Relativa vindhastigheter för flygplan är ofta långt mycket högre än för vingsegel.

En Cessna 172, i figur 1.3, har en *stallhastighet* på 47 knop, c.a. 87 km/h eller 24 m/s, med fullt utslag på vingklaffarna (Wikipedia contributors, 2022a). Detta betyder att vingen är inställd för största möjliga lyftkraft och att planet inte längre kan öka flyghöjden utan att höja farten (Wikipedia contributors, 2022c). Det är ungefär samma hastighet som hastighetsrekordet för en AC72 tävlingskatamaran (fig. 1.4) (Wikipedia contributors, 2021a). Den normala marschfarten för Cessnan, som definitivt inte är något fartvidunder när det kommer till flygplan, är däremot 125 knop, c.a. 232 km/h eller 64 m/s.



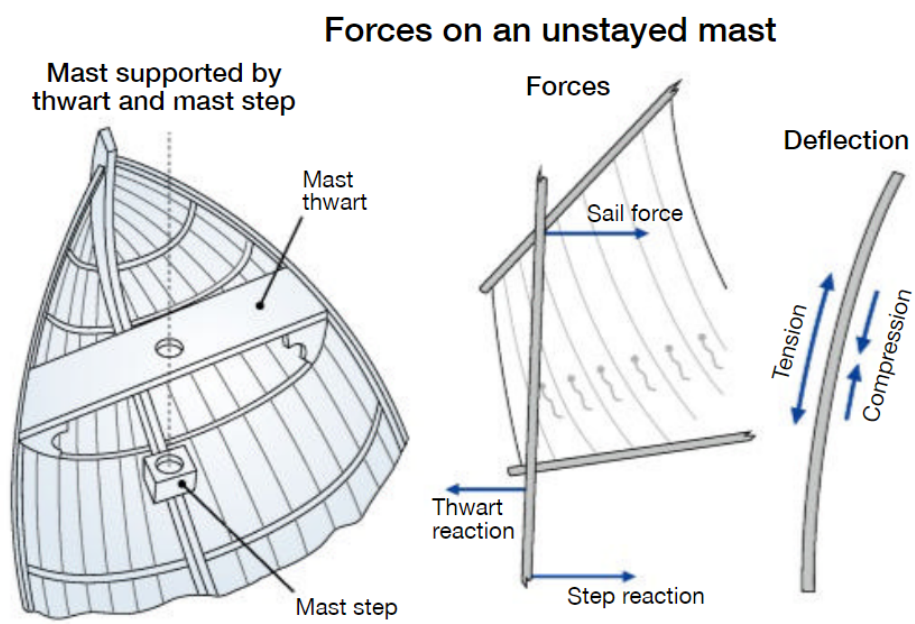
Figur 1.3: Cessna 172 (Murmman, 2018)



Figur 1.4: Emirates Team New Zealands AC72 Aotearoa i San Franciscobukten (Wikipedia contributors, 2021a)

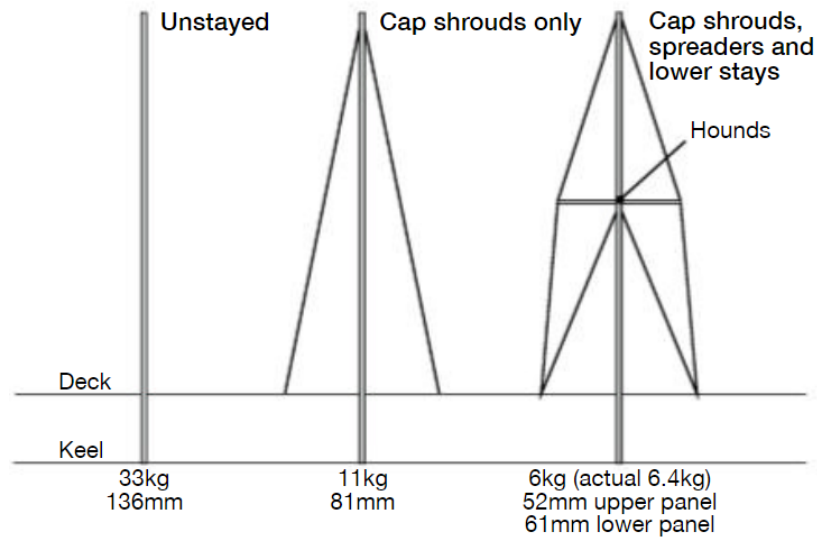
För en båt med ett vingsegel på en ostagad mast gäller det att all kraft från seglet överförs till skrovet via masten. Som jämförelse är den mer vanliga förekommande bermuda- eller marconiriggade segelbåten (figur 1.6 t.v.) utrustad med en mast som spänns mot skrovet m.h.j.a. vant i tvärskeppsriktningen som försätter masten under kompression i höjdlid, och stag längdskepps som fördelar de längdskeppsriktade krafterna till skrovet. Då fördelas kraftöverföringen till skrovet inte bara mellan masten, stagen och vanten utan också i viss mån skoten. Mätmetoden som presenteras i detta arbete kunde genomföras på en sådan rigg med flera givare, men för ett vingsegel är riggtypen ointressant.

En ostagad mast fästs i nedre ändan i en mastfot monterad på kölstocken och får stöd av däcket och ofta förstärkta däcksbalkar vid däcksgenomföringen. En skiss över hur detta ser ut i en traditionell klinkerbyggd båt liknande skötbåtar ses i figur 1.5 till vänster.



Figur 1.5: Infästning av en ostagad mast (vänster), seglets lyftkraft och reaktionskrafter i skrovet (mitten), mastens böjning (höger) (Brown, 2021)

How rig type effects mast weight



Figur 1.6: Ostagad mast (vänster), mast med vant (mitten), marconirigg med toppvant, spridare och undervant (höger). (Brown, 2021)

Ostagade master på segelfarkoster är f.ö. inget nytt. Som ett exempel är djonkriggen som i sin havsgående form togs fram i Kina under 1000-talets Song-dynasti (Wikipedia contributors, 2022b). Orsaken till riggens popularitet är att kraften som krävs för att hantera den är liten, vilket i sin tur leder till att man klarar sig med en mycket liten besättning i förhållande till segelarean (Hasler & McLeod, 2015).



Figur 1.7: Djonkriggade båtar i Lamma Channel, Hong Kong (Macgregor, 1974)

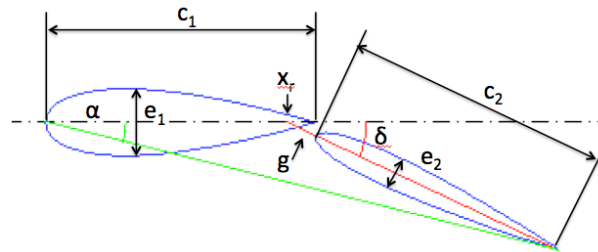
En av orsakerna till att vingseglet är ostagat är att själva masten behöver kunna roteras, och seglet med den, för att ge seglet en önskad attackvinkel mot vinden. Med en vanlig marconirigg skapas storseglets form genom spänning i storskotet, vilket i sin tur kräver att masten är stagad för att motverka denna spänning. Ett

vingsegel håller formen tack vare sin konstruktion vilket är en annan orsak till att masten inte behöver stagas. En ytterligare fördel med segel på ostagade master är att de söker sig till ett neutralt läge när man låter dem svänga fritt i vinden. Seglet har då mycket litet vindmotstånd och detta blir ett effektivt sätt att ”släcka” seglet.

En sorts mellanting mellan ett vingsegel och ett vanligt segel är en vingmast. Mastens profil är då ellips- eller droppformad och den går att rotera. Aerodynamiskt är detta bättre jämfört med en marconirigg eftersom luftströmmen inte störs lika mycket av masten och skapar då ett mindre luftmotstånd. Denna lösning hittas ofta på tävlingskatamaraner och då med en stagad mast som i mitten av figur 1.6. Masten kan inte roteras helt fritt men för de små attackvinklar som seglas med katamaranerna är det tillräckligt. Även lösningar med helt fristående vingmaster som kan roteras har prövats av t.ex. (Sponberg, 2000).

1.2.2. Vingform

Vingformen som har valts som utgångspunkt i detta arbete är baserad på klassregeln för America's Cup 72. Båtarna är utrustade med ett tvåkomponents vingsegel och kombinerat med bärplan kan de bokstavligen segla fortare än vinden. En utförlig analys av riggen finns i (Chapin m. fl., 2015), men framförallt intressant för detta arbete är att rapporten inleds med en detaljerad beskrivning av vingseglets geometri som ses i figur 1.8.



Figur 1.8: AC72 katamaranens vingsegelgeometri (Chapin m. fl., 2015)

Vingen består av ett främre element med vingprofilen NACA 0025 och ett bakre element med profilen NACA 0012. En detaljerad beskrivning av NACA-profiler finns i (Enqvist, 2016) men för detta arbete är de mest väsentliga egenskaperna att de två inledande nollorna i profilens kod betyder att det handlar om symmetriska profiler. De två sista siffrorna anger profilens maximala bredd i procent av vingelementets längd. Det främre elementet är således ungefär dubbelt så brett som det bakre.

En viktig egenskap i seglets konstruktion som främst påverkar dess stallkaraktär är mellanrummet mellan det främre och det bakre elementet. I (Chapin m. fl., 2015) påvisas det ett olinjärt förhållande mellan vindmotståndet, lyftkraften och mellanrummets storlek. I CFD-simuleringar har det visat sig att seglet tappar lyftförmågan mer abrupt när det bakre elementets vinkel i förhållande till det främre är liten. När vinkeln är större blir även mellanrummet större vilket gör att det kommer in en färsk laminär luftström som följer den övre sidan av det bakre elementet där det i det förstnämnda fallet bildas en turbulent luftström.

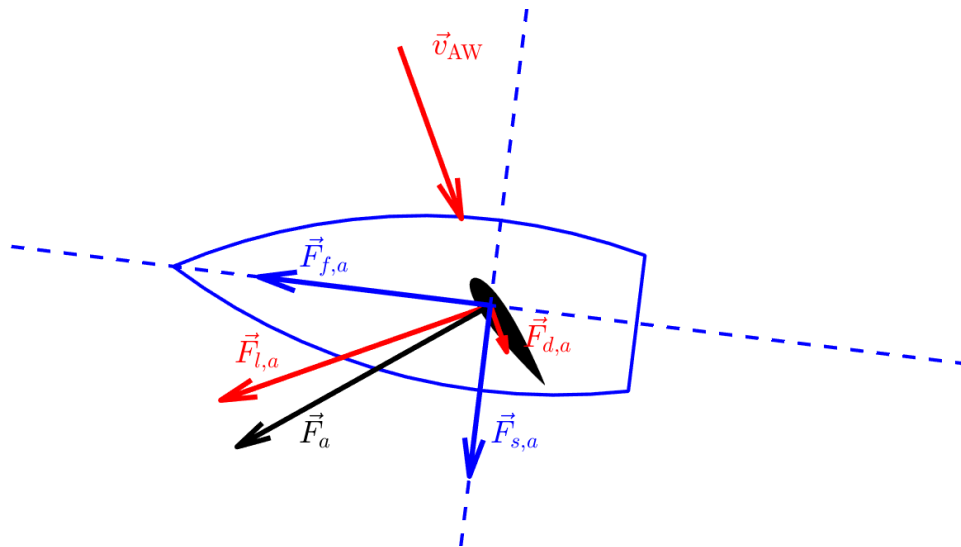
1.2.3. Aerodynamik

Ett segel, en flygplansvinge eller ett vingsegel skapar en lyftkraft som är beroende på dess form, den relativa hastigheten i förhållande till fluiden (i detta fall luften) och attackvinkeln mot flödet.

Den totala framdrivande kraften för båten påverkas även av en komponent som skapas av kölen. Denna kompenserar för seglets kraft i sidled och motverkar den framdrivande komponenten från seglet.

Kölens lyftkraft skapas av att båten inte färdas i stävens riktning utan mer eller mindre driver sidledes. Detta gör att kölen har en attackvinkel λ mot vattnet, precis som seglet har en attackvinkel α mot vinden (Waller m. fl., u. å).

Seglets lyftkraft gör att båten kränger tack vare den hävarm som verkar från seglets aerodynamiska centrum.



Figur 1.9: Skenbar vind \vec{v}_{AW} , aerodynamisk kraft \vec{F}_a och dess komponenter lyftkraften $\vec{F}_{l,a}$ samt vindmotståndet $\vec{F}_{d,a}$, framdrivande kraft från seglet $\vec{F}_{f,a}$ och sidkraften $\vec{F}_{s,a}$ (Waller m. fl., u. å)

Ekvation 1.1 kan användas för att beräkna seglets lyftkraft utifrån luftens densitet ρ_a , den skenbara vindens hastighet v_{AW} , vingens area A_s och lyftkoefficienten C_l för vingprofilen (Waller m. fl., u. å). Värt att märka är att A_s inte är vingens ytarea utan arean av dess silhuett (Enqvist, 2016).

$$F_{l,a} = \frac{1}{2} \rho_a C_l A_s v_{AW}^2 \quad (1.1)$$

C_l tas fram antingen experimentellt i vindtunnel eller genom simulering vid olika attackvinklar av vingen mot luftströmmen. Koefficienten gäller för ett visst Reynoldstal, Re , som kan ses som en skalfaktor (Enqvist, 2016) som beaktar en karakteristisk dimension som oftast är vingens längd i tvärsnittet L , fluidens hastighet v och fluidens dynamiska viskositet μ (Waller m. fl., u. å).

$$Re = \frac{vL}{\mu} \quad (1.2)$$

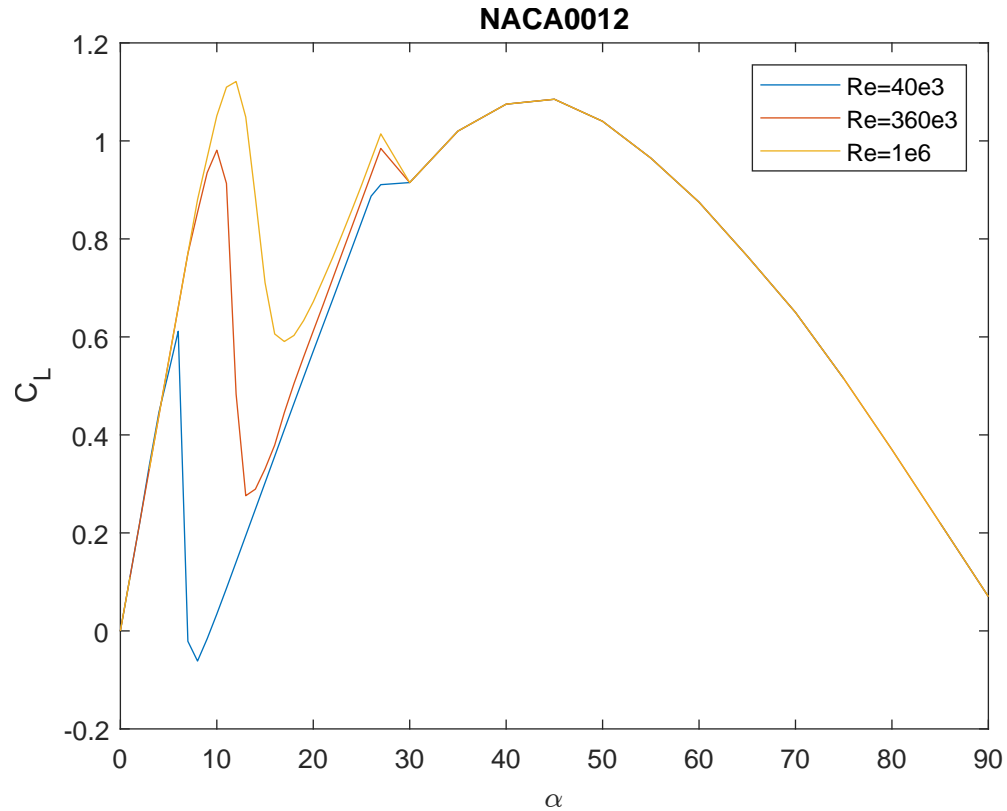
Genom att bryta ut v ur ekv. 1.2 och med insättning av L , μ och Re som motsvarar vingen i fråga, de rådande väderomständigheterna och Reynoldstalet som C_l beräknats vid fås den skalenliga hastigheten.

För en mindre vinge än den som experimentet utförts med, givet samma μ och Re , fås en högre hastighet. Egentligen är det då endast denna hastighet som C_l kan förväntas stämma vid.

Vid små Re , i ordningen 50 000 till 500 000, har man fått ett förhållandevis mindre C_l än vid större Re för samma vingprofil (Enqvist, 2016). Därför är det inte godtyckligt vilken tabell över C_l för en given profil som används som grund när ekv. 1.1 används för att räkna ut lyftkraften för ett vingsegel.

I (Sheldahl & Klimas, 1981) finns tabeller för olika NACA-profiler vid olika Re . I figur 1.10 nedan jämförs C_l för profilen NACA0012 vid Re 40 000, 360 000

och 1 000 000.



Figur 1.10: C_L som funktion av attackvinkel α för olika Re

Kurvorna är lika för α under 6° och över 30° . Vingseglen används ofta med små attackvinklar och det är inte orimligt att attackvinkeln kunde ligga mellan 10° - 13° , där skillnaden är som störst mellan kurvorna.

1.2.4. Kraftmätning med töjningsgivare vid böjning

När en kropp böjs som resultat av påverkan från en yttre kraft töjs en sida ut medan den motsatta trycks ihop. Detta betyder en längdändring som på den ena sidan är positiv och negativ på den motsatta sidan. Töjningen uttrycks som ett

enhetslöst tal ε som beskriver förhållandet mellan längdförändringen Δl och den ursprungliga längden l (ekv. 1.3) (Lindahl & Sandqvist, 1996).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1.3)$$

Ett annat uttryck för ε än det i ekv. 1.3 ses nedan i ekv. 1.4. Elasticitetsmodulen E är en materialkonstant som är känd för t.ex. olika stållegeringar. För kompositmaterial såsom en kolfibermast är detta en osäker parameter eftersom den då beror på konstruktionssättet och använda material.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1.4)$$

Kroppen som böjs utsätts för en inre spänning σ som är förhållandet mellan böjmomentet M_b som den yttre kraften skapar och böjmotståndet W_b som beror på kroppens geometri i tvärsnittet (ekv. 1.5).

$$\sigma = \frac{M_b}{W_b} \quad (1.5)$$

Om masten exempelvis är fastspänd i ena ändan och belastas med en punktlast F i den fria ändan kan ekvation 1.6 nedan användas för att få ut M_b .

$$M_b = Fl \quad (1.6)$$

För ett rör såsom masten i detta arbete beskrivs W_b av ekvation 1.7 där d_1 är den inre diametern och d_2 är den yttre diametern.

$$W_b = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2} \quad (1.7)$$

Så länge som förhållandet mellan σ och ε är linjärt kan utböjningen δ bestämmas med lätthet. För samma belastningsfall som för ekv. 1.6 ges δ av ekv. 1.8. Samma ekvation kan användas för att uppskatta E utifrån experimentell data. Tröghetsmomentet I_x för ett rör i längdriktningen ges av ekvation 1.9.

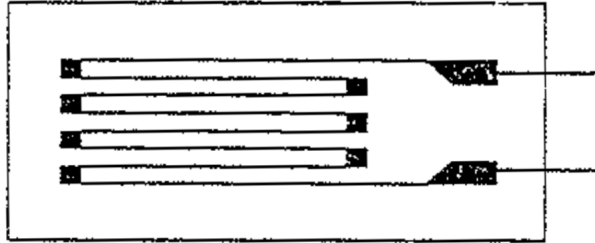
$$\delta = \frac{Fl^3}{3EI_x} \quad (1.8)$$

$$I_x = \frac{\pi}{64}(d_2^4 - d_1^4) \quad (1.9)$$

En töjningsgivare består av en tunn metalltråd mellan två tunna plastskikt. Givaren limmas på objektet vars töjning man önskar mäta. Underlagets längdförändring kommer att kunna avläsas som en ändring i metalltrådens resistans. Förhållandet mellan den ursprungliga resistansen R och förändringen i resistans ΔR kallas den relativa resistansförändringen r .

$$r = \frac{\Delta R}{R} \quad (1.10)$$

De givare som används i detta arbete är av en typ som kallas folietöjningsgivare. I stället för tråden har man använt en metallfolie med ett mönster som kan ses i figur 1.11. En givare orienterad såsom den i figuren är tillverkad för att vara mest känslig för töjning i sidled, d.v.s. vågrätt i bilden. Enligt (Lindahl & Sandqvist, 1996) har töjningsgivarna väldigt liten känslighet i tvärriktningen, bara några procent av huvudriktningen.



