

**MERA**   
Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

**Bacheloroppgave**

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	23.05.17	Dokument opprettet	Eivind Foss-Pedersen
1.0	23.05.17	Ferdigstilt	Cecilie Dokken

## Innholdsfortegnelse

Introduksjon . . . . .	9
Forkortelser . . . . .	10
<b>1 Prosjektplan</b>	<b>11</b>
1.1 Introduksjon . . . . .	15
1.2 Bakgrunn . . . . .	16
1.3 Modell . . . . .	18
1.4 Organisering . . . . .	20
<b>2 SCRUM</b>	<b>23</b>
2.1 Introduksjon . . . . .	26
2.2 Sprint oppstart . . . . .	29
2.3 Sprint 1 . . . . .	30
2.4 Sprint 2 . . . . .	32
2.5 Sprint 3 . . . . .	35
2.6 Sprint 4 . . . . .	39
2.7 Sprint 5 . . . . .	41
2.8 Sprint 6 . . . . .	45
2.9 Sprint 7 . . . . .	49
<b>3 Kravspesifikasjon</b>	<b>51</b>
3.1 Introduksjon . . . . .	55
3.2 Oppsett . . . . .	56
3.3 User stories . . . . .	58
3.4 Funksjonelle krav . . . . .	60
3.5 Egenskapskrav . . . . .	63
3.6 Restriksjoner . . . . .	64
3.7 Grensesnitt . . . . .	64
<b>4 Testspesifikasjon</b>	<b>65</b>
4.1 Introduksjon . . . . .	69
4.2 Strategi . . . . .	70
4.3 Oppsett . . . . .	71
4.4 Testspesifikasjoner . . . . .	73
4.5 Testrapporter . . . . .	83
<b>5 Design</b>	<b>88</b>
5.1 Introduksjon . . . . .	93
5.2 Konsept . . . . .	94
5.3 Ground Effect . . . . .	101

5.4	Innfesting . . . . .	104
5.5	Materialvalg innfestning . . . . .	108
5.6	Destructive testing . . . . .	115
5.7	Prototype konstruksjon . . . . .	133
5.8	Sensorarm . . . . .	144
5.9	Variabel pitch . . . . .	151
5.10	Moment i innfestning . . . . .	158
5.11	CNC Tilvirkning . . . . .	178
5.12	Ledningsnett . . . . .	185
5.13	Sikkerhet . . . . .	190
<b>6</b>	<b>Maskinvare</b>	<b>196</b>
6.1	Innledning . . . . .	200
6.2	Mikrokontroller . . . . .	201
6.3	Sensorer . . . . .	205
6.4	Kretskortdesign . . . . .	221
6.5	Måleriggens oppløsning . . . . .	227
<b>7</b>	<b>Programvare</b>	<b>233</b>
7.1	Introduksjon . . . . .	237
7.2	Arduino programvare . . . . .	238
7.3	GUI . . . . .	243
	Konklusjon . . . . .	248
<b>8</b>	<b>Referanser</b>	<b>250</b>
<b>9</b>	<b>Vedlegg</b>	<b>254</b>
	Vedlegg 1: Måleverdier . . . . .	257
	Vedlegg 2: GUI-kode . . . . .	260
	Vedlegg 3: Arduino - programkode . . . . .	266
	Vedlegg 4: CNC-kode tilvirkning av motorfester . . . . .	276
	Vedlegg 5: AttoPilot simulering . . . . .	286
	Vedlegg 6: Materialer brukt i materialvalg analyser . . . . .	287
	Vedlegg 7: Simulering av kretsdesign . . . . .	290
	Vedlegg 8: Versjonskontroller . . . . .	292
	Vedlegg 9: DAK 2D tegninger . . . . .	299
	Vedlegg 10: Kretstegning for maskinvare . . . . .	304