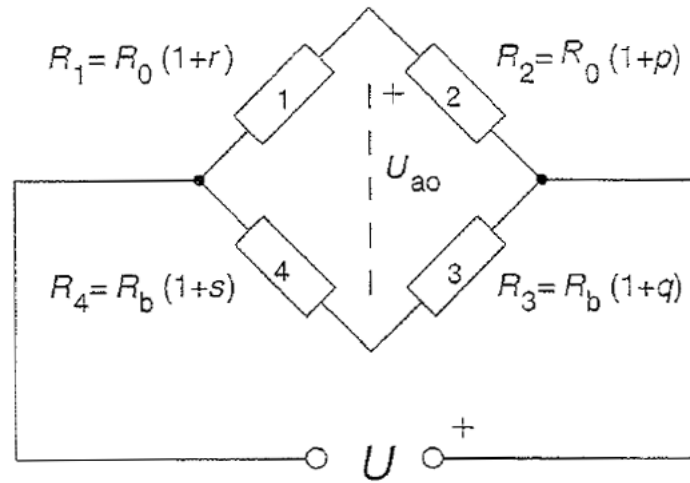
Figur 1.11: Folietöjningsgivare (Lindahl & Sandqvist, 1996)

Förhållandet mellan r och töjningen ε från ekvation 1.3 ger givarfaktorn k .

$$k = \frac{r}{\varepsilon} \quad (1.11)$$

Givaren har en temperaturkänslighet som beror på metalltrådens materialegenskaper. Längdförändringen som ska mätas är väldigt liten vilket också ger en väldigt liten ändring i resistans. För att kunna använda töjningsgivare i praktiken kopplas de i en bryggkoppling som både råder bot på problemet med temperaturkänsligheten och ökar förstärkningen av givarutslaget. Helst kopplas fyra givare i bryggan för att få 4 gångers förstärkning och temperaturkompensering.

I figur 1.12 är givarna representerade som motstånden 1 till 4. Givare 1 och 3 placeras bredvid varandra på en sida av mätobjektet och givare 2 och 4 placeras på den motsatta sidan så att givare 2 är under givare 1 och givare 4 är under givare 3. R_0 och R_b är givarnas nominella resistans och i fallet att alla givare är av samma typ kan det förutsättas att $R_0 = R_b$. r , p , q och s är förändringen i resistans tack vare töjningen för de fyra givarna. Med en känd matningsspänning U kan obalansspänningen U_{ao} beräknas med ekvation 1.12 förutsatt att r , p , q och s är små (Lindahl & Sandqvist, 1996).



Figur 1.12: Bryggkoppling med fyra givare (Lindahl & Sandqvist, 1996)

$$U_{ao} \approx \frac{U}{4}(r + q - p - s) \quad (1.12)$$

Om r och q ger ett lika stort positivt utslag och både p och s ger ett negativt utslag av samma storlek kan uttrycket förenklas ytterligare till

$$U_{ao} \approx Ur \quad (1.13)$$

Med en brygga som beskrivs ovan kan man få fram böjningen av masten i en riktning, antingen transversellt eller longitudinellt. Två bryggor måste monteras vinkelrätt mot varandra för att kunna mäta i båda riktningarna samtidigt. Problem kan förväntas med att använda enkla töjningsgivare för att mäta böjning diagonalt mellan de två bryggorna eftersom givarna har begränsad känslighet sidledes. Detta förväntas dock kunna kalibreras bort.

Obalansspänningen U_{ao} från bryggan är fortfarande väldigt liten i förhållande till

matningsspänningen U . Det handlar vanligen om några mV för U_{ao} då U är kring 5 V. En förstärkare behövs därför och de används oftast tillsammans med en AD-omvandlare, i sin tur kopplad till en mikrokontroller.

1.3. Syfte

I arbetet ligger fokus på att göra det möjligt att undersöka seglets bidrag till den totala framdrivande och krängningsskapande kraften. Skrovets och kölens bidrag tas inte i beaktande.

Som det i kapitel 1.2.3 framkommer är det inte helt problemfritt att förlita sig på lyftkraftsberäkningar m.hj.a. ekv. 1.1. Kurvorna i fig. 1.10 stämmer bara för ett vingsegl bestående av ett vingelement. Konstrueras seglet av flera element behövs data om hela seglets egenskaper som inte direkt går att härleda från kurvorna för enskilda element. Skilda kurvor behövs också för olika relativa vinklar mellan det främre och det bakre elementet.

En enkel tvådimensionell modell som beskriver båten med köl och seglet vid fortfarighet såsom den som nämnts tidigare under avsnitt 1.2.3 kan inte svara på frågor om vad som händer i en verklig situation när båten kränger. En modell som tar detta i beaktande blir mer komplex och syftet för arbetet är att ta fram en mätmetod som kan ge svar på vad som händer ovanför vattenytan genom experimentell mätning av kraften från seglet.

Med instrumentering av masten kan kraften seglet skapar mätas direkt till skillnad från att förlita sig på skenbar vindriktning och hastighet samt C_L och C_D tabeller.

Tabellerna tar inte heller i beaktande andra rådande omständigheter och beräkning av seglets bidrag till krängning eller krängningens bidrag till seglets

lyftkraft går inte att härleda direkt från dem.

För segeldrivna farkoster finns det en optimal krängningsvinkel, undersökt av (Pennanen m. fl., 2016), och upprätthållandet av denna kunde göras noggrant med hjälp av mätmetoden som presenteras i arbetet. Dessutom är det för bemannade farkoster till en början en bekvämlighetsfråga med en för stor krängningsvinkel och för fraktfartyg blir denna snabbt en säkerhetsrisk.

1.4. Begränsningar

Arbetet begränsas till mekanisk konstruktion och uppbyggnaden av tillhörande mätsystem. Mer specifikt läggs tyngdpunkten på att bygga och analysera utrustningen för att kalibrera töjningsgivarna på masten.

Utrustningen för att göra egentliga mätningar, mätriggen, har planerats. Inga mätningar med denna utrustning utförs inom ramen för arbetet. Den ursprungliga planen omfattade förhoppningar om att kunna utföra mätningar även med seglet. Men p.g.a. omfattningen av de teoretiska och praktiska momenten för enbart kalibreringen var fortsatta mätningar tidsmässigt inte möjliga att genomföra och analysera.

2. METOD

Arbetet inleds med ett planeringsskede genom att göra en 3D CAD-modell av ett vingsegel och två olika anordningar för mätningar. En för att kalibrera töjningsgivarna på masten och en för att utföra själva kraftmätningarna.

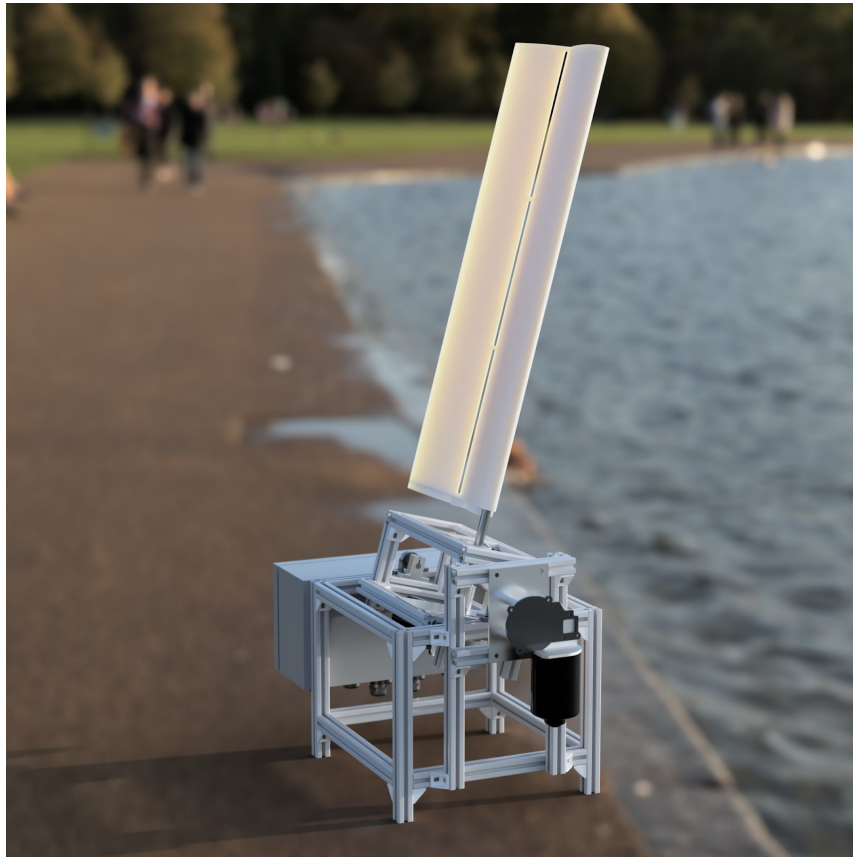
Masten består av ett kolfiberkompositrör och töjningsgivare monteras på denna. För kalibrering behövs en speciell anordning, *jigg*, vars konstruktion ses i figur 2.1. I denna kan masten böjas åt fyra olika håll genom att hänga upp en känd vikt fäst i röret via ett block. Genom att läsa av alla givare när röret endast böjs åt ett håll i taget kan möjliga fel i mätningarna kalibreras bort.

Metoden med töjningsgivare på masten är inspirerad av mätningar gjorda i (Pellicoli & Petrone, 2010) där krafterna mättes för en segelbåt klass 420 med syftet att göra mer noggranna hållfasthetsberäkningar.



Figur 2.1: Visualisering av kalibreringsjigg för töjningsgivare

Själva seglet och en artikulerad plattform, s.k. mätrigg, är också planerade att konstrueras (fig. 2.2). Masten kan roteras, vingseglets bakre element kan vinklas i förhållande till det främre och hela seglet kan roteras horisontellt för att simulera krängning. Seglet är konstruerat helt genom 3D-utskriften.



Figur 2.2: Visualisering av mätrigg

För att programmatiskt kunna artikulera mätutrustningen behövs servomotorer med tillräckligt vridmoment. Dessa är konstruerade utav likströmsmotorer med snäckväxel som ger hög utväxling och liten möjlighet till att drivas i backriktningen, vilket får komponenterna att hålla sin position trots yttre påfrestningar. En vanligt förekommande sådan kombination av motor och växellåda finns i vindrutetorkare för bilar. Motorerna är kopplade till en 12 V drivenhet och den utgående axeln är försedd med en magnetisk encoder. Detta kombinerat med en mikrokontroller som sköter positionsregleringen blir en billig och framförallt effektiv servostyrning.

3. DESIGN OCH KONSTRUKTION

Processen av att planera och bygga utrustningen har omfattat en markant del av tidsåtgången i arbetet. Medan kalibreringen tog ett par eftermiddagar slukade det förutnämnda månader. Därför anses en beskrivning av hur det hela gick från plan till förverkligande vara viktig och förhoppningsvis intressant.

De mekaniska lösningarna för mätutrustningen är framtagna med hjälp av Autodesk Fusion 360 och en FDM 3D-skrivare. Vingen är förutom servomotorn och masten framställd som en 3D-utskrift. Arbetet med de mekaniska lösningarna kring seglet har avsiktligt valts att förverkligas med denna s.k. *rapid prototyping*-teknik för att iterativt kunna söka fram en optimal design.

Arbetsättet har m.a.o. varit att rita 3D CAD-modeller som sedan skrivits ut med 3D-skrivaren varefter justeringar av modellen har gjorts innan nästa iteration av 3D-utskriften. Exempelvis är kugghjul relativt svåra att skriva ut med en FDM-skrivare eftersom de första lagren av plast sjunker ihop och blir bredare än vad som avsetts. Detta kan i begränsad mån motverkas i *slicer*-programmet. Men det mest effektiva sättet är att helt enkelt fasa kanterna som kommer att ligga mot utskriftsytan i 3D-modellen.

Prototyper av servostyrningen av mätriggen har byggts enligt samma princip som vingen; en iterativ process som förutom det mekaniska även omfattat design av en regulator för servons position.

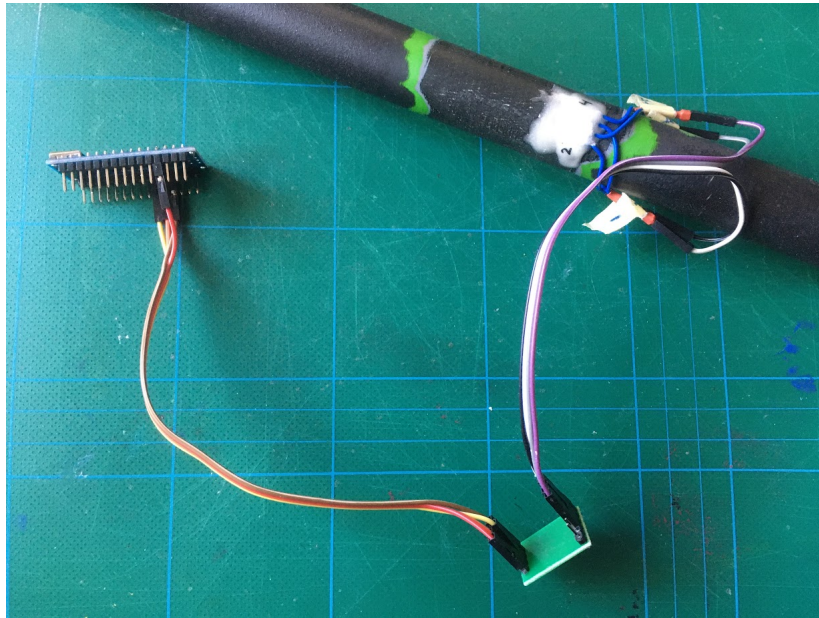
De följande underrubrikerna behandlar processen i större detalj.

3.1. Mättekniska lösningar

En första prototyp av en mätbrygga på ett kolfiberrör gjordes i ett tidigt skede för att försäkra att den praktiska delen av projektet överhuvudtaget skulle kunna genomföras. I denna prototyp användes en brygga bestående av fyra töjningsgivare. De slutliga mätningarna skulle behöva två mätbryggor med sammanlagt åtta givare monterade vinkelrätt mot varandra som det konstaterats i avsnitt 1.2.4.

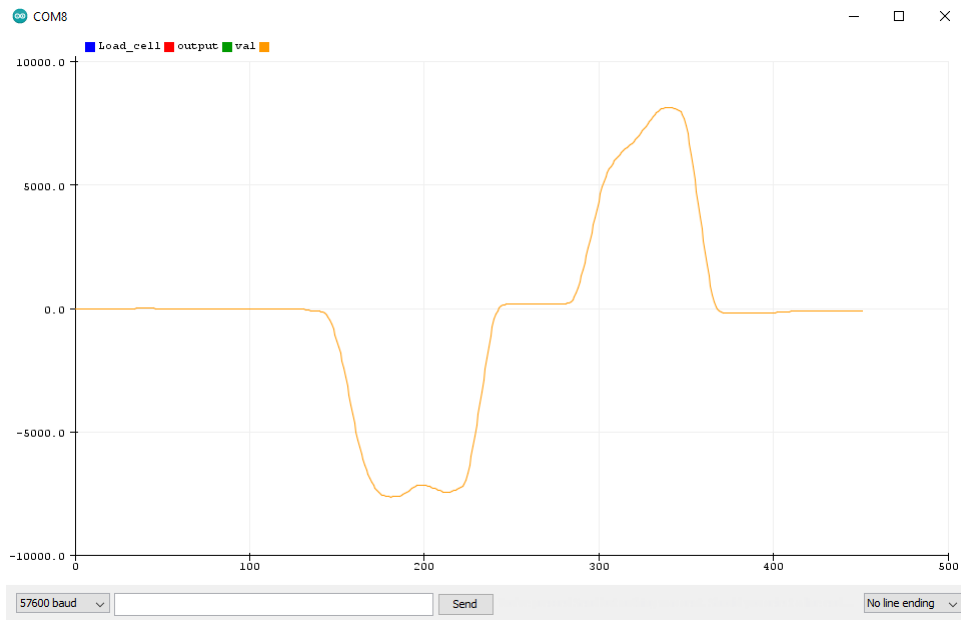
Kolfiberröret för prototypen fanns i form av en sektion av ett teleskopmetspö. Färgen slipades bort där bryggan skulle fästas och ett tunnt lager epoxy ströks på. När härdningen börjat och ytan blivit klabbig lades töjningsgivarna på plats. Efter några minuter när epoxyn stelnat löddes ledare till kontaktytorna på givarna. Innan epoxyn under givarna härdat helt ströks ett nytt tjockare lager över givarna för att skydda dem och som avlastning för ledarna. Resultatet kan ses i figur 3.1.

Ett HX711-förstärkarchip på ett färdigt kretskort användes för att få in mätdata till en arduinokompatibel mikrokontroller som i sin tur skickade vidare data till en dator via seriell kommunikation över USB.



Figur 3.1: Prototyp av mätbrygga kopplad till HX711-chip och mikrokontroller

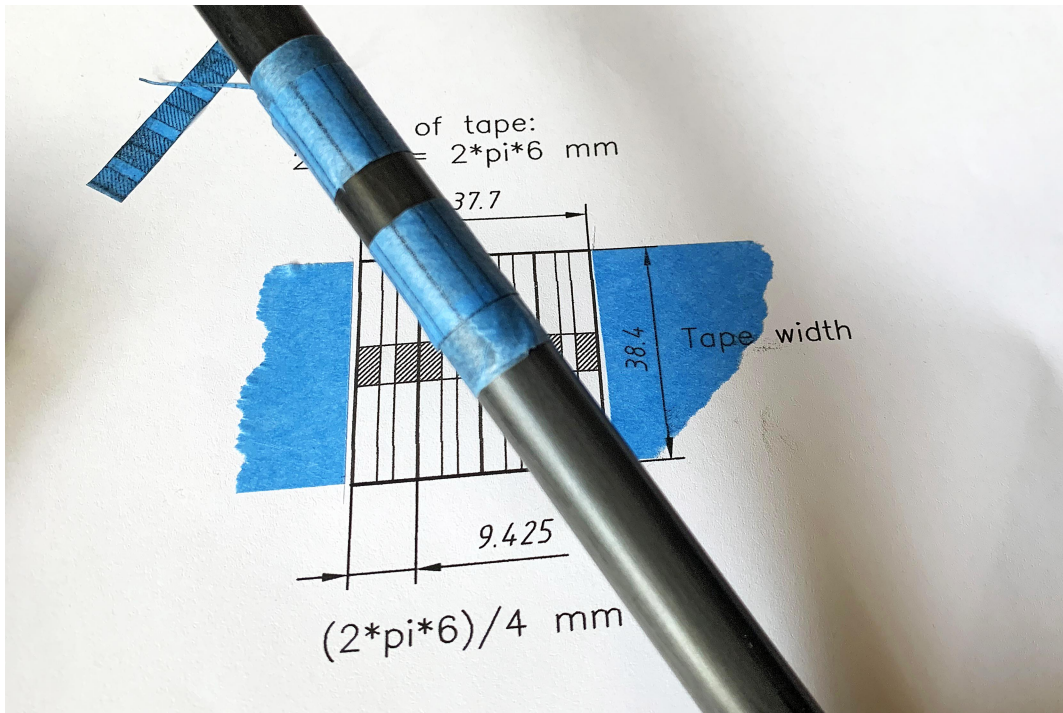
I figur 3.2 nedan ses det första testet av mätbryggan. När röret böjdes åt ena hållet gav HX711-chipet positiva värden och vid böjning åt motsatta hållet erhöles negativa värden.



Figur 3.2: Okalibrerade mätvärden från prototyp av mätbrygga på kolfiberrör som funktion av inlästa samplingsar

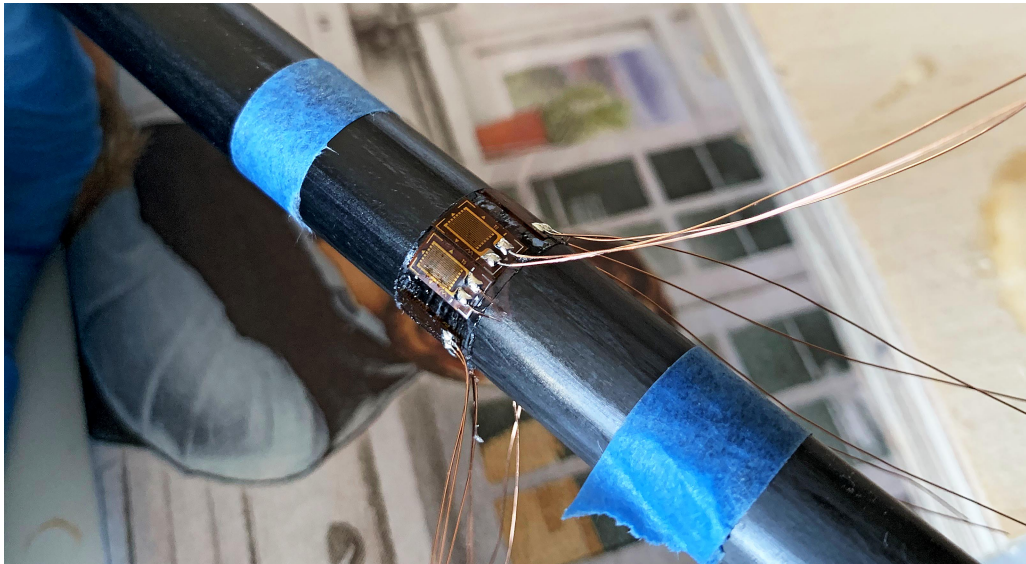
För den slutliga versionen användes ett tunnare kolfiberrör och fysiskt mindre töjningsgivare. Givarna hade en lägre nominell resistans på 120Ω jämfört med prototypens 350Ω . Resonemanget bakom valet var att givare med lägre resistans är mindre känsliga och eftersom det tunnare röret töjs och komprimeras mer vid böjning när det påverkas av samma kraft jämfört med det tjockare röret skulle de mindre känsliga givarna ändå ge goda resultat.

För att få en så noggrann positionering av givarna som möjligt skrevs en mall ut på en bit maskeringstejp med hjälp av en bläckstråleskrivare. Som kan ses i figur 3.3 fästes tejpbiten på röret och mittenpartiet där givarna skulle sitta skars loss med en skalpell. Hatchmarkerade områden på mallen visar var givarna ska sitta.



Figur 3.3: Mall för positionering av givare

Givarna fästes med epoxy som på prototypen (fig. 3.4 och 3.5). De mindre givarna hade färdigt fastlödda tunna ledare av lackad koppartråd vilket var tacksamt då de inte behövde utsättas för värme efter monteringen.



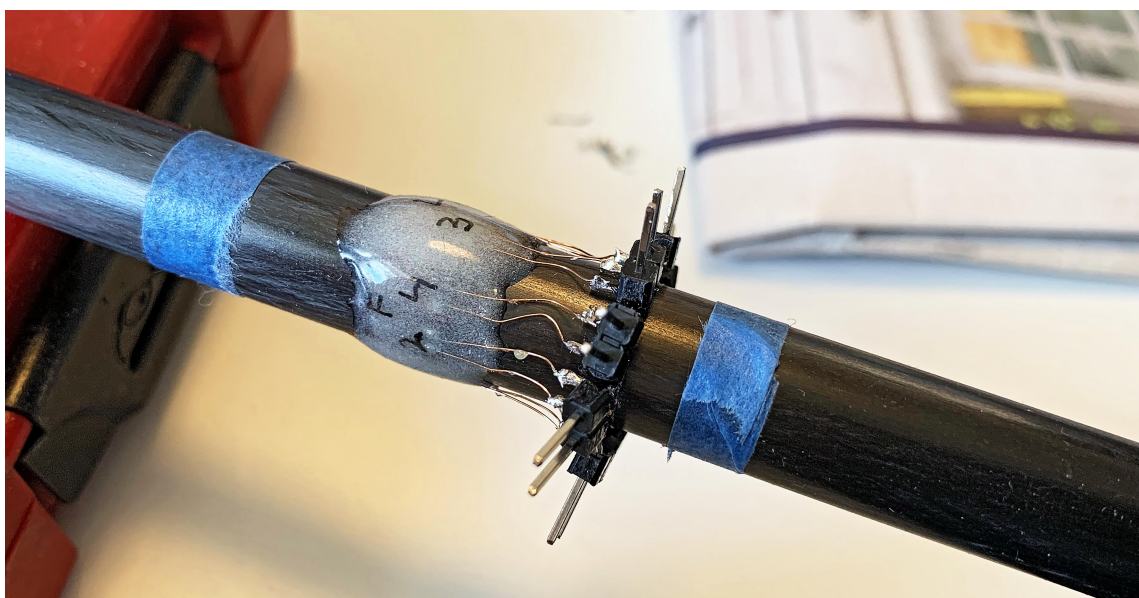
Figur 3.4: Töjningsgivarna fastlimmade



Figur 3.5: Ett skyddande epoxylager har applicerats på givarna

Eftersom även denna version av masten kan konstateras vara en sorts prototyp monterades bitar av en stiftlist i ändorna på koppartråden från givarna. Detta gjorde det möjligt att mäta givarnas nominella resistans för att se att de fortfarande var hela utan att klämma sönder eller dra av koppartråden.

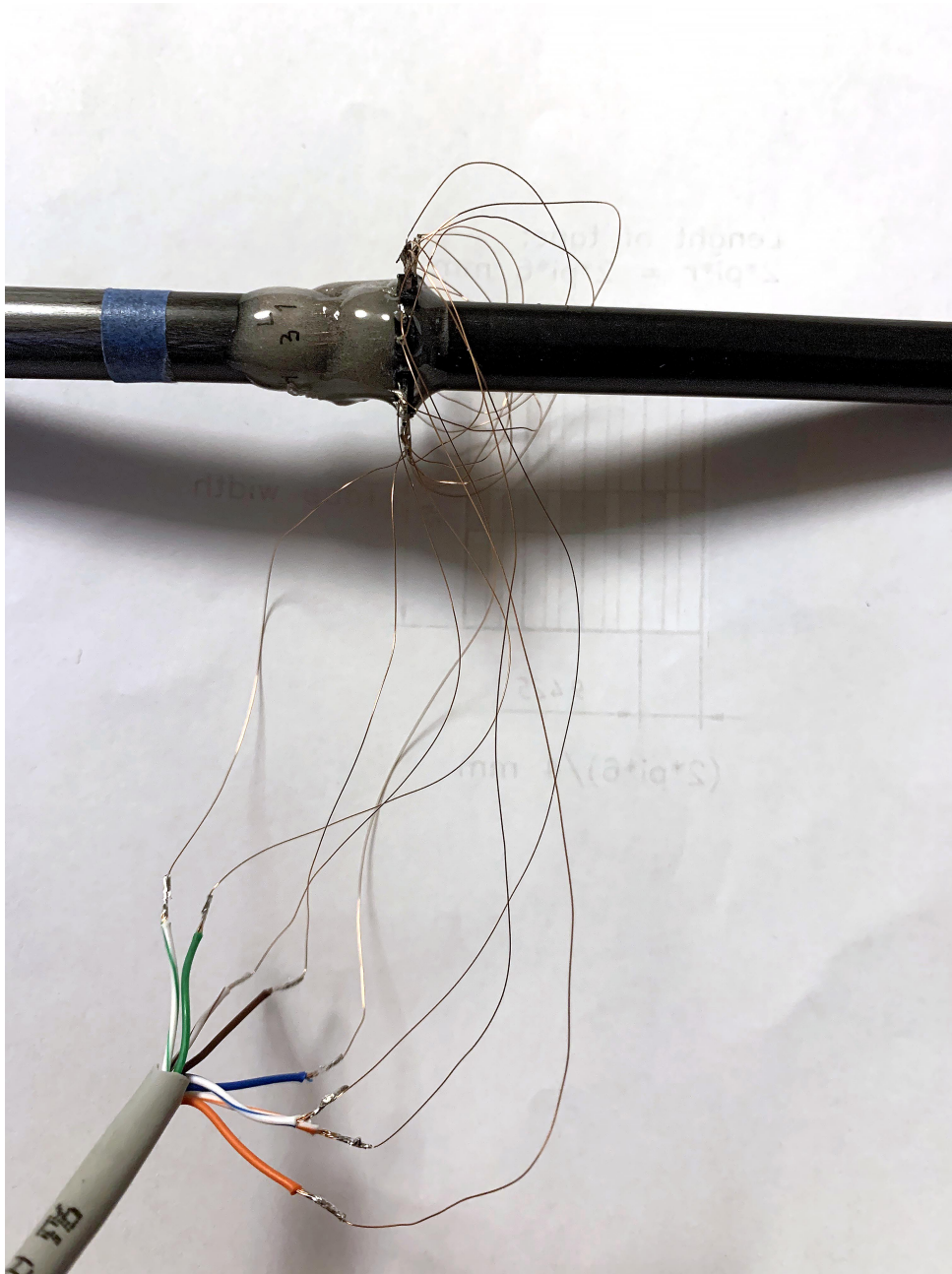
Ett försök med att koppla mätförstärkarchipet till bryggans stift med s.k. dupont-kontakter gjordes också. Det visade sig däremot att fjäderkraften i kontakterna inte var tillräcklig och det uppstod variationer i resistansen när röret böjdes. Detta gjorde att mätvärdet inte återvände helt efter en böjning utan det blev ett olika stort bestående fel beroende på hur röret böjdes. Denna metod användes i den första prototypen, men visade sig inte fungera alls i detta fall.



Figur 3.6: Kontakter gjorda av stiftlist fästa på masten

Givarna kopplades därför ihop till två bryggor och sedan vidare till två mätförstärkare med lackad koppartråd. För den sista biten fram till kretskorten användes en bit CAT-5 nätverkskabel som har tvinnade ledare, figur 3.7. I fortsättningen kunde det vara bra att använda ett flexibelt mönsterkort på vilket

bryggkopplingen görs och limmas på masten såsom givarna. Då skulle man bli av med trådhärvan och kontakterna kring givarna.



Figur 3.7: Bryggan kopplad med lackad koppartråd

3.1.1. Kalibreringsprogram

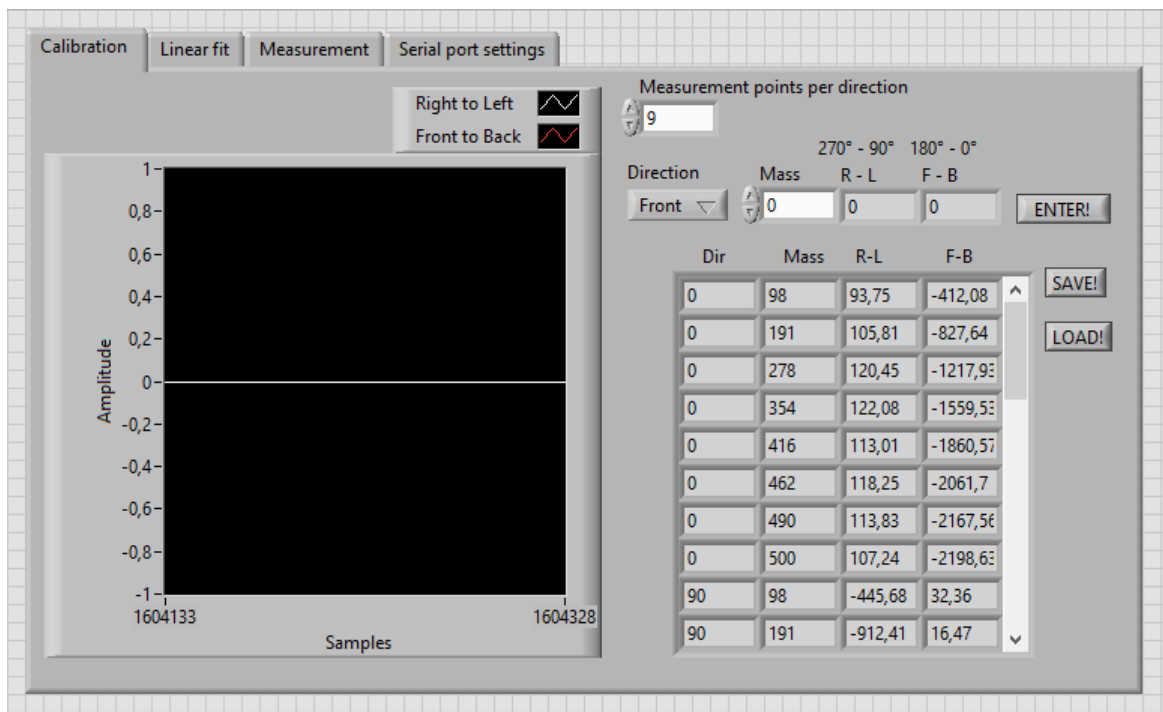
Ett relativt omfattande labviewprogram förbereddes för kalibrering och mätningar med bryggan.

Programmet har ett gränssnitt som genom flikar är indelat i de tre faser man behöver gå igenom för att först samla data för kalibreringen, sedan utföra en linjär anpassning av samlad data och till sist utföra mätningar och lagra data. Dessa presenteras i figurerna 3.8, 3.9 och 3.10.

I den första fliken i figur 3.8 behöver användaren först ange hur många mätpunkter man tänker göra per riktning. Detta kunde räknas ut automatiskt utifrån tabellen med mätdata men denna lösning har valts för att få det bakomliggande programmet att bli enklare. Värdet behövs för att den linjära anpassningen ska kunna göras med rätt mätvärden i nästa flik. Alla mätvärden för en viss riktning förväntas också göras efter varandra, det går inte att mäta alla fyra riktningar med samma vikt och sedan byta till nästa.

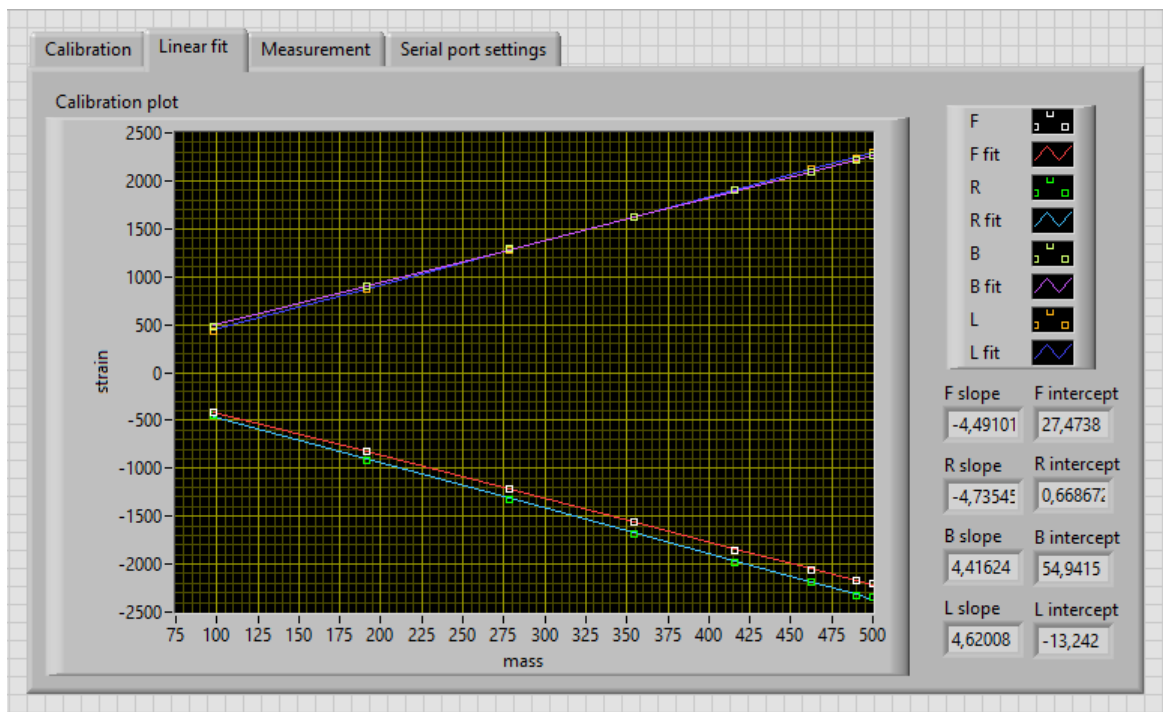
Det man behöver göra för varje mätpunkt är att välja riktning i rullgardinsmenyn samt ange den massa som man hängt i röret. Genom att trycka på knappen *ENTER* tas aktuellt mätvärde från båda bryggorna tillsammans med riktningen samt massan och läggs till i tabellen.

Innehållet i tabellen kan sparas ut i CSV-format, och samma data kan läsas in igen för att användas för mätningar vid ett senare tillfälle.



Figur 3.8: Kalibreringsvy i labviewprogrammet

Resultatet av den linjära anpassningen kan ses i följande flik (fig. 3.9) Denna vy kräver ingen interaktion utan visar bara ett mellanresultat i beräkningarna.

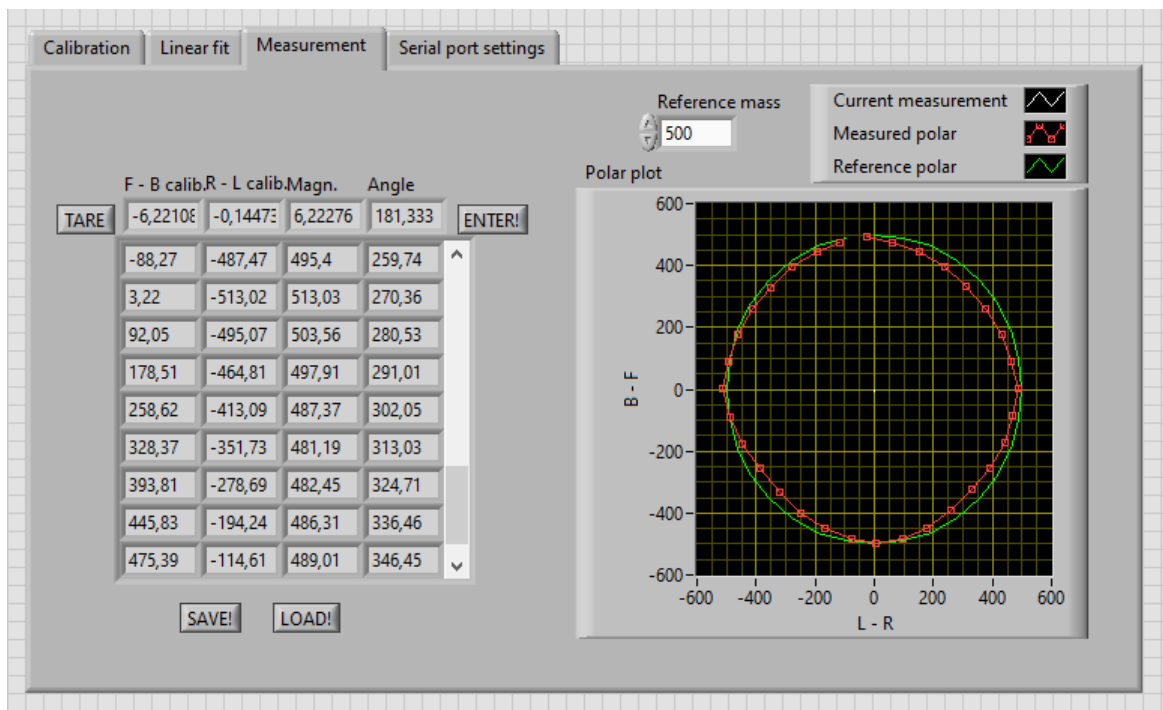


Figur 3.9: Visualisering av den linjära anpassningen i labviewprogrammet

Fliken för att göra mätningar i ses i figur 3.10. Processen är tänkt att vara så enkel som möjligt. Ett kalibrerat mätvärde för båda bryggorna, en beräknad magnitud och en beräknad vinkel matas in i tabellen med *ENTER*-knappen. En referensmassa kan matas in i rutan ovanför grafen för att rita upp en cirkel med motsvarande radie i grönt. Varje mätpunkt ritas in i grafen med rött och en visare för det aktuella mätvärdet ritas i vitt.

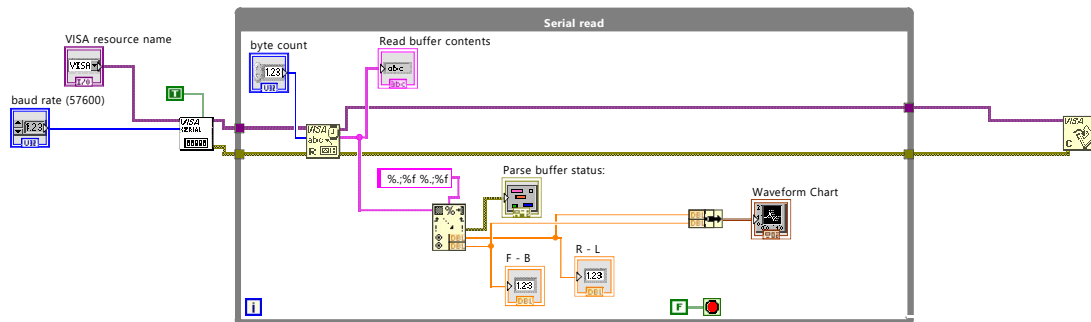
Eftersom mätvärdet driver en stund efter uppstart av systemet finns det en *TARE*-knapp för att nollställa mätningen.

Även i denna vy kan tabellens innehåll sparas och läsas in.