## Figurer

1.1	Gantt-diagram . . . . .	20
1.2	Sprintoversikt . . . . .	21
2.1	Sprintoversikt . . . . .	28
2.2	Burndown chart sprint 1 . . . . .	30
2.3	Burndown chart sprint 2 . . . . .	34
2.4	Endelig prototype . . . . .	36
2.5	Burndown chart sprint 3 . . . . .	38
2.6	Burndown chart sprint 4 . . . . .	40
2.7	Konseptforbedringer . . . . .	42
2.8	Variabel pitch mekanisme . . . . .	42
2.9	Burndown chart sprint 5 . . . . .	44
2.10	Tilvirkning motorfester . . . . .	46
2.11	Kabelkanal med lokk . . . . .	47
2.12	Variabel pitch mekanisme og motor . . . . .	47
2.13	Burndown chart sprint 7 . . . . .	50
3.1	User story diagram . . . . .	56
3.2	Diagram for krav . . . . .	56
3.3	Prioritering av krav . . . . .	57
5.1	Konsept 1 - Bordmontert . . . . .	95
5.2	Konsept 2 - Frittstående . . . . .	96
5.3	Konsept 3 - Bord . . . . .	97
5.4	Konsept 3 - Innfesting . . . . .	97
5.5	In ground effect hover - hentet fra [1] . . . . .	102
5.6	Out of ground effect hover - hentet fra [1] . . . . .	103
5.7	Skyvekraft . . . . .	105
5.8	DJI E800 Innfesting ( <i>E800 user manual, 23.01.15</i> )[3] . . . . .	106
5.9	Simulering av innfestning med skruer og maks kraft fra liten konfigurasjon. . . . .	109
5.10	Illustrasjon av hvordan kreftene spres i festeanordningen. . . . .	110
5.11	Spenningene i den store festeanordningen sett nedenfra. . . . .	111
5.12	Spenningene som opptrer ved bruk av en chamfer. . . . .	111
5.13	Festeanordninger i stål med chamfer . . . . .	112
5.14	Festeanordninger i aluminium med chamfer . . . . .	113
5.15	Festeanordninger i aluminium uten chamfer . . . . .	114
5.16	Nyeste versjon sopper . . . . .	116
5.17	Gjenskapt oppspenning av sopp . . . . .	117
5.18	Materialstrekkmaskin type Lloyd Ir10K . . . . .	118
5.19	Skjematisk fremvisning av defleksjon (overdrevet) . . . . .	120

5.20	Brudd i overgang, på tvers av hull . . . . .	122
5.21	Brudd over innspenningshull . . . . .	123
5.22	Brudd i skaftet, nær innspenning . . . . .	124
5.23	Brudd i overgang fra innfesting til skaft . . . . .	125
5.24	Brudd i overgang mellom innspenning og skaft . . . . .	126
5.25	Brudd ved innfestingshull . . . . .	127
5.26	Skjematisk tverrsnitt av bruddflate . . . . .	128
5.27	Kraft som funksjon av nedbøying . . . . .	129
5.28	Kraft som funksjon av nedbøying for stor sopp med nytt design . . . . .	130
5.29	Prototype . . . . .	134
5.30	Beregning av massesentrum og sikkerhet mot velt . . . . .	136
5.31	Rammeverk . . . . .	139
5.32	Sensormodul prototype . . . . .	140
5.33	Soppene . . . . .	140
5.34	Lastcelle . . . . .	141
5.35	Aluminiumsbrakett for fiksering av lastcelle . . . . .	142
5.36	Akrylplaten . . . . .	142
5.37	Infrarød temperatursensor, <i>Infrared Thermometer - MLX90614</i> <i>Sparkfun.com 2017[6]</i> . . . . .	144
5.38	Infrarød refleksjonssensor, <i>rhydolabz.com 2017</i> . . . . .	145
5.39	Sensorarmen i sin helhet . . . . .	146
5.40	Horisontal bærearmer . . . . .	147
5.41	Vinkelarm med ledd . . . . .	147
5.42	Sensorbrakett . . . . .	149
5.43	Sensorarmen montert til sensormodul . . . . .	150
5.44	Konsept 1, <i>MERA 2017</i> . . . . .	152
5.45	Konsept 2, <i>MERA 2017</i> . . . . .	153
5.46	Konsept 3, <i>MERA 2017</i> . . . . .	154
5.47	Servo fiksert til adapter, <i>MERA 2017</i> . . . . .	155
5.48	Innlegg/adapter, <i>MERA 2017</i> . . . . .	156
5.49	Eksempelmotor i et koordinatsystem . . . . .	158
5.50	Skjematisk fremstilling av YAW ved manøvrering [7] . . . . .	159
5.51	Vridning i en sirkulær aksel . . . . .	161
5.52	Lastcelle med koordinatsystem . . . . .	163
5.53	Arealmoment om ei flate . . . . .	165
5.54	Virkningsmekanismen for kombinert sopp og lastcelle . . . . .	167
5.55	Lastcelle PC22 . . . . .	168
5.56	Sopp profil . . . . .	170
5.57	Fiksering og last . . . . .	171
5.58	Meshets spesifikasjoner . . . . .	172