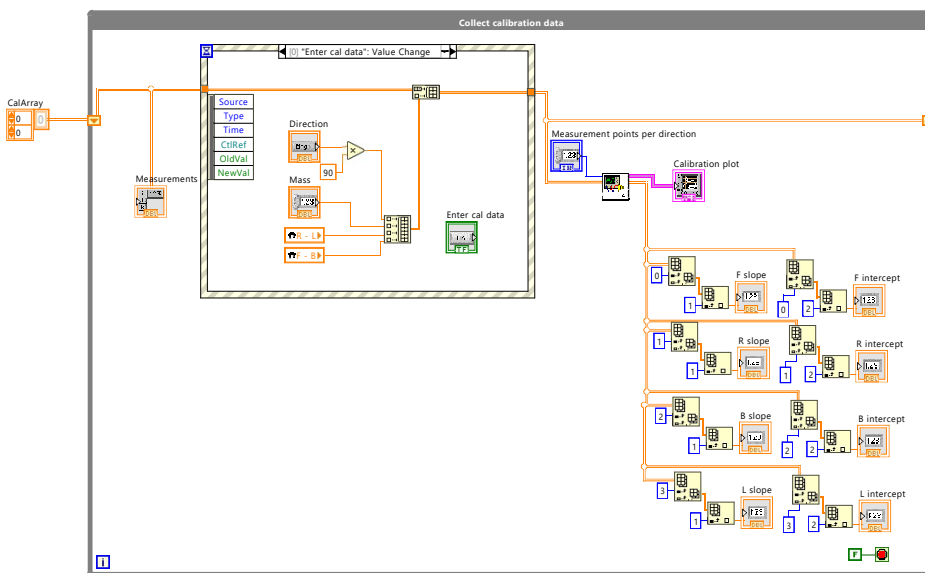
Figur 3.10: Mätvy i labviewprogrammet

En inblick i blockschemat för den delen programmet som hanterar indata från serieporten ses i figur 3.11. Programmet använder sig av VISA-drivrutinerna från national instruments för att läsa från serieporten och inställningar för detta görs utanför while-loopen. Inuti loopen plockas mätdata ut ur den textsträng man tagit emot.

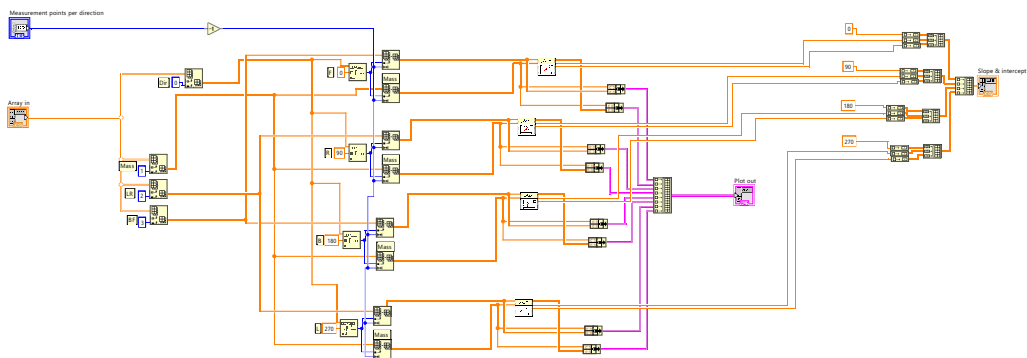


Figur 3.11: Blockschema för hantering av indata från serieporten i labviewprogrammet

Följande blockschema i figur 3.12 hanterar insamling av data för kalibrering och presentation av resultat från linjär anpassning. Tabellen som ses i gränssnittet är en tvådimensionell räkna i vilken nya mätvärden läggs till när värdet på *ENTER*-knappen ändras. Räknan matas även in i ett sub-vi som sköter den linjära anpassningen. Detta blockschema ses i figur 3.13.

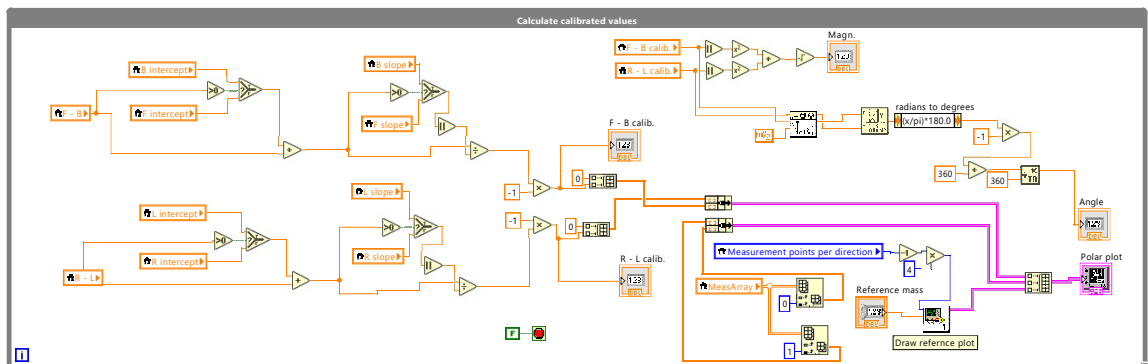


Figur 3.12: Blockschema över funktioner för kalibrering och linjär anpassning



Figur 3.13: Blockschema över sub-vi för linjär anpassning

Beräkning av kalibrerade mätvärden sker i blockschemat i figur 3.14. Här skapas också en räkka för referensgraf och både mätvärden, det aktuella mätvärdet samt referensen ritas.

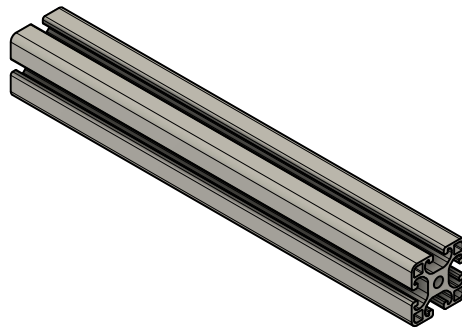


Figur 3.14: Blockschema över beräkning av kalibrerade värden

Rutinen för att spara och läsa in mätvärden är snarlik den för kalibreringsdata.

3.2. CAD-lösningar

Konstruktionen av kalibreringsjiggen och plattformen för mätriggen planerades att bestå av fyrkantig aluminiumprofil med s.k. T-formade skenor, fig. 3.15. Denna typ av profil används vanligtvis för att konstruera automationsutrustning för olika ändamål. Med vinklade fästen som skruvas fast med en speciell mutter i skenan kan anordningarna byggas upp snabbt och de går att justera efter montering. Även om en hopsvetsad konstruktion kan vara styvare är de förutnämnda fördelarna något som gör konstruktionsmetoden väldigt attraktiv.

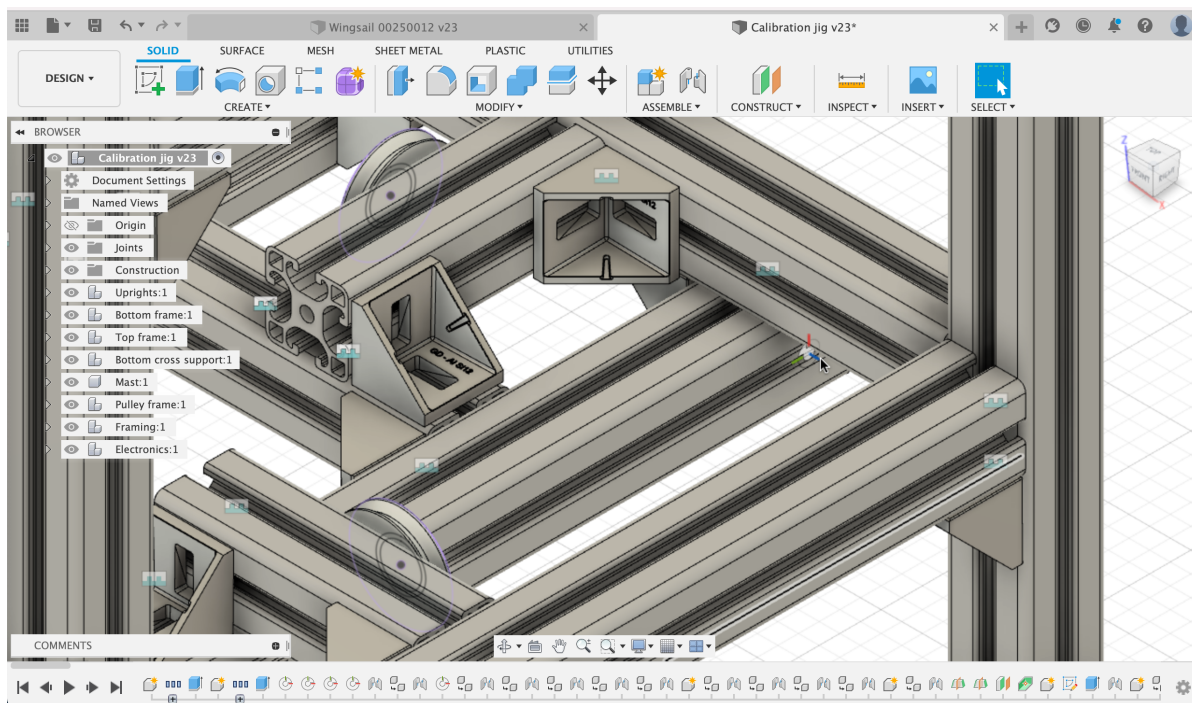


Figur 3.15: 40x40 mm aluminiumprofil

Profilen visade sig även vara relativt enkel att jobba med i Fusion 360. En färdig CAD-modell fanns att ladda ner från leverantörens hemsida. Denna kunde sedan importeras in i projektfilen och med hjälp av t.ex. *extrude*-kommandot kunde längden justeras.

I stället för att använda *move*-kommandot för att flytta bitarna på plats definierades fästpunkter, s.k. *joints*, som gjorde att modellen förblev parametrisk. Detta betyder att det gick att gå tillbaka i historiken över utförda operationer och ändra på t.ex. längden av en profil utan att modellen går sönder när man återgår till den senaste operationen. Genom att sätta in en fästpunkt i ändan på en profil

och fästa en annan i punkten bildas automatiskt en relativ position mellan de två komponenterna. Om den första profilen flyttas eller ändrar längd fästs nästa profil fortfarande vid ändan oavsett vilken den nya absoluta positionen för joint-objektet har blivit.



Figur 3.16: Markörer för fästpunkter i 3D-modellen

När komponenter i en Fusion 360-ritning kopieras och sedan klistras in kan man välja mellan att skapa en ny komponent som är helt fristående från den ursprungliga eller som en sorts referens. Ändras originalet kommer referensen också att påverkas av samma operation. Detta påverkar dock inte operationer som har med joints att göra. Fördelarna med att arbeta med referenser är att det i modellen ofta finns flera profiler som är lika långa och görs kopiorna som referenser kommer det att gå snabbt att redigera alla på en gång. När man sedan skapar en ritning utav 3D CAD-modellen och infogar en tabell över komponenter

kommer de som kopierats som referenser att samlas på samma rad med en kolumn som anger antalet likadana komponenter. På så vis blir det enklare att göra beställningar när listan över delar automatiskt uppdateras.

Det är främst de ovannämnda funktionerna som har gjort det möjligt att sköta det iterativa arbetet med att planera mätanordningarna i CAD-programmet utan att ha tillgång till profilerna på förhand.

4. TEORETISK BERÄKNING AV GIVARUTSLAG

En teoretisk beräkning av givarutslaget utifrån kraften som masten belastas med kan användas för att välja töjningsgivare med rätt egenskaper i planeringsfasen och analysera olika belastningsfall när mätdata finns till hands.

Det är inte helt entydigt hur kraften från seglet breder ut sig över längden av masten. Belastningsfallet påverkas av hur seglet fästs vid masten. Illustrationen av loggertseglet i mitten av figur 1.5 visar en punktlast där rået ligger mot masten i den övre ändan. Vill man gå in i större detalj kan det antas att en viss del av kraften också överförs i punkten där bommen möter masten i den nedre ändan. Det kan också antas att man i figuren har vinden in från babordssidan. Hade situationen varit den motsatta skulle en del av seglet ligga och trycka på mot masten.

Ju mer utbredd belastningen är över masten desto mindre blir böjmomentet i en given enskild punkt längs den. Böjmomentet är integralen av skjuvkraften som i sin tur beror på hur man valt krafterna i belastningsfallet. Figur 4.2 och 4.4 illustrerar detta.

Det är böjmomentet som tillsammans med materialkonstanter som slutligen ger töjningen man mäter med givarna, påvisat av ekvationerna 1.4, 1.5, 1.11 och 1.13.

När det gäller placeringen och valet av töjningsgivare borde man se till att

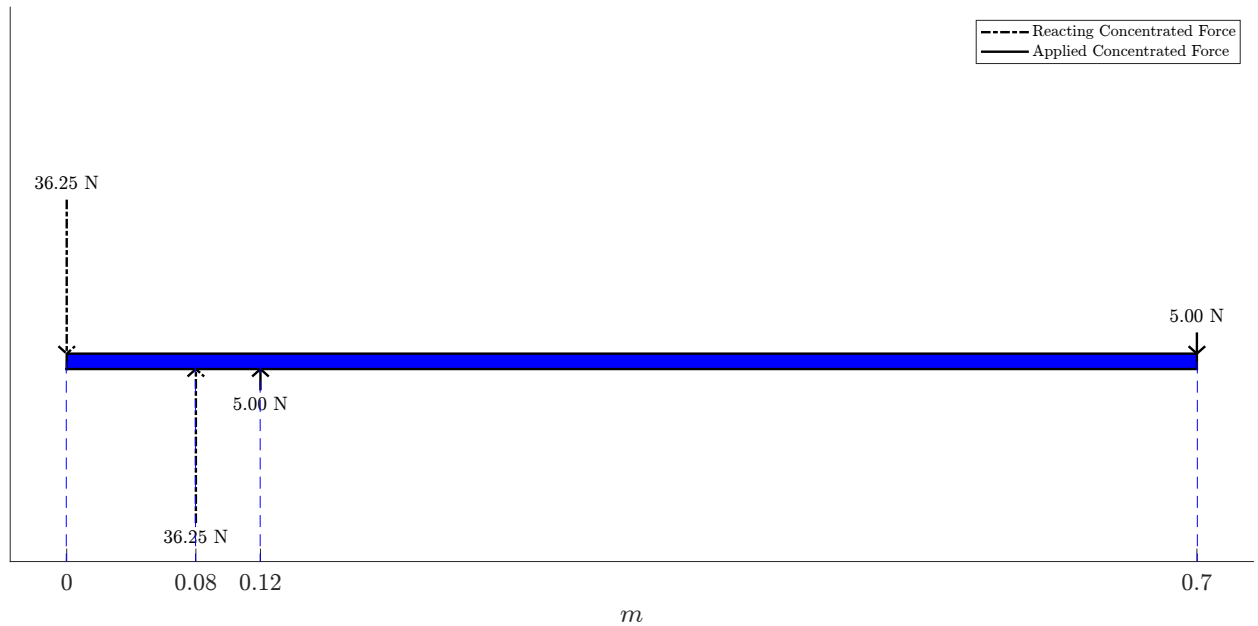
givarnas maximala utslag inte mättar AD-omvandlarens förstärkarsteg. Blir utslaget för litet får man problem med kvoten mellan signal och brus.

4.1. Val av belastningsfall

I (Sponberg, 1983) presenteras en metod för att dimensionera fristående vingmaster för fritids- och tävlingssegelbåtar. Hållfasthetsberäkningarna i rapporten är upplagda så att en så stor säkerhetsmarginal som möjligt erhålls. Eftersom krafterna förutsätts vara punktformiga fås större böjmoment än om man räknat med att seglet fästs längs hela liket i masten och då skulle kunna räknas som en utbredd belastning. Om man räknat enligt det förstnämnda fallet och lagt på en viss säkerhetsmarginal för mastens konstruktion men det verkliga fallet är mer som det senare fallet kommer man att få en ytterligare marginal. Denna marginal är dock inte helt gratis då man får en tyngre mast som påverkar stabiliteten negativt. Ska masten dessutom roteras som i (Sponberg, 2000) blir lagren som ska stötta rörelsen större, tyngre och framförallt dyrare. När det gäller en ensamsegling runt jorden är kanske extra säkerhetsmarginal att föredra, speciellt då avmastning ofta är orsaken till att den sortens åtaganden måste avbrytas.

Belastningen av masten kan beräknas genom att se mastfoten och däcksgenomföringen som stödpunkter och att applicera punktformade motriktade krafter vid infästningen av bommen och i masttoppen (Sponberg, 1983). I figur 4.1 ses en friläggning av belastningsfallet med ungefärliga värden så som de skulle kunna vara för vingseglet som planers som en del av detta arbete.

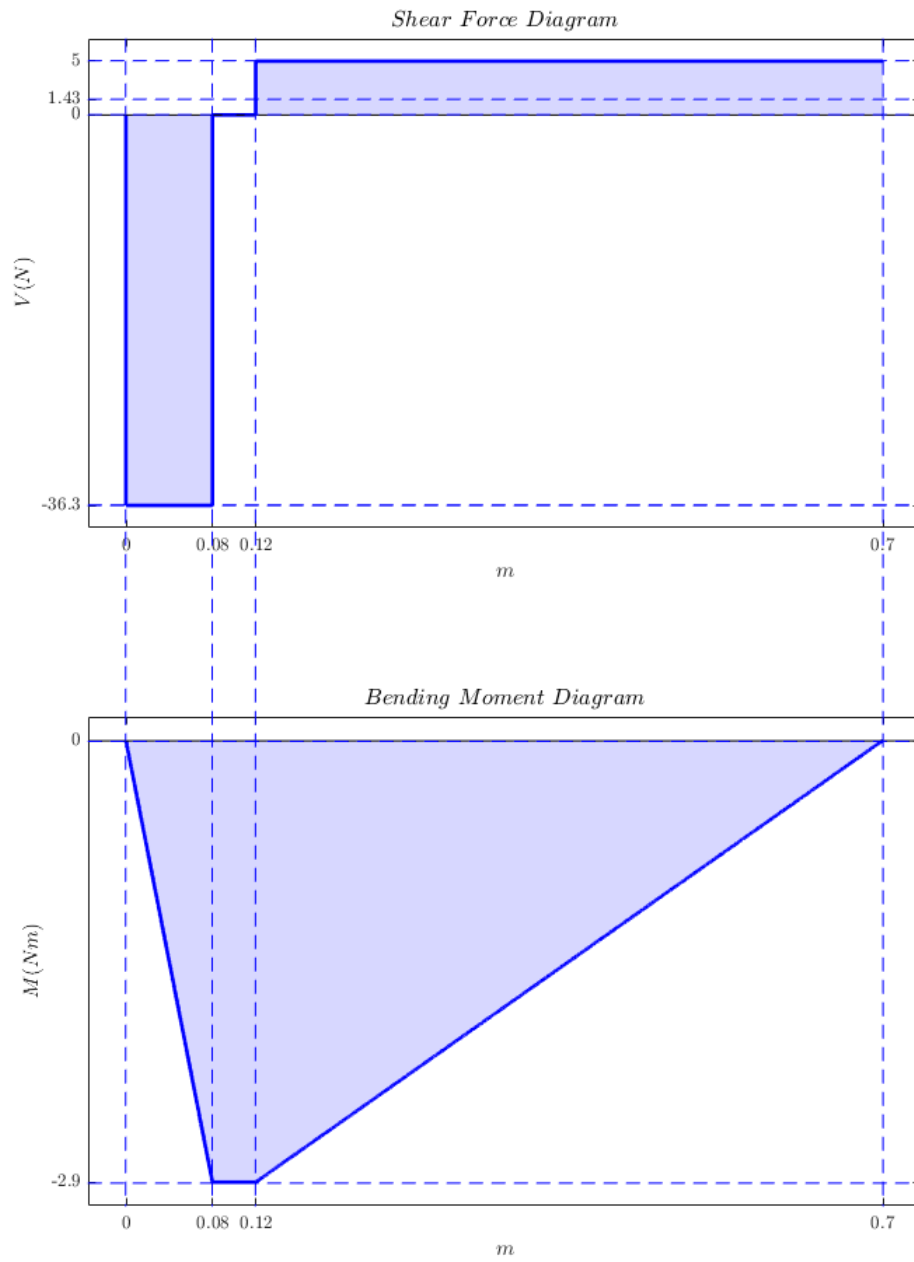
Free Body Diagram



Figur 4.1: Frilägning av masten med punktelstningar

De resulterande skjuvkrafts- och böjmomentdiagrammen ses i figur 4.2.

Böjmomentet blir konstant mellan nedre kanten av seglet och däcksgenomföringen. Detta skulle betyda att töjningsgivarna kunde fästas var som helst i detta spann och att man då fick samma mätvärden.

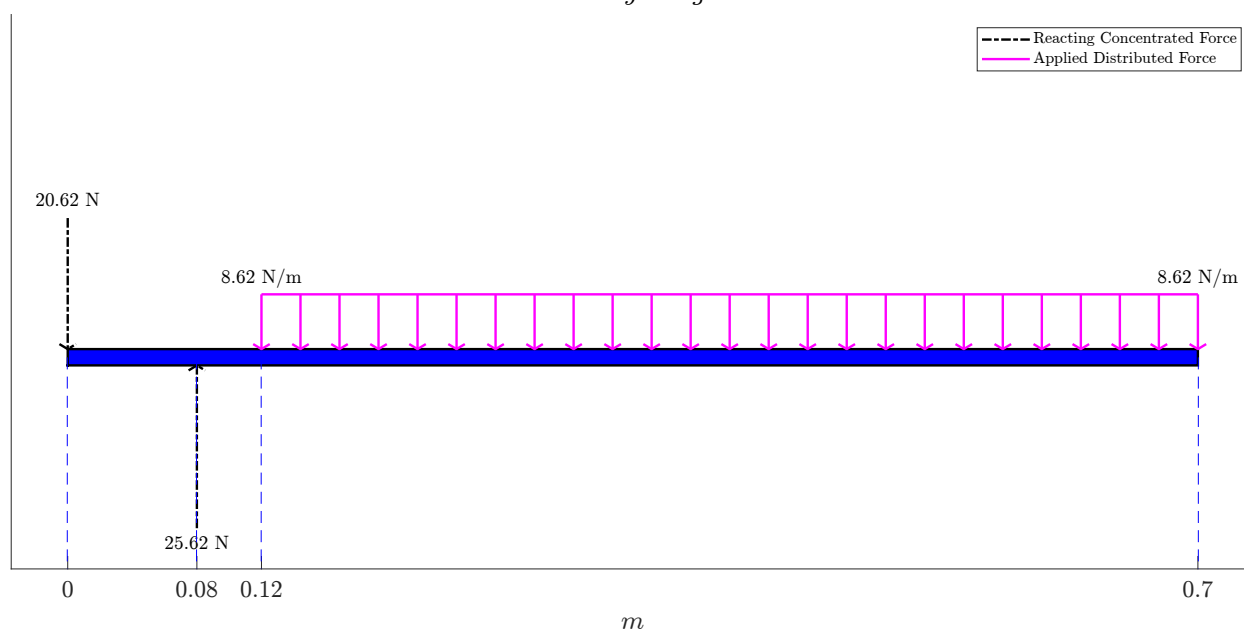


Figur 4.2: Skjuvkrafts- och böjmomentdiagram med punktbelastningar

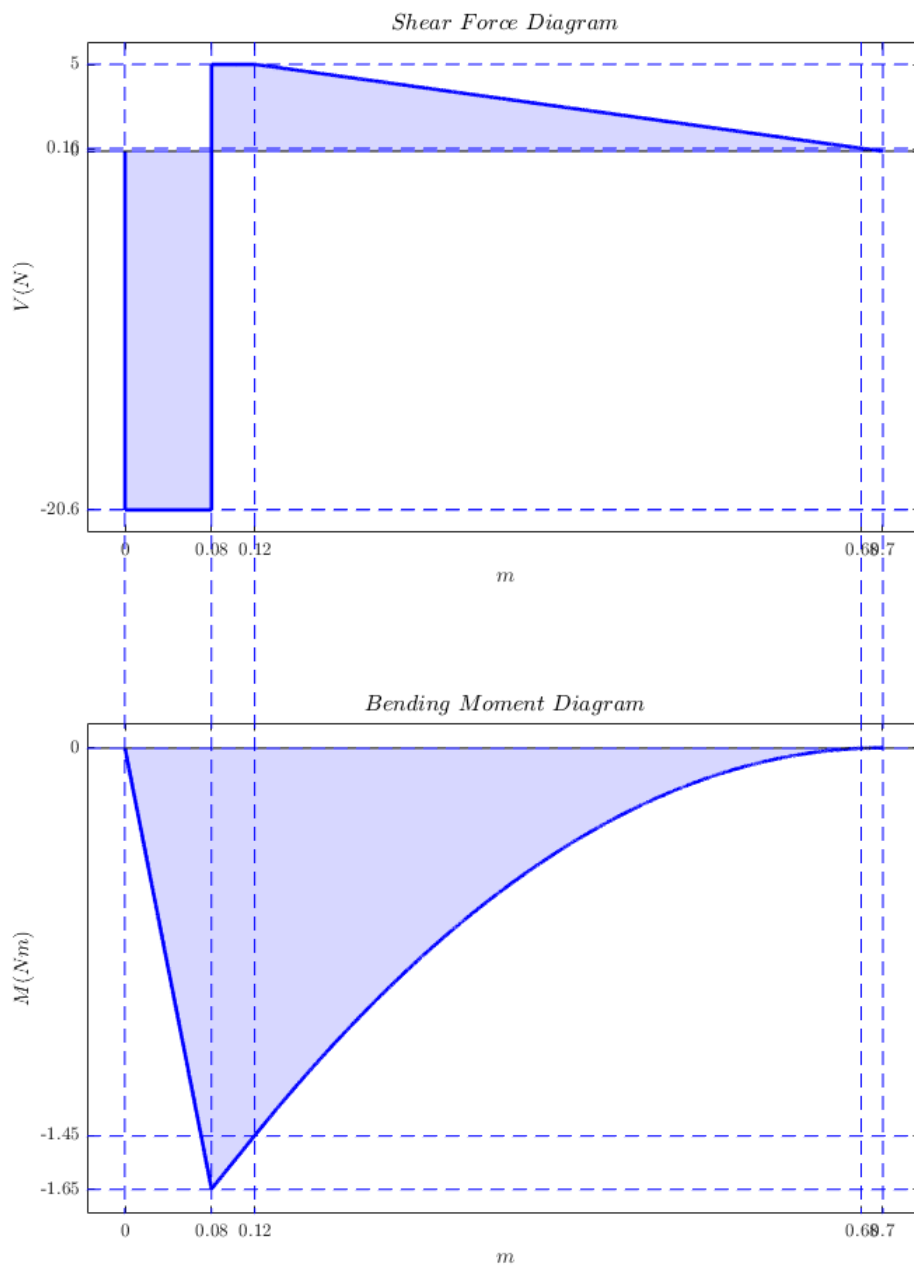
Om man däremot förutsätter att seglet utövar en jämnt fördelad belastning på masten som i friläggningen i figur 4.3 fås ett linjärt ökande böjmoment från nedre kanten av seglet till däcksgenomföringen som i figur 4.4. I fallet med punktkrafterna blir det maximala böjmomentet 2,9 Nm medan det för den jämnt fördelade kraften blir 1,5 Nm mitt emellan däcksgenomföringen och nedre kanten av seglet.

Utifrån diskussionen ovan kan man då med fel valt belastningsfall i planeringsskedet få ett givarutslag som är hälften av det förväntade. Signal till brusförhållandet försämras med det dubbla.

Free Body Diagram



Figur 4.3: Friläggning av masten med jämnt fördelad last



Figur 4.4: Skjuvkrafts- och böjmomentdiagram med jämnt fördelad last

4.2. Beräkning med enkelt belastningsfall

Med insättning av uttrycket för töjning (ekv. 1.4) i uttrycket för givarfaktorn (ekv. 1.11), ytterligare insättning av spänningen från ekv. 1.5 och utbrytning av den relativa resistansen fås ekvation 4.1 nedan.

$$r = \frac{kM_b}{EW_b} \quad (4.1)$$

Allt i högerled förväntas vara känt; M_b från det enkla belastningsfallet där röret är fastspänt i ena ändan och en kraft verkar på friändan, W_b från rörets geometri, k från givartillverkaren och E fås experimentellt med ekvation 1.8.

Högerledet från ekv. 1.10 kan vidare sättas in i stället för r i ekv. 1.13 för att få ekv. 4.2 nedan.

$$U_{ao} \approx \frac{kM_b U}{EW_b} \quad (4.2)$$

Med insättning av högerledet från ekv. 1.6 i stället för M_b och högerledet från ekv. 1.7 i stället för W_b fås följande uttryck för obalansspänningen i ekv. 4.3.

$$U_{ao} \approx \frac{32kFUd_2}{\pi E(d_2^4 - d_1^4)} \quad (4.3)$$

E togs experimentellt fram genom att mäta utböjningen δ till 15 mm då avståndet l från fästet till punkten där massan på 0,5 kg hängdes var 747 mm. Innerdiametern d_1 var 10 mm och ytterdiametern d_2 12 mm. Detta resulterar i en elasticitetsmodul på 86 200 MPa.

Med matningsspänningen U på 5 V, en kraft F på -4,9 N och ett k på 2,1 fås

slutligen obalansspänningen till c.a. 4,2 mV m.hj.a. ekv. 4.3.

Det använda HX711-chipets AD-omvandlare ger ut ett 24-bitars värde i tvåkomplementform vilket betyder att det kan ligga mellan -4 194 304 och 4 194 303. Detta motsvarar obalansspänningar mellan -20 och 20 mV. 4,2 mV skulle då ge värdet 888 390 från AD-omvandlaren.

5. EXPERIMENT

Det egentliga praktiska experimentet som all tidigare beskriven utrustning och teori bygger mot beskrivs nedan. Det består av två olika skeden, en kalibrering och en mätning. Kalibreringen behöver göras eftersom värdet som fås från AD-omvandlaren inte direkt motsvarar någon känd kraft som verkar på masten. Förväntningen är att man inte kommer att kunna få ett tillräckligt noggrant resultat från den teoretiska beräkningen för att omsätta ett verkligt mätvärde till en kraft. Målet med mätningen är att se hur väl kraften som påverkar masten kan mätas då givarna i de båda bryggorna töjs i en riktning som inte motsvarar deras rekommenderade töjningsriktning, enligt diskussionen i avsnitt 1.2.4. De enda riktningarna som de teoretiska beräkningarna kan tänkas gälla för är då någon av bryggorna töjs i sin huvudriktning.

Inför kalibreringen monteras masten i kalibreringsjiggen så att bryggorna orienteras vinkelrätt mot de fyra sidorna av jiggens ram. En brygga kan då mäta böjningen i riktningen vänster – höger och den andra i fram- och bakled ovanifrån sett. Kända vikter hängs en och en från samma punkt på masten via ett av blocken och riktningen, vikten, samt värdet från båda AD-omvandlare sparas i en tabell i kalibreringsprogrammet.

Så länge som materialen befinner sig i den elastiska regionen kommer förhållandet mellan σ och ε vara linjärt. Att rörets tjocklek kan förändras då det böjs antas inte påverka mätningen. Detta betyder att en linjär anpassning av

mätvärden kan göras för att få fram en kalibreringsfaktor.

När uppmätta kalibreringsvärden för alla vikter i de fyra riktningarna har sparats kan man direkt fortsätta till att göra mätningar eftersom programmet sköter nödvändiga beräkningar bakom kulisserna.

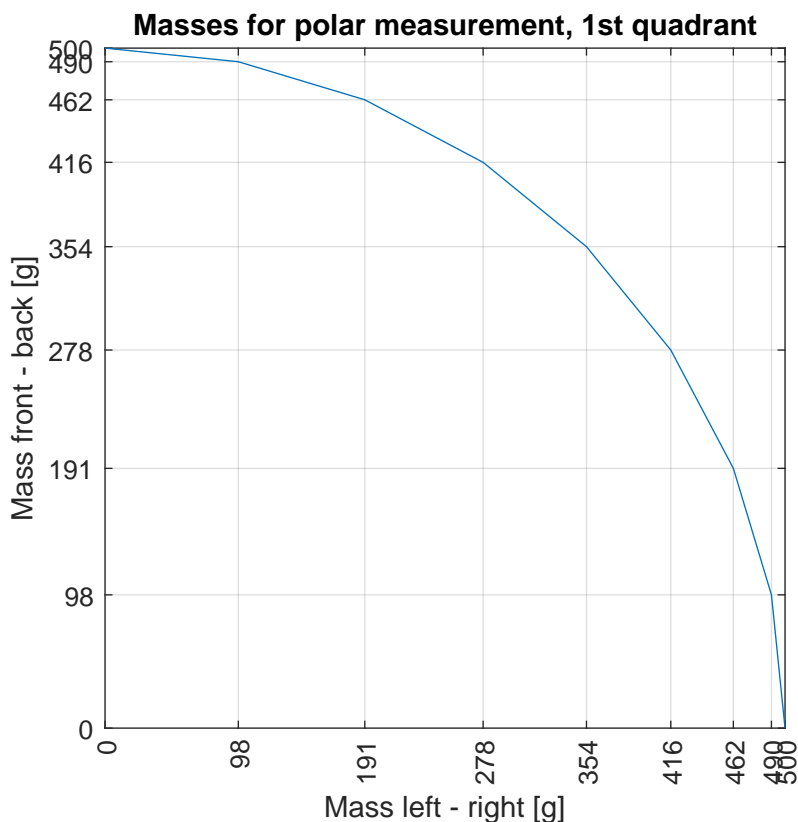
Mätningen med kalibreringsjiggen är tänkt att göras utgående från ett scenario där man förutsätter att masten sitter på en båt. Målet är att kunna rita ett polärdiagram som visar den minskade känsligheten mellan de fyra väderstrecken. Framåtriktningen antas då vara 0° , höger eller styrbord 90° , bakåt 180° och vänster eller babord 270° . I diagrammet som kommer att ritas orienteras också 0° uppåt och 90° åt höger, vinkeln ökar m.a.o. medurs, vilket skiljer sig från hur man traditionellt förhåller sig till vinklarna inom trigonometrin.

5.1. Kalibrering

Till en början gjordes en kalibrering med två vikter. Kalibrerade värden mättes sedan upp för de fyra väderstrecken, men också för 45° , 135° , 225° och 315° . Dessa mellanliggande vinklar gav en mindre beräknad magnitud än den teoretiska som skulle vara en faktor $\sqrt{2}$ större än massan av en av de lika stora vikterna som hängts via två av blocken i masten.

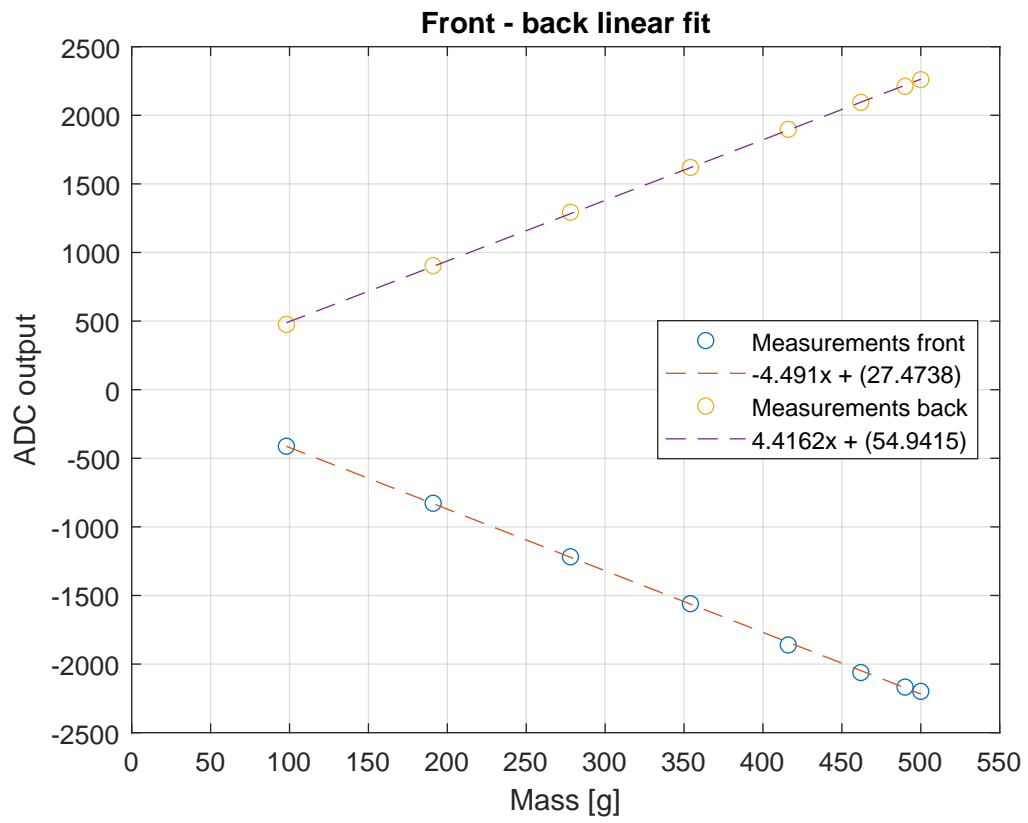
Det blev klart att det skulle vara av intresse att veta hur givarna beter sig i områden mellan de redan uppmätta vinklarna. Flera mätpunkter skulle ge en mer detaljerad bild av givarnas karaktäristik i tvärriktningen. Uppskattningen blev att det praktiskt kunde vara genomförbart och tillräckligt att mäta totalt 32 olika vinklar. Detta betydde 9 vikter varav två var lika stora. Mätningen förbereddes genom att räkna ut vilka vikterna behövde vara för att teoretiskt få ett mätvärde på 500 g vid varje vinkel. Resultatet ritades upp i figur 5.1 och användes för att föra protokoll över vilka vinklar som blivit uppmätta.

Vikterna framställdes genom att fylla 1/2 liters PET-flaskor med vatten tills önskad vikt nåddes. Vikten mättes med en digital köksvåg.

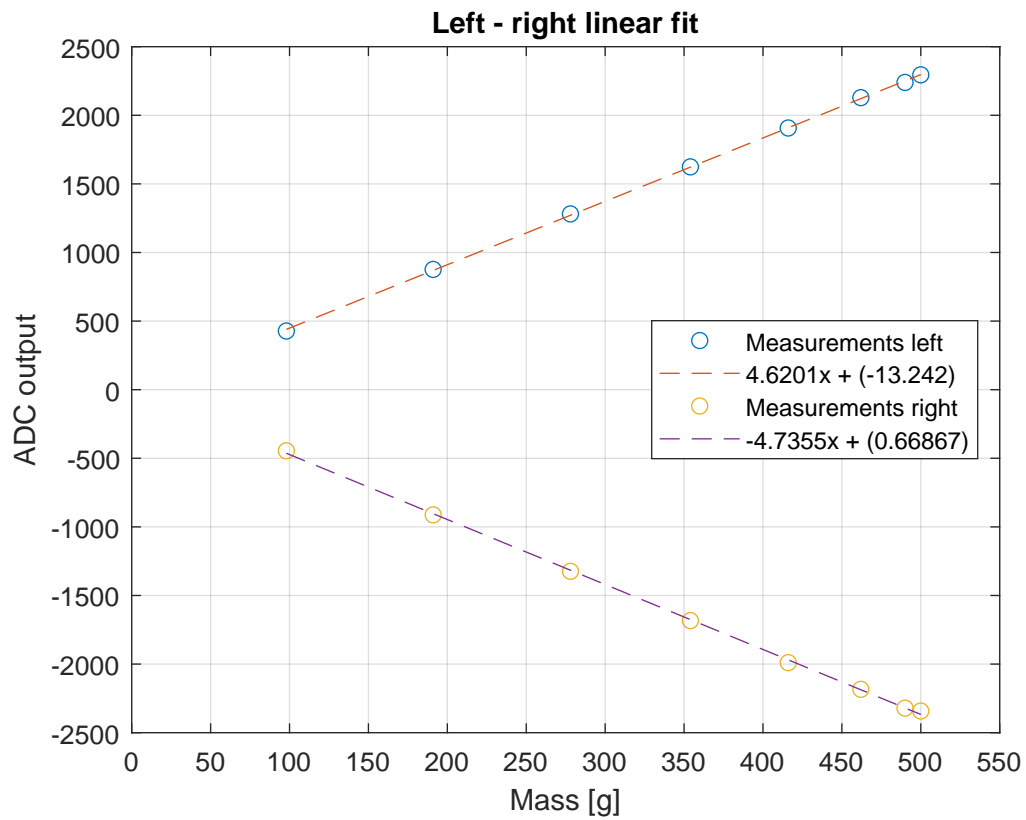


Figur 5.1: Kända massor för kalibrering och mätning

Kalibreringen sköttes med samma vikter som mätningen planerades att göras med. Detta är orsaken till att mätpunkterna i kalibreringen inte är på jämna avstånd från varandra. För kalibreringen skulle det inte heller behövas så många mätpunkter, men eftersom vikterna fanns tillhands användes alla för varje riktning. Figurerna 5.2 och 5.3 visar resultaten av kalibreringen. Linjernas lutning är lika med faktorn som mätvärdet från AD-omvandlaren måste multipliceras med för att räkna ut massan som hängts från masten.



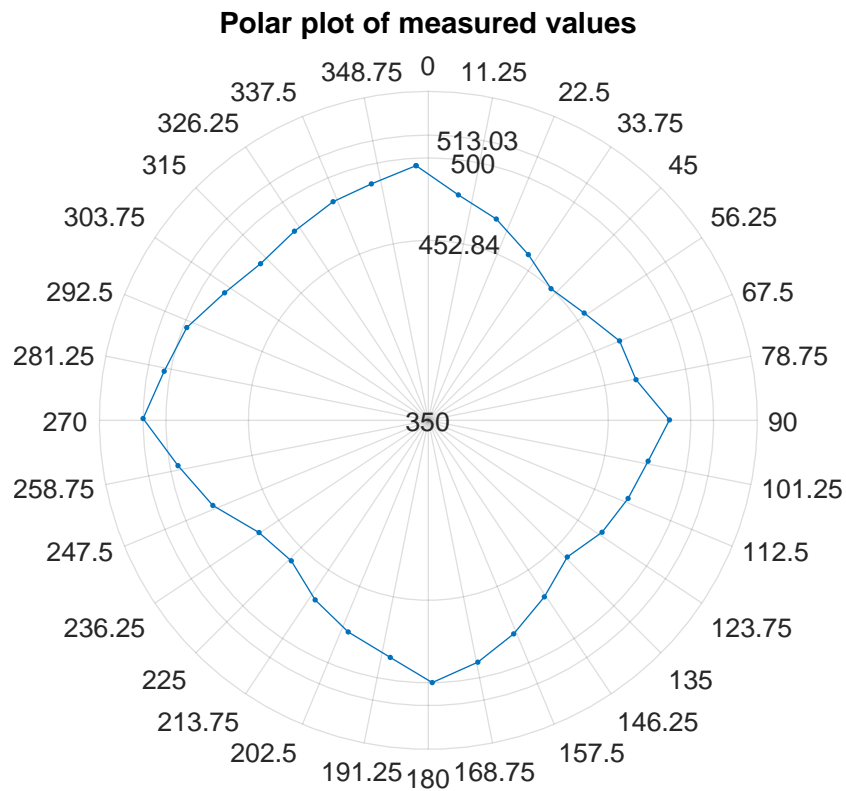
Figur 5.2: Linjär anpassning av mätvärden i fram- och bakriktningen



Figur 5.3: Linjär anpassning av mätvärden i vänster- och högerriktningen

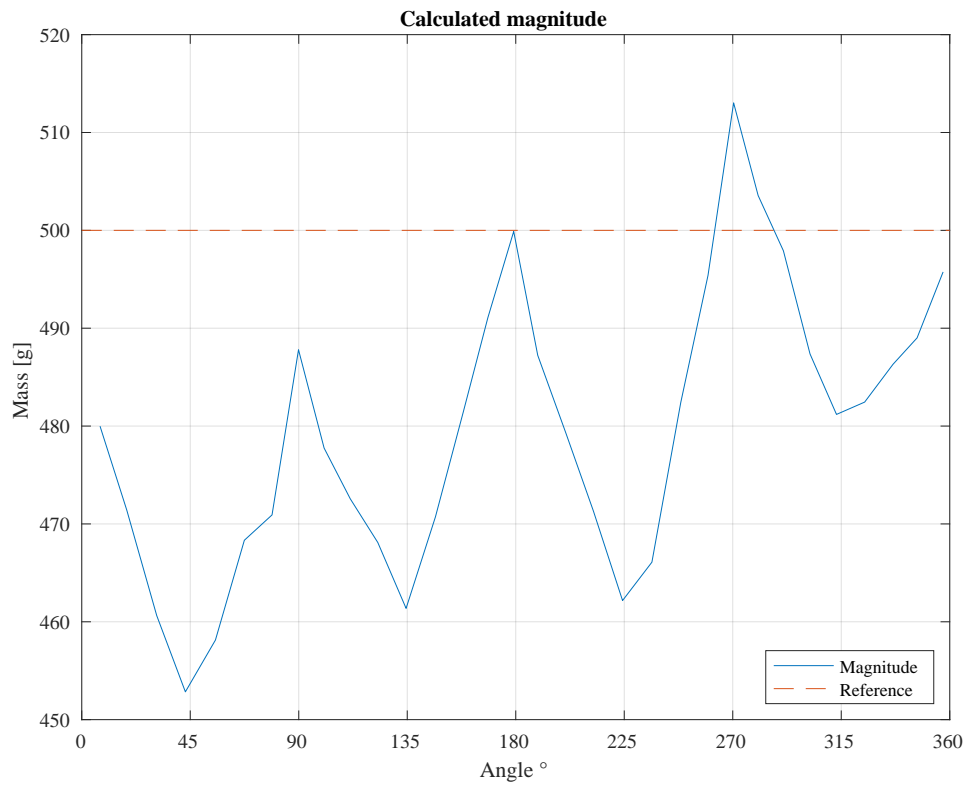
5.2. Mätresultat

I figurerna 5.4 och 5.5 presenteras samma data; den beräknade magnituden för de 32 uppmätta punkterna från 0° till $348,25^\circ$. Polärddiagrammet i fig 5.4 kan vara mer överskådligt utifrån bakgrunden som ges i början av kapitlet.



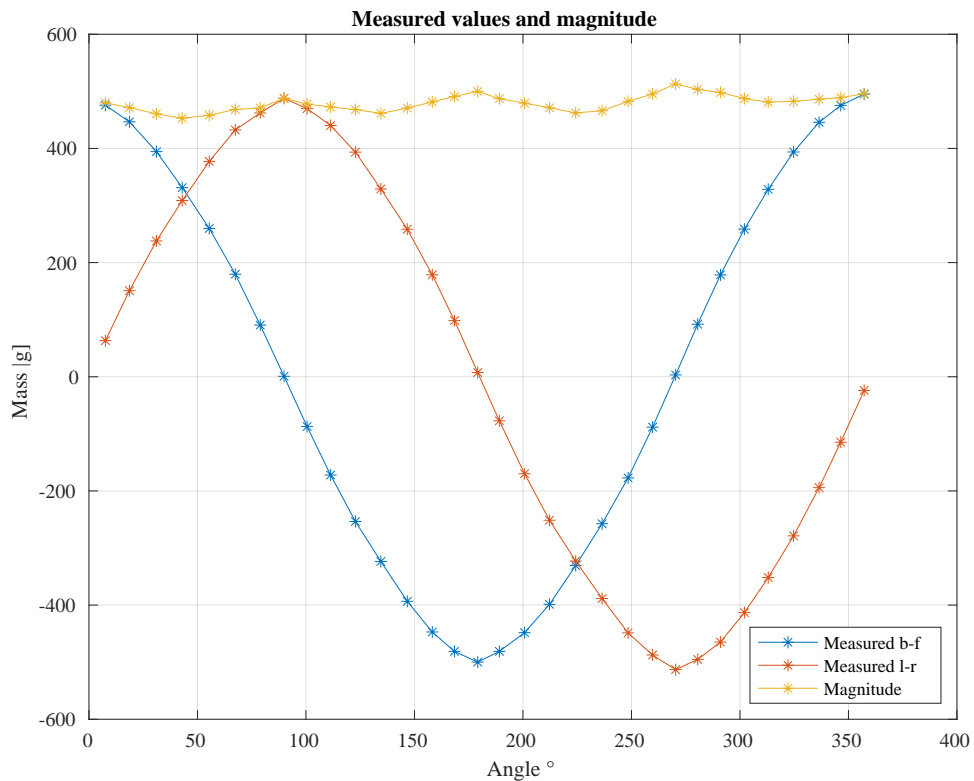
Figur 5.4: Polär graf över beräknad magnitud efter kalibrering

Figur 5.5 nedan ger i sin tur en klarare bild av mätutrustningens karaktäristik. Den streckade referenslinjen motsvarar en magnitud på 500 g i alla riktningar, vilket i polärdiagrammet hade visat sig som en perfekt cirkel.



Figur 5.5: Beräknad magnitud utifrån kalibrerade värden

Nedan ses figur 5.6 i vilken mätvärden från båda bryggorna presenteras tillsammans med den beräknade magnituden.



Figur 5.6: Uppmätta värden efter kalibrering och beräknad magnitud

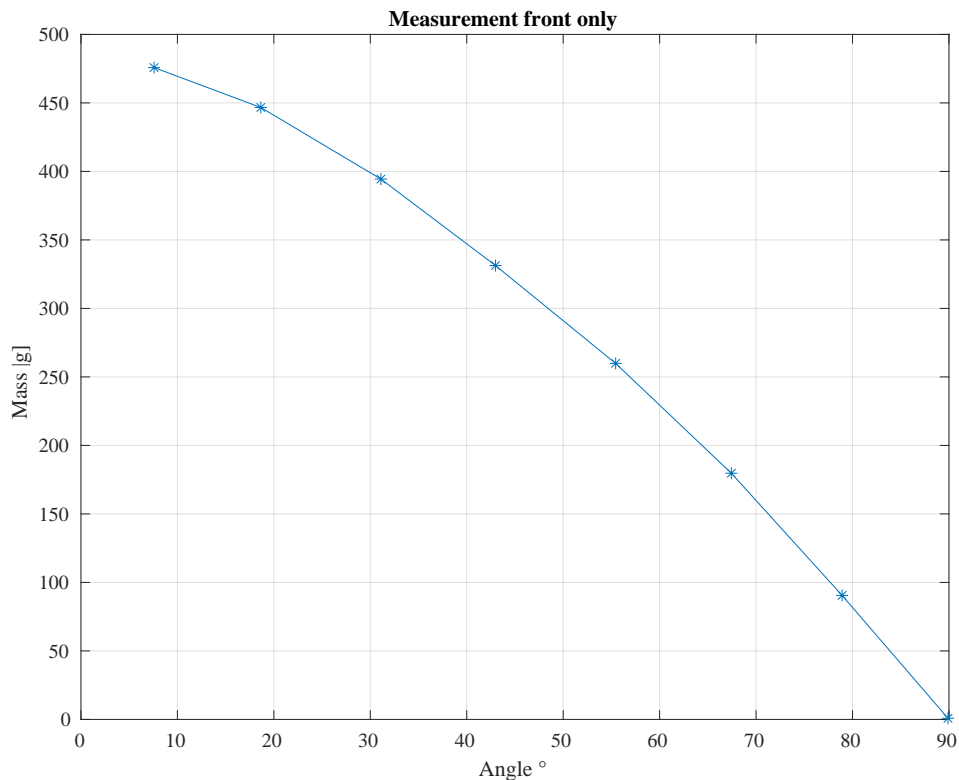
5.3. Analys

Det som är mest iögonfallande speciellt i figur 5.5, men också i en polär graf då skalan justerats som i figur 5.4, är att mätpunkterna faller på en linje mellan 0° och 45° , 45° och 90° , o.s.v.

Detta betyder att det går att anpassa en styckevis linjär funktion till mätvärden och använda den för kalibrering av utrustningen.

Gällande diskussionen om tvärkänsligheten i kapitel 1.2.4 där (Lindahl & Sandqvist, 1996) refererats verkar det som att resultaten av mätningarna tyder på

att känsligheten nog direkt i tvärriktningen är obefintlig som figur 5.7 visar.



Figur 5.7: Uppmätta värden vid mätning för polärddiagram. Endast värden från bryggan i neutral – framriktningen visas då belastningen gradvis flyttas medurs mot höger ovanifrån sett

Det är uppenbarligen möjligt att montera mätbryggorna vinkelrätt mot varandra för att kontra deras brist på tvärkänslighet.

När det kommer till att jämföra det teoretiska värdet från AD-omvandlaren i kapitel 4 till de praktiska mätningarna kan det konstateras att de okalibrerade utslagen för en vikt på 500 g i praktiken låg strax över 2000 medan det teoretiska var nästan 900 000. Orsaken till den stora skillnaden visade sig vara att det i arduinoprogrammet hamnat med ett hårdkodat kalibreringsvärde på 696 för bryggan i vänster – högerriktning och 733 i fram – bakriktning. Tas detta i beaktande blir det slutliga teoretiska värdet kring 1200, vilket fortfarande är

hälften av det uppmätta. Även om storleksordningen är den samma är skillnaden ändå så pass stor att en kalibrering behövs för att göra noggranna mätningar.

Hade något av de andra belastningsfallen använts vore böjmomentet och det teoretiska värdet mindre. Vad som kan påverka de praktiska resultaten är t.ex. monterings sättet; många givartillverkare föreslår akrylatbaserat lim för att fästa dem på mätobjektet. De använda givarna var billiga generella givare där den enda informationen som fanns till hands var den nominella resistansen och givarkonstanten.

Oavsett möjliga problem som beror på monterings sätt är det tydligt ur ekv. 1.12 att vad man får är ett ungefärligt värde för obalansspänningen.

6. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

En metod har tagits fram för att mäta kraften som utövas på en kolfiberkompositmast. Denna metod kan användas för att mäta kraften som ett segel på en ostagad mast skapar. Seglet som planerats att användas för fortsatta mätningar är ett tvåkomponents vingsegel.

Kraften mäts med två mätbryggor med fyra folietöjningsgivare var, monterade vinkelrätt mot varandra. Konfigurationen ger ett överraskande gott resultat trots givarnas begränsade känslighet i tvärriktningen.

Teoretiska beräkningar har gjorts för att kunna jämföras med de praktiska experimenten och de överensstämmer tillfredställande.

A. KALIBRERINGS- OCH MÄTDATA

Tabell A.1: Kalibreringsdata, fram

| Vinkel ° | Massa [g] | Mätvärde H-V | Mätvärde F-B |
|----------|-----------|--------------|--------------|
| 0.00 | 98.00 | 93.75 | -412.08 |
| 0.00 | 191.00 | 105.81 | -827.64 |
| 0.00 | 278.00 | 120.45 | -1217.93 |
| 0.00 | 354.00 | 122.08 | -1559.53 |
| 0.00 | 416.00 | 113.01 | -1860.57 |
| 0.00 | 462.00 | 118.25 | -2061.70 |
| 0.00 | 490.00 | 113.83 | -2167.56 |
| 0.00 | 500.00 | 107.24 | -2198.63 |

Tabell A.2: Kalibreringsdata, höger

| Vinkel ° | Massa [g] | Mätvärde H-V | Mätvärde F-B |
|----------|-----------|--------------|--------------|
| 90.00 | 98.00 | -445.68 | 32.36 |
| 90.00 | 191.00 | -912.41 | 16.47 |
| 90.00 | 278.00 | -1323.61 | 14.66 |
| 90.00 | 354.00 | -1683.39 | 14.05 |
| 90.00 | 416.00 | -1989.69 | 8.64 |
| 90.00 | 462.00 | -2183.83 | -8.73 |
| 90.00 | 490.00 | -2321.14 | -4.03 |
| 90.00 | 500.00 | -2342.08 | 3.68 |

Tabell A.3: Kalibreringsdata, bak

| Vinkel ° | Massa [g] | Mätvärde H-V | Mätvärde F-B |
|----------|-----------|--------------|--------------|
| 180.00 | 98.00 | -27.64 | 475.71 |
| 180.00 | 191.00 | -46.72 | 904.45 |
| 180.00 | 278.00 | -74.05 | 1293.51 |
| 180.00 | 354.00 | -72.44 | 1619.73 |
| 180.00 | 416.00 | -79.29 | 1897.59 |
| 180.00 | 462.00 | -105.61 | 2094.53 |
| 180.00 | 490.00 | -111.99 | 2211.17 |
| 180.00 | 500.00 | -104.32 | 2259.73 |

Tabell A.4: Kalibreringsdata, vänster

| Vinkel ° | Massa [g] | Mätvärde H-V | Mätvärde F-B |
|----------|-----------|--------------|--------------|
| 270.00 | 98.00 | 427.67 | 16.25 |
| 270.00 | 191.00 | 876.47 | 2.09 |
| 270.00 | 278.00 | 1281.12 | 7.55 |
| 270.00 | 354.00 | 1623.99 | -2.93 |
| 270.00 | 416.00 | 1907.31 | 4.88 |
| 270.00 | 462.00 | 2128.61 | -1.51 |
| 270.00 | 490.00 | 2239.41 | 13.90 |
| 270.00 | 500.00 | 2294.89 | 0.86 |

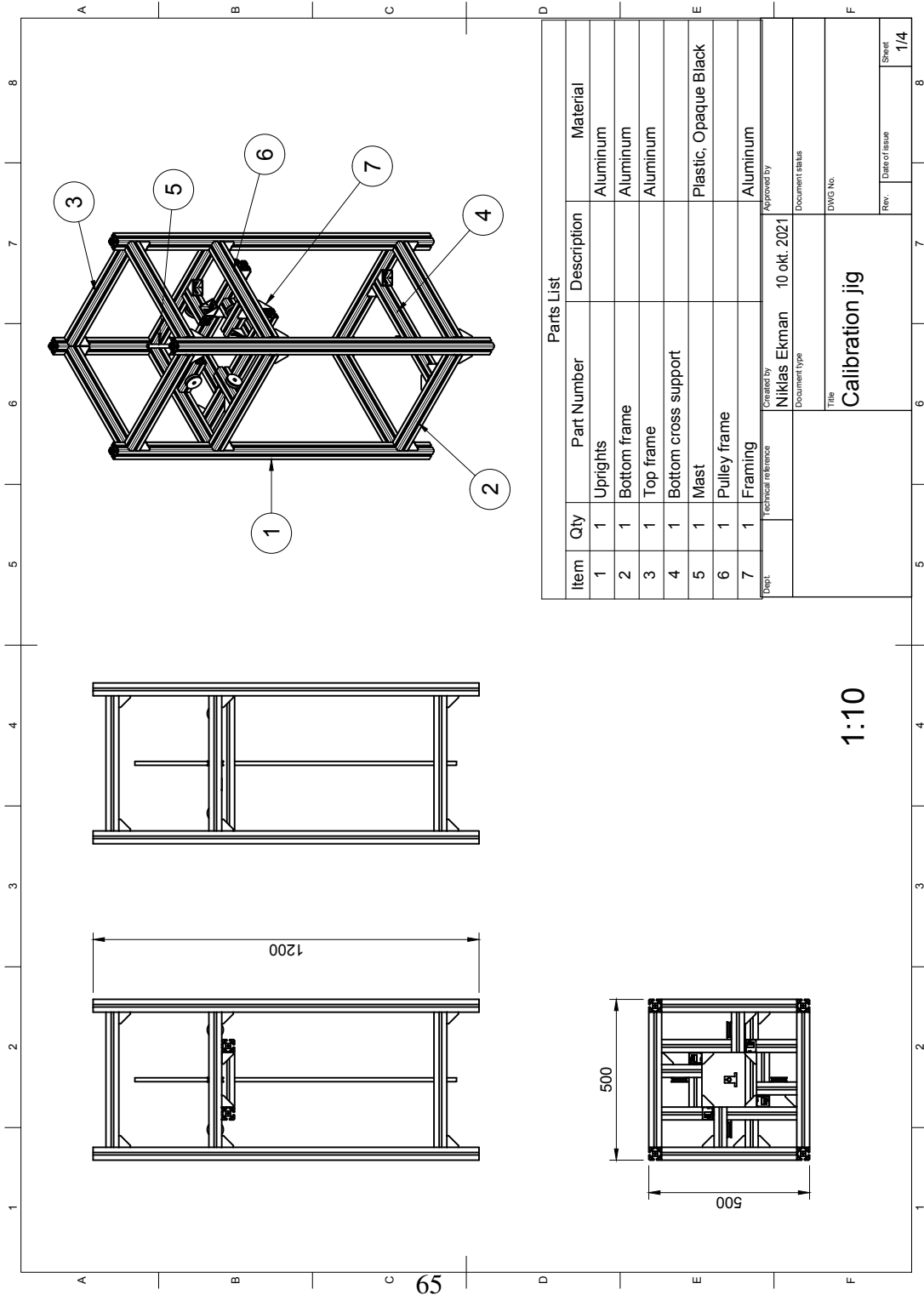
Tabell A.5: Mätdata

| Kalibrerat värde F-B [g] | Kalibrerat värde H-V [g] | Beräknad magnitud [g] | Vinkel ° |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------|
| 495.18 | -23.88 | 495.75 | 357.24 |
| 475.80 | 63.29 | 479.99 | 7.58 |
| 446.66 | 150.79 | 471.43 | 18.65 |
| 394.42 | 237.95 | 460.63 | 31.10 |
| 331.31 | 308.71 | 452.84 | 42.98 |
| 259.86 | 377.30 | 458.13 | 55.44 |
| 179.69 | 432.48 | 468.33 | 67.44 |
| 90.52 | 462.14 | 470.92 | 78.92 |
| 0.83 | 487.80 | 487.80 | 89.90 |
| -87.25 | 469.72 | 477.75 | 100.52 |
| -172.10 | 440.12 | 472.57 | 111.36 |
| -253.54 | 393.50 | 468.10 | 122.79 |
| -323.51 | 328.94 | 461.37 | 134.52 |
| -393.39 | 258.49 | 470.72 | 146.69 |
| -447.07 | 178.59 | 481.42 | 158.22 |
| -481.11 | 98.43 | 491.08 | 168.44 |

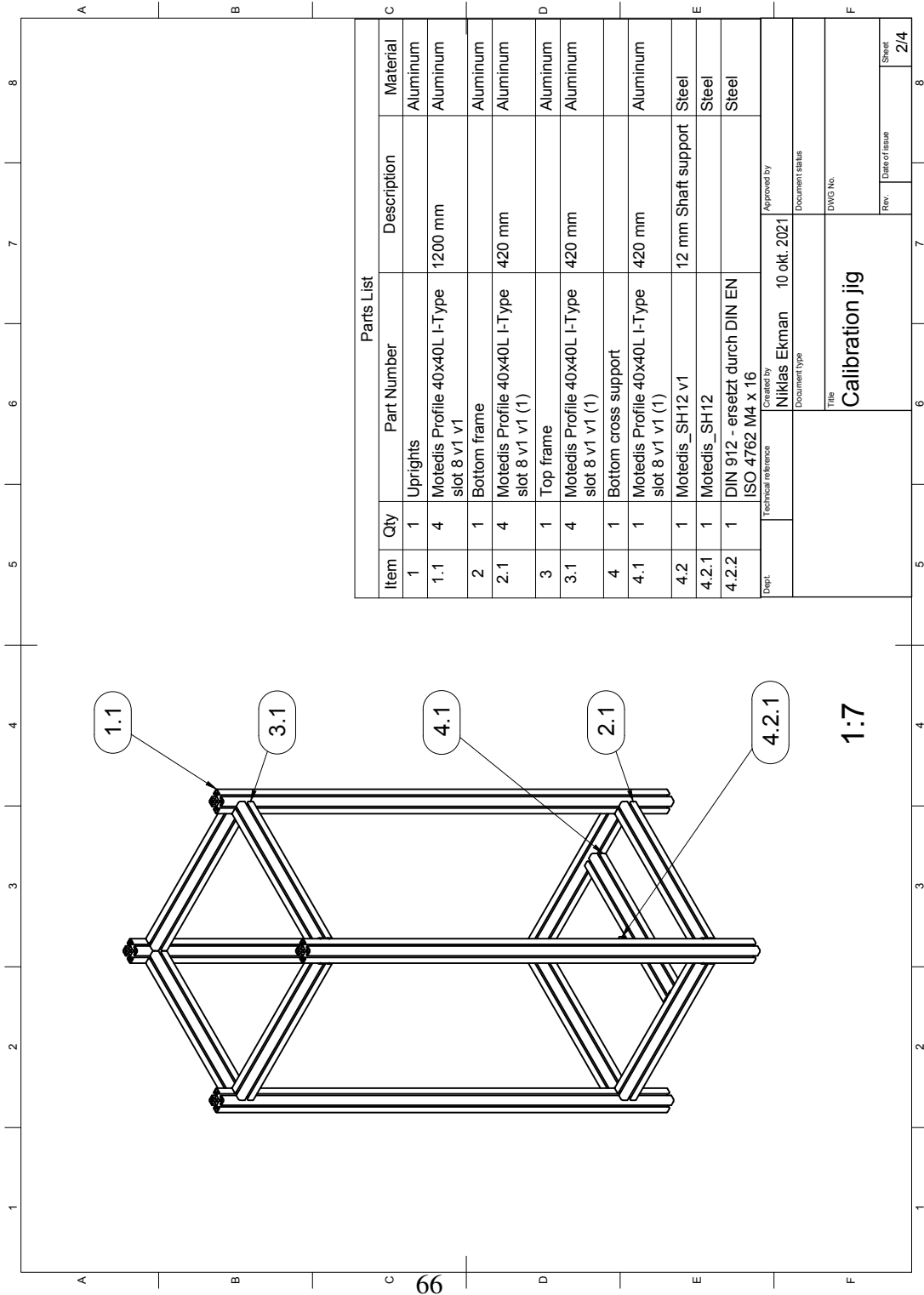
Tabell A.6: Mätdata forts.

| Kalibrerat värde F-B [g] | Kalibrerat värde H-V [g] | Beräknad magnitud [g] | Vinkel ° |
|--------------------------|--------------------------|-----------------------|----------|
| -499.84 | 7.39 | 499.89 | 179.15 |
| -481.07 | -77.22 | 487.23 | 189.12 |
| -448.22 | -169.81 | 479.31 | 200.75 |
| -398.69 | -251.34 | 471.30 | 212.23 |
| -330.76 | -322.80 | 462.17 | 224.30 |
| -257.46 | -388.53 | 466.09 | 236.47 |
| -177.18 | -448.71 | 482.42 | 248.45 |
| -88.27 | -487.47 | 495.40 | 259.74 |
| 3.22 | -513.02 | 513.03 | 270.36 |
| 92.05 | -495.07 | 503.56 | 280.53 |
| 178.51 | -464.81 | 497.91 | 291.01 |
| 258.62 | -413.09 | 487.37 | 302.05 |
| 328.37 | -351.73 | 481.19 | 313.03 |
| 393.81 | -278.69 | 482.45 | 324.71 |
| 445.83 | -194.24 | 486.31 | 336.46 |
| 475.39 | -114.61 | 489.01 | 346.45 |

B. RITNINGAR

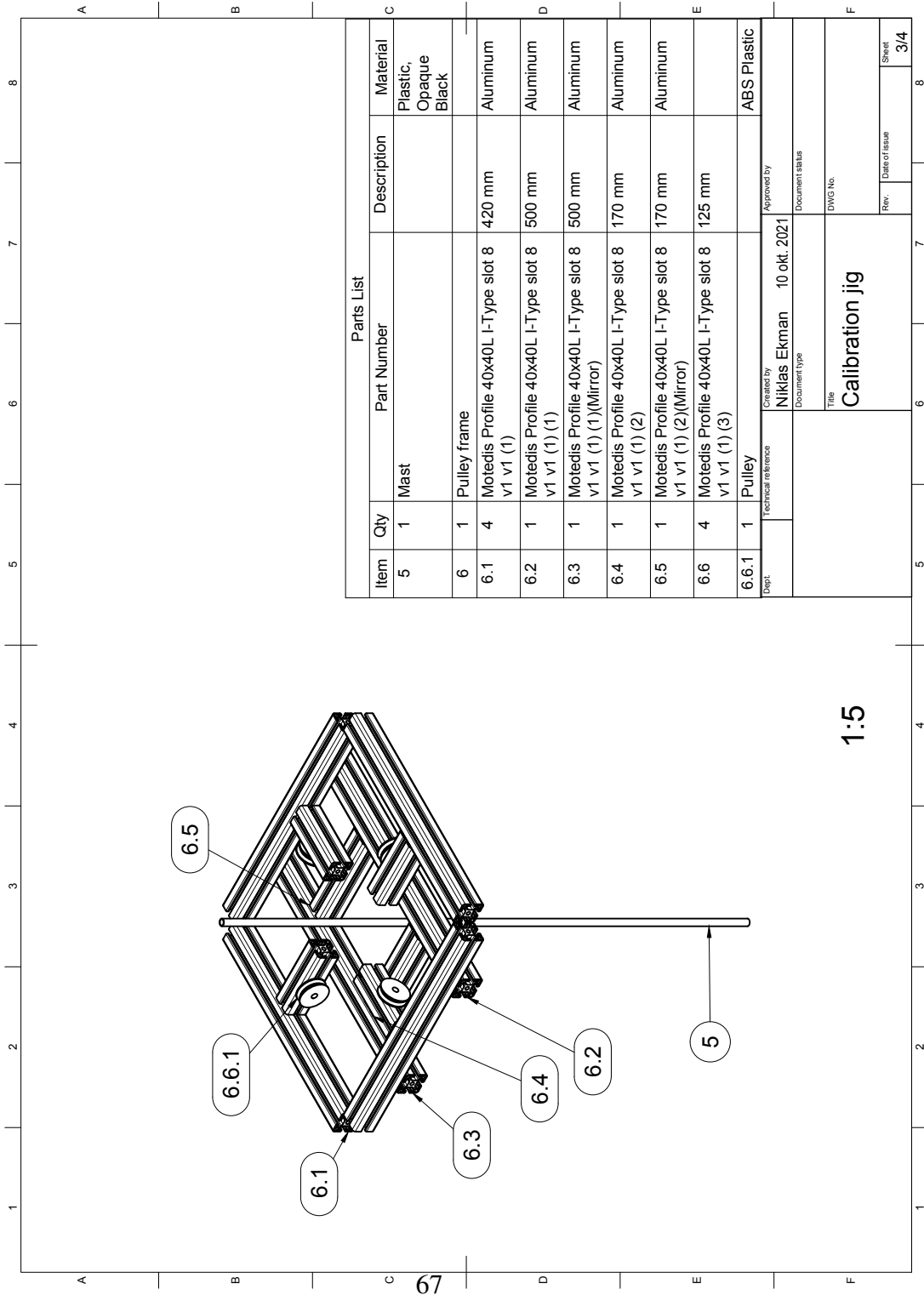


1:10



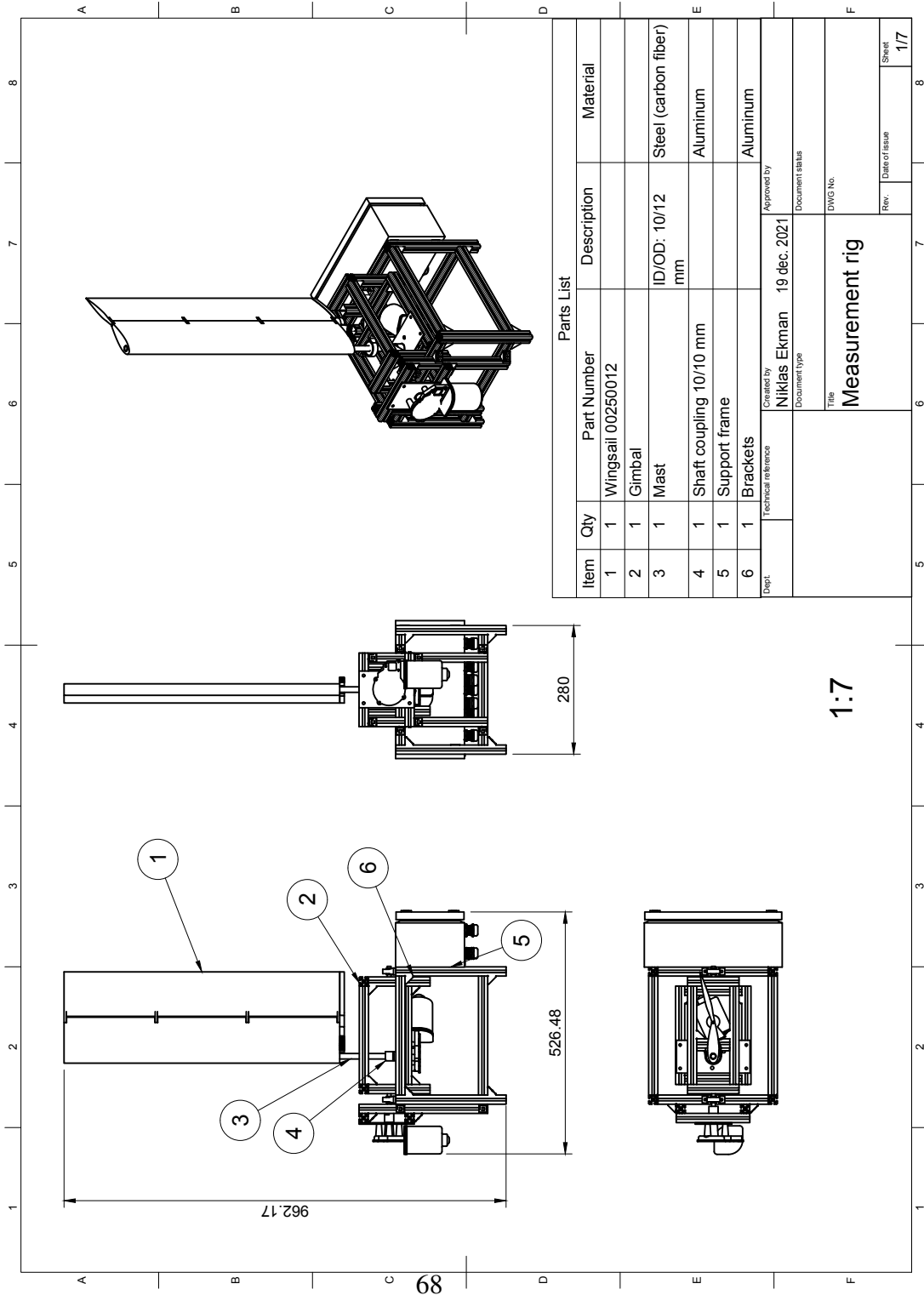
| Parts List | | | | |
|------------|---------------------|---|-----------------------------------|------------------------------------|
| Item | Qty | Part Number | Description | Material |
| 1 | 1 | Uprights | | Aluminum |
| 1.1 | 4 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 | 1200 mm | Aluminum |
| 2 | 1 | Bottom frame | | Aluminum |
| 2.1 | 4 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) | 420 mm | Aluminum |
| 3 | 1 | Top frame | | Aluminum |
| 3.1 | 4 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) | 420 mm | Aluminum |
| 4 | 1 | Bottom cross support | | Aluminum |
| 4.1 | 1 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) | 420 mm | Aluminum |
| 4.2 | 1 | Motedis_SH12 v1 | 12 mm Shaft support | Steel |
| 4.2.1 | 1 | Motedis_SH12 | | Steel |
| 4.2.2 | 1 | DIN 912 - ersetzt durch DIN EN ISO 4762 M4 x 16 | | Steel |
| Dept. | Technical reference | | Created by Niklas Ekman | Approved by 10 okt. 2021 |
| | | Document type | Document status | |
| | | Title | | |
| | | Calibration jig | | |
| | | DWG No. | Rev. | Date of issue |
| | | | | Sheet |
| | | | | 2/4 |

1:7



| Parts List | | | | |
|------------|-----|--|-------------|-----------------------|
| Item | Qty | Part Number | Description | Material |
| 5 | 1 | Mast | | Plastic, Opaque Black |
| 6 | 1 | Pulley frame | | |
| 6.1 | 4 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) | 420 mm | Aluminum |
| 6.2 | 1 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) (1) | 500 mm | Aluminum |
| 6.3 | 1 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) (1)(Mirror) | 500 mm | Aluminum |
| 6.4 | 1 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) (2) | 170 mm | Aluminum |
| 6.5 | 1 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) (2)(Mirror) | 170 mm | Aluminum |
| 6.6 | 4 | Motedis Profile 40x40L I-Type slot 8 v1 v1 (1) (3) | 125 mm | |
| 6.6.1 | 1 | Pulley | | ABS Plastic |

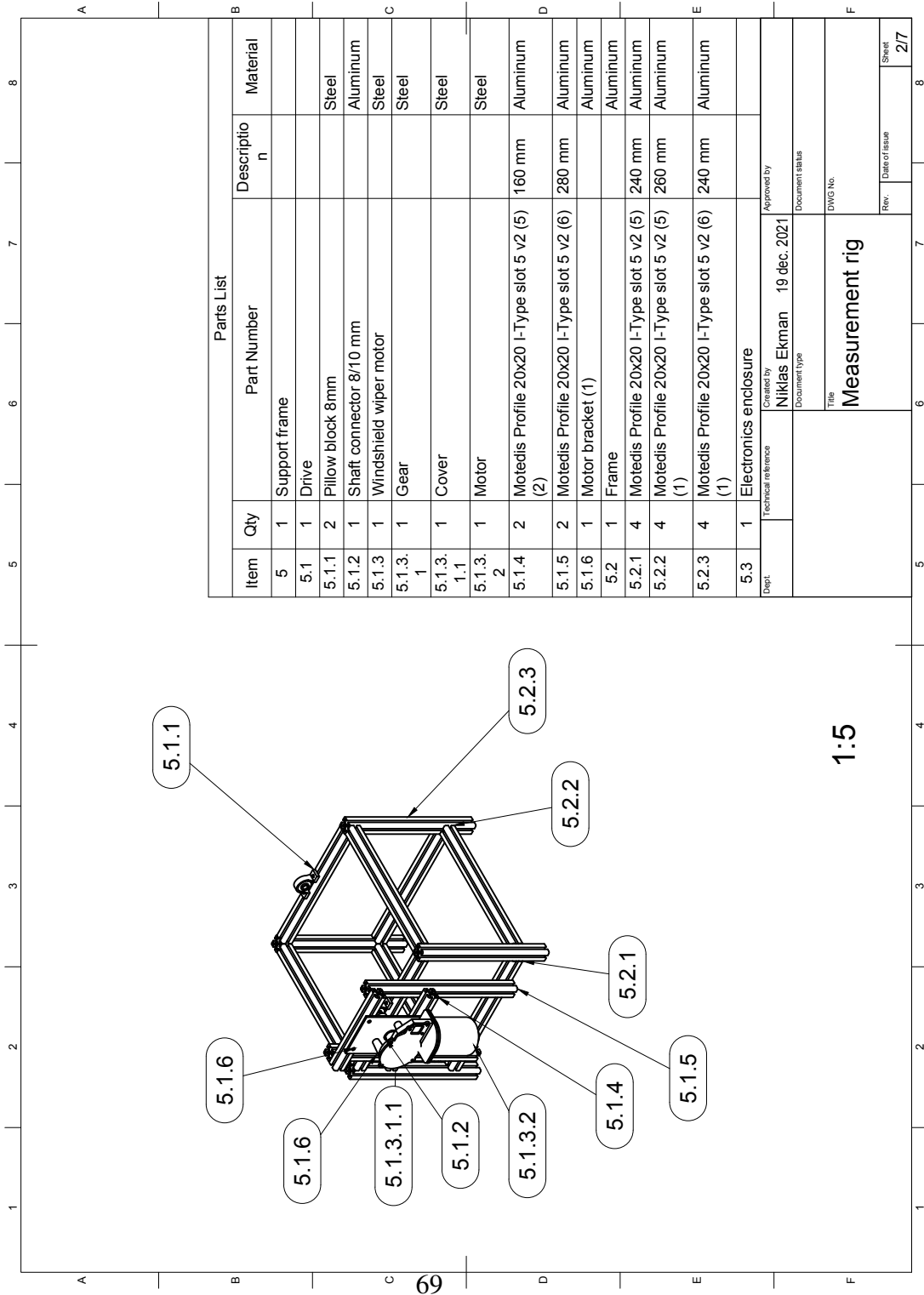
| | | | |
|---------------------------------|---------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Dept. | Technical reference | Created by Niklas Ekman | Approved by |
| | | Document type 10 okt. 2021 | Document status |
| Title Calibration jig | | DWG No. | |
| Rev. | Date of issue | Sheet | |
| | | 3/4 | |



| Item | Qty | Part Number | Description | Material |
|------|-----|-------------------------|--------------------|----------------------|
| 1 | 1 | Wingsail 00250012 | | |
| 2 | 1 | Gimbal | | |
| 3 | 1 | Mast | ID/OD: 10/12 mm | Steel (carbon fiber) |
| 4 | 1 | Shaft coupling 10/10 mm | | Aluminum |
| 5 | 1 | Support frame | | |
| 6 | 1 | Brackets | | Aluminum |

| | | |
|-------|-----------------------------------|-----------------|
| Dept. | Created by Niklas Ekman | Approved by |
| | Document type | Document status |
| | Title Measurement rig | |
| | DWG No. | Rev. |
| | | Date of issue |
| | | Sheet |
| | | 1/7 |

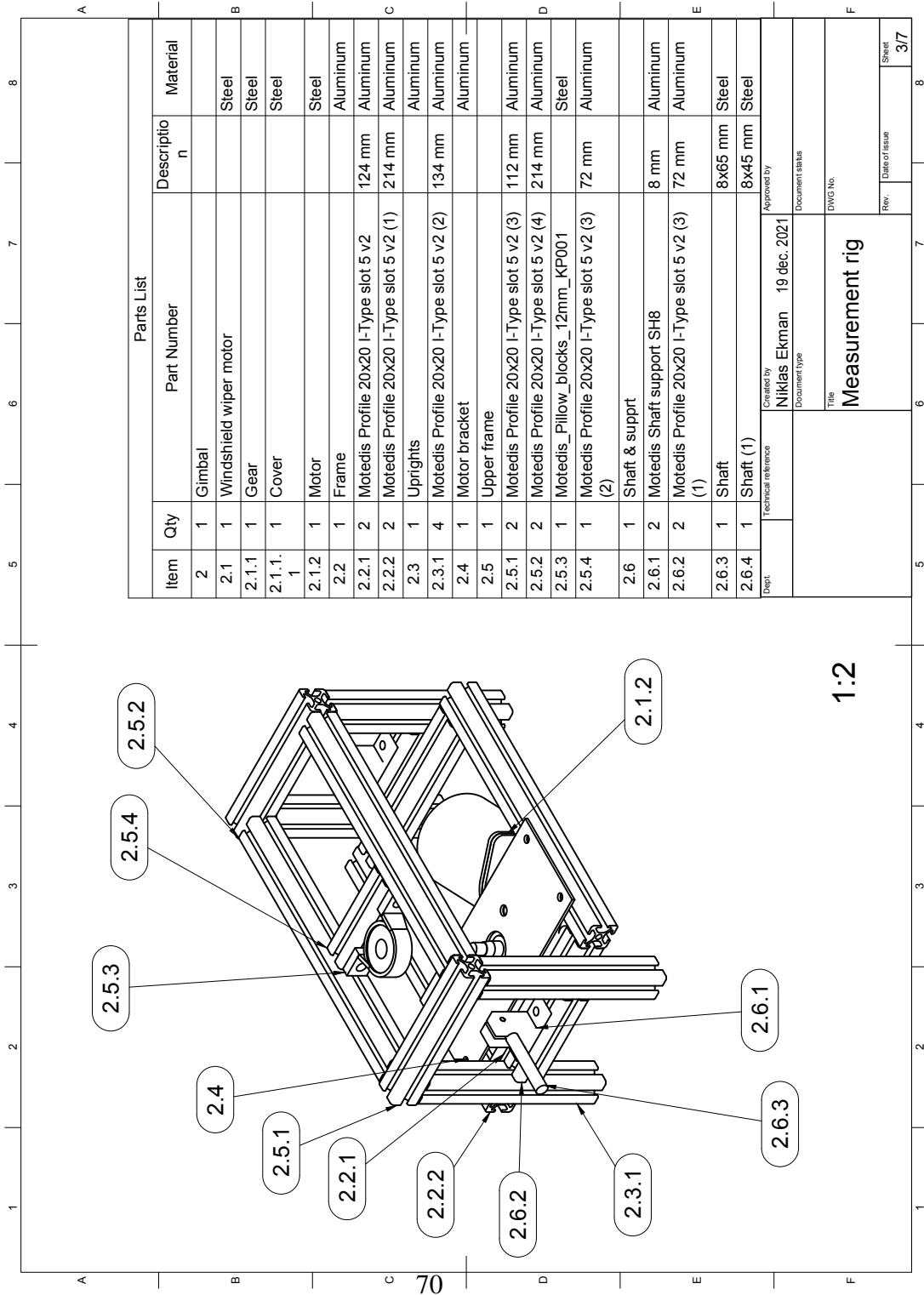
1:7



| Parts List | | | | |
|------------|-----|--|-------------|----------|
| Item | Qty | Part Number | Description | Material |
| 5 | 1 | Support frame | | |
| 5.1 | 1 | Drive | | |
| 5.1.1 | 2 | Pillow block 8mm | | Steel |
| 5.1.2 | 1 | Shaft connector 8/10 mm | | Aluminum |
| 5.1.3 | 1 | Windshield wiper motor | | Steel |
| 5.1.3.1 | 1 | Gear | | Steel |
| 5.1.3.1.1 | 1 | Cover | | Steel |
| 5.1.3.2 | 1 | Motor | | Steel |
| 5.1.4 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (5) | 160 mm | Aluminum |
| 5.1.5 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (6) | 280 mm | Aluminum |
| 5.1.6 | 1 | Motor bracket (1) | | Aluminum |
| 5.2 | 1 | Frame | | Aluminum |
| 5.2.1 | 4 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (5) | 240 mm | Aluminum |
| 5.2.2 | 4 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (5) | 260 mm | Aluminum |
| 5.2.3 | 4 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (6) | 240 mm | Aluminum |
| 5.3 | 1 | Electronics enclosure | | |

| | | | |
|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Dept. | Technical reference | Created by Niklas Ekman | Approved by |
| | | Document type | Document status |
| | | DWG No. | |
| | | Title | |
| | | Measurement rig | |
| | | Rev. | Date of issue |
| | | Sheet | 2/7 |

1:5

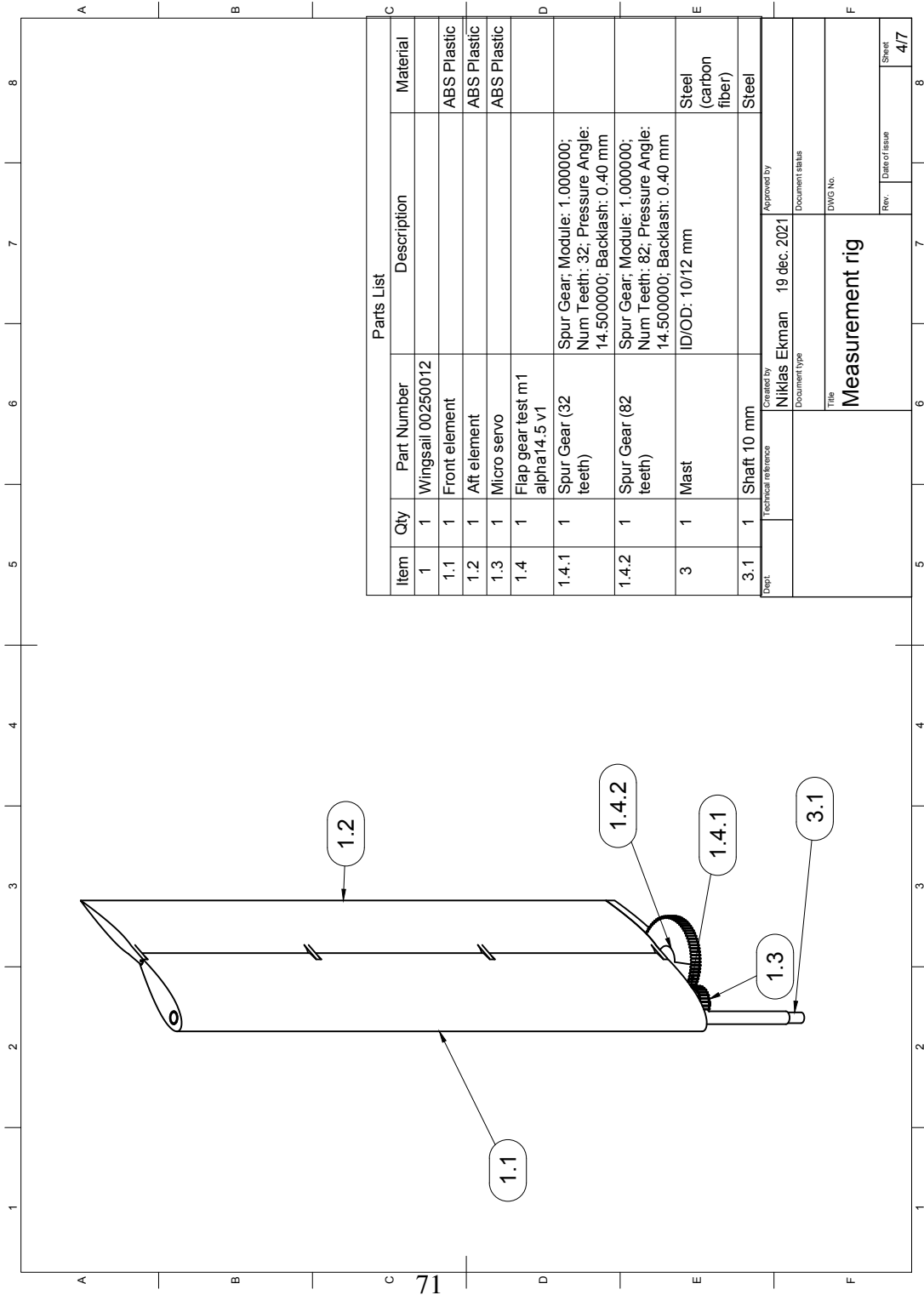


1:2

Parts List

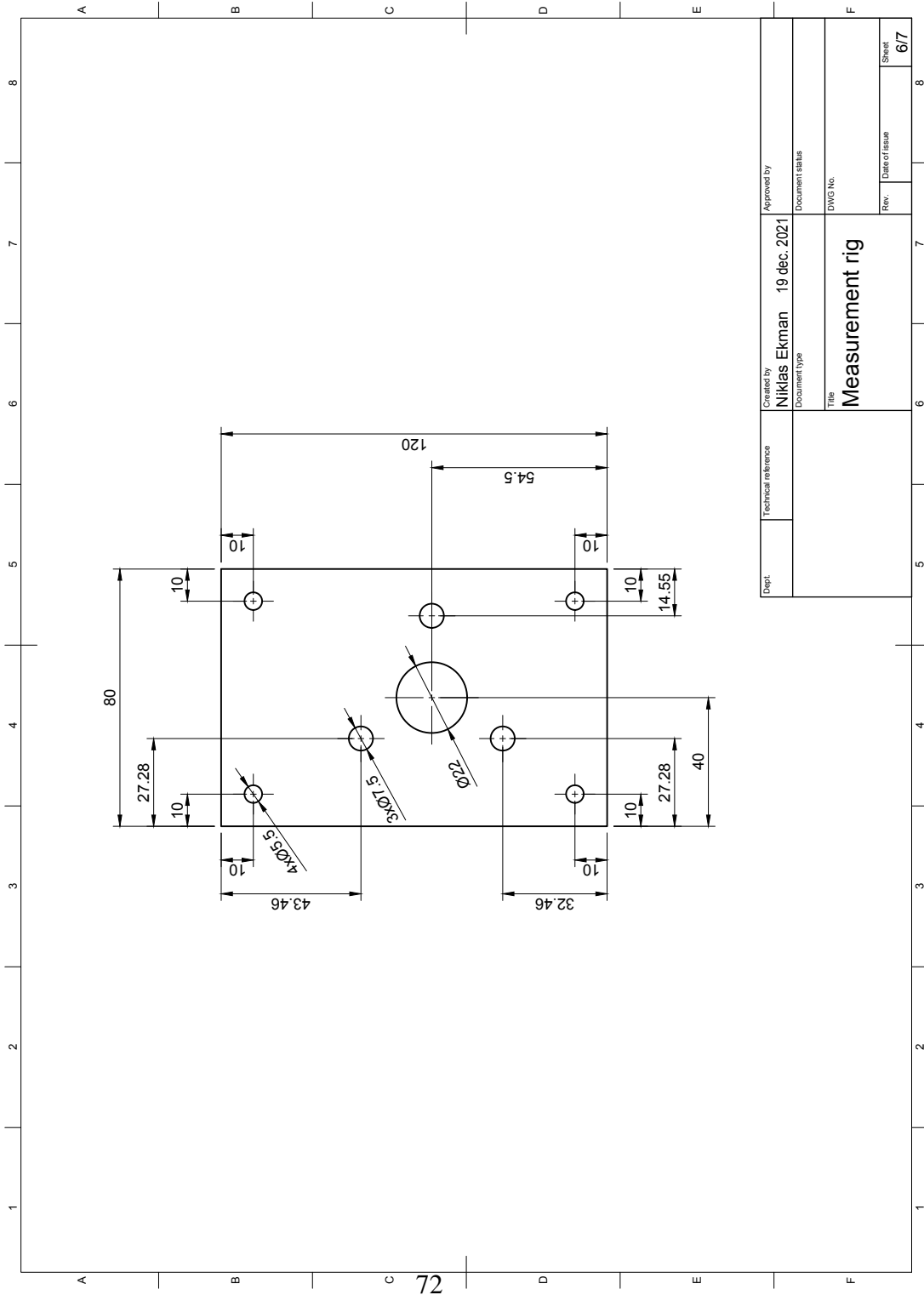
| Item | Qty | Part Number | Description | Material |
|---------|-----|--|-------------|----------|
| 2 | 1 | Gimbal | | |
| 2.1 | 1 | Windshield wiper motor | | Steel |
| 2.1.1 | 1 | Gear | | Steel |
| 2.1.1.1 | 1 | Cover | | Steel |
| 2.1.2 | 1 | Motor | | Steel |
| 2.2 | 1 | Frame | | Aluminum |
| 2.2.1 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 | 124 mm | Aluminum |
| 2.2.2 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (1) | 214 mm | Aluminum |
| 2.3 | 1 | Uprights | | Aluminum |
| 2.3.1 | 4 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (2) | 134 mm | Aluminum |
| 2.4 | 1 | Motor bracket | | Aluminum |
| 2.5 | 1 | Upper frame | | Aluminum |
| 2.5.1 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (3) | 112 mm | Aluminum |
| 2.5.2 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (4) | 214 mm | Aluminum |
| 2.5.3 | 1 | Motedis_Pillow_blocks_12mm_KP001 | | Steel |
| 2.5.4 | 1 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (3) | 72 mm | Aluminum |
| 2.6 | 1 | Shaft & supprt | | |
| 2.6.1 | 2 | Motedis Shaft support SH8 | 8 mm | Aluminum |
| 2.6.2 | 2 | Motedis Profile 20x20 I-Type slot 5 v2 (3) | 72 mm | Aluminum |
| 2.6.3 | 1 | Shaft (1) | 8x65 mm | Steel |
| 2.6.4 | 1 | Shaft (1) | 8x45 mm | Steel |

| | | |
|-----------------|-----------------|--------------|
| Created by | Niklas Ekman | 19 dec. 2021 |
| Document type | Document status | |
| Title | | |
| Measurement rig | | |
| DWG No. | | |
| Rev. | Date of issue | Sheet |
| | | 3/7 |



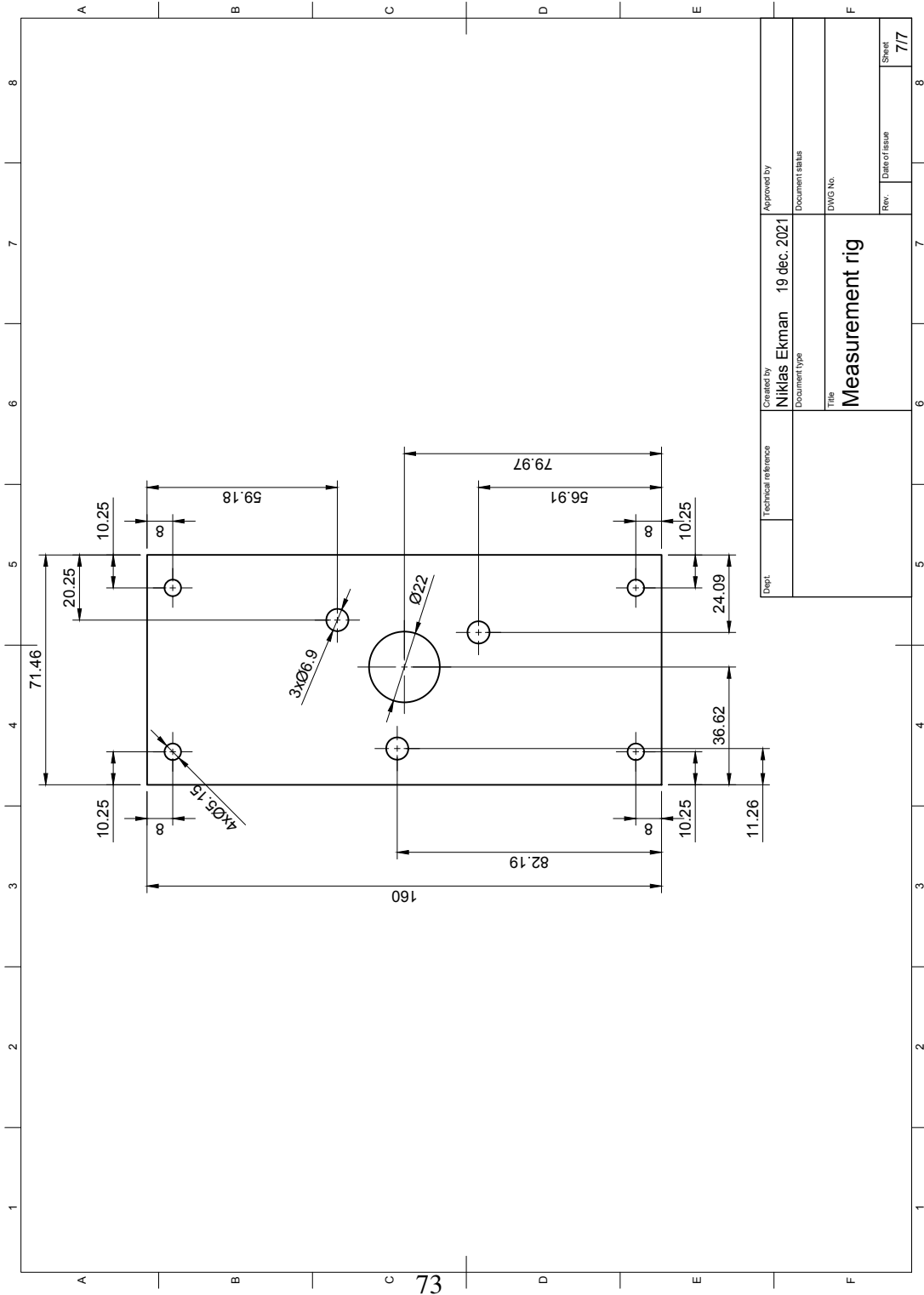
| Parts List | | | | |
|------------|-----|--------------------------------|--|----------------------|
| Item | Qty | Part Number | Description | Material |
| 1 | 1 | Wingsail 00250012 | | |
| 1.1 | 1 | Front element | | ABS Plastic |
| 1.2 | 1 | Aft element | | ABS Plastic |
| 1.3 | 1 | Micro servo | | ABS Plastic |
| 1.4 | 1 | Flap gear test m1 alpha14.5 v1 | | |
| 1.4.1 | 1 | Spur Gear (32 teeth) | Spur Gear, Module: 1.000000; Num Teeth: 32; Pressure Angle: 14.500000; Backlash: 0.40 mm | |
| 1.4.2 | 1 | Spur Gear (82 teeth) | Spur Gear, Module: 1.000000; Num Teeth: 82; Pressure Angle: 14.500000; Backlash: 0.40 mm | |
| 3 | 1 | Mast | ID/OD: 10/12 mm | Steel (carbon fiber) |
| 3.1 | 1 | Shaft 10 mm | | Steel |

| | | |
|-------|-----------------|-----------------|
| Dept. | Created by | Approved by |
| | Niklas Ekman | 19 dec. 2021 |
| | Document type | Document status |
| | | |
| | Title | DWG No. |
| | Measurement rig | |
| | Rev. | Date of issue |
| | | |
| | Sheet | 4/7 |



72

| | | | |
|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Dept. | Technical reference | Created by Niklas Ekman | Approved by |
| | | 19 dec. 2021 | Document status |
| | | Document type | DWG No. |
| | | Title | |
| | | Measurement rig | |
| | | Rev. | Date of issue |
| | | | Sheet |
| | | | 6/7 |



73

| | | | |
|-------|---------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Dept. | Technical reference | Created by Niklas Ekman | Approved by |
| | | Document type | Document status |
| | | 19 dec. 2021 | |
| | | DWG No. | |
| | | Title | |
| | | Measurement rig | |
| | | Rev. | Date of issue |
| | | | Sheet |
| | | | 7/7 |

LITTERATUR

- Benson, T. J. (2021). Reynolds Number [Accessed: 2022-4-8].
- Brown, O. (2021). Mastering the rigging (R. Melotti, Red.). *Practical boat owner*, (664), 56–59.
- Chapin, V., Gourdain, N., Verdin, N., Fiumara, A. & Senter, J. (2015). AERODYNAMIC STUDY OF A TWO-ELEMENTS WINGSAIL FOR HIGH PERFORMANCE MULTIHULL YACHTS. *High Performance Yacht Design Conference*.
- Enqvist, T. J. (2016). Undersökning av Vingsegel Anordning för Robotsegelbåt [Accessed: 2021-9-3].
- Hasler, H. G. & McLeod, J. K. (2015). *Practical Junk Rig: Design, Aerodynamics and Handling*. Tiller Publishing.
- Khan, L., Macklin, J., Peck, B., Morton, O. & Soupez, J.-B. R. G. (2021). A Review Of Wind-Assisted Ship Propulsion For Sustainable Commercial Shipping: Latest Developments And Future Stakes. *Proceedings of the Wind Propulsion Conference 2021*.
- Lindahl, P.-E. & Sandqvist, W. (1996). *Mätgivare*. Studentlitteratur.
- Macgregor, K. (1974). Junks in Lamma channel, Hong Kong.
- Milić Kralj, D. & Klarin, B. (2016). Wing sails for hybrid propulsion of a ship. *J. Sustain. Dev. Energy Water Environ. Syst.*, 4(1), 1–13.
- Murmann, F. (2018). Dreiseitenansicht Cessna 172.
- Pelliccioli, G. & Petrone, N. (2010). Experimental Strain Analysis of the Mast of a 420 Sailboat During Sailing. *Strain*, 46(5), 482–492.

- Pennanen, M., Lindstrand Levin, R., Larsson, L. & Finnsgård, C. (2016). Numerical Prediction of the Best Heel and Trim of a Laser Dinghy. *Procedia Engineering* 147, 336–341.
- Sheldahl, R. E. & Klimas, P. C. (1981). *Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines* (tekn. rapport). Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA).
- Sponberg, E. W. (1983). *Design and Engineering Aspects of Free-standing Masts and Wingmasts* (tekn. rapport). The society of naval architects och marine engineers.
- Sponberg, E. W. (2000). Project Amazon: An Open Class 60 Sailboat for Single-Handed Round-the-World Racing. *Marine Technology*, 37(2), 65–78.
- Wallenius Marine. (2021). Wallenius and Alfa Laval will join forces to make Oceanbird a reality [Accessed: 2021-10-16].
- Waller, M., Dhome, U., Kutteneuler, J. & Ruina, A. (u. å). *Autonomous rigid-wing sailboats—Force balances for monitoring sailing performance* [Unpublished manuscript].
- Wikipedia contributors. (2021a). AC72 [Accessed: 2022-4-7].
- Wikipedia contributors. (2021b). Wingsail [Accessed: 2022-4-6].
- Wikipedia contributors. (2022a). Cessna 172 [Accessed: 2022-4-7].
- Wikipedia contributors. (2022b). Junk rig [Accessed: 2022-4-6].
- Wikipedia contributors. (2022c). Stall (fluid dynamics) [Accessed: 2022-4-7].