5.59	Soppens relative forlengelse . . . . .	173
5.60	DJI 1345-s propell, klippet opp. <i>MERA 2017</i> . . . . .	175
5.61	Mettler Toledo vekt. <i>MERA 2017</i> . . . . .	176
5.62	HAAS Mini Mill, Super Mini Mill 2017 [11] . . . . .	179
5.63	Verktøy . . . . .	179
5.64	CNC-tilvirkning. . . . .	182
5.65	Vi freser ut 2 deler for å utnytte emnet best mulig. . . . .	183
5.66	Motorfeste ferdig maskinert. . . . .	183
5.67	Kabelkanalen . . . . .	186
5.68	Tilkoblingspunkt for nødstoppp-panelet. . . . .	187
5.69	Lodding av sensorkabler . . . . .	188
5.70	ERSA loddebolt . . . . .	189
5.71	Temperatursensor med konnektorer. . . . .	190
5.72	3D-modell av propellbeskyttelsen. . . . .	191
5.73	En halvdel av beskyttelsesringen. . . . .	192
5.74	Festebrakett . . . . .	192
5.75	Beskyttelsesringen etter bøyning. . . . .	193
5.76	Festebrakett . . . . .	193
5.77	Festebrakett før boring. . . . .	194
5.78	3D-modell av nødstoppp-panelet. . . . .	194
6.1	Arduino M0 PRO . . . . .	201
6.2	Arduino DUE . . . . .	202
6.3	Strekklapp . . . . .	206
6.4	Wheatstone bro . . . . .	207
6.5	Lastcelle . . . . .	208
6.6	Punktlast gjennom skruehull . . . . .	209
6.7	Tilsvarende punktlast med en 100mm arm . . . . .	210
6.8	Stator og rotor i børsteløs DC motor . . . . .	211
6.9	Infrarød diode og fototransistor . . . . .	214
6.10	AttoPilot skjemattegning . . . . .	219
6.11	Skjemattegning for kretsen . . . . .	221
6.12	INA193-INA198 [26] . . . . .	222
6.13	PCB design . . . . .	225
6.14	Grafisk fremvisning av lineærhetsfeil (1) og hysteres (2), VPG Transducers 2015 [33] . . . . .	229
6.15	Temperatureffekt ved minimumslast (1) og temperaturfølsomhet (2), VPG Transducers 2015 [34] . . . . .	230
7.1	GUI slik gruppen ser for seg den skal være når den er helt ferdig . . . .	244
7.2	Flyttdiagram av hvordan GUI fungerer . . . . .	246

9.1	Måleverdier for segment 1-26 . . . . .	257
9.2	Måleverdier for segment 26-46 . . . . .	258
9.3	Massens fordeling over radiusen . . . . .	259
9.4	Arduino program 1, del 1. . . . .	266
9.5	Arduino program 1, del 2. . . . .	267
9.6	Arduino program 1, del 3. . . . .	268
9.7	Arduino program 1, del 4. . . . .	269
9.8	Arduino program 1, del 5. . . . .	270
9.9	Arduino program 2, del 1. . . . .	271
9.10	Arduino program 2, del 2. . . . .	272
9.11	Arduino program 2, del 3. . . . .	273
9.12	Arduino program 2, del 4. . . . .	274
9.13	Arduino program 2, del 5. . . . .	275
9.14	Simulering av AttoPilot . . . . .	286
9.15	Materialeegenskapene til akryl brukt under FEM-analyser ved materialvalg	287
9.16	Materialeegenskapene til aluminium 6061-t6 brukt under FEM-analyser ved materialvalg . . . . .	288
9.17	Materialeegenskapene til konstruksjonsstål brukt under FEM-analyser ved materialvalg . . . . .	289
9.18	Strøm og effekt simulert i kretsdesign . . . . .	290
9.19	Spenning simulert i kretsdesign . . . . .	291
9.20	2x4 tegning . . . . .	299
9.21	2x4 tegning søyle . . . . .	300
9.22	2x4 tegning vertikal søyle . . . . .	301
9.23	Oppspenningskisse . . . . .	302
9.24	Innfestning lastcelle . . . . .	303
9.25	Kretstegning for maskinvare . . . . .	304



## Tabeller

2.1	Sprint oppstart . . . . .	29
2.2	Sprint 1 . . . . .	31
2.3	Pugh-matrise kvantifisert . . . . .	32
2.4	Sprint 2 . . . . .	33
2.5	Sprint 3 . . . . .	37
2.6	Sprint 4 . . . . .	39
2.7	Sprint 5 . . . . .	43
5.1	Pugh-matrise for konsept . . . . .	98
5.2	Pugh-matrise kvantifisert . . . . .	99
6.1	Spesifikasjoner for Arduino M0 PRO . . . . .	202
6.2	Spesifikasjoner for Arduino DUE . . . . .	203
6.3	Spesifikasjoner for TMP36 . . . . .	215
6.4	Spesifikasjoner for MLX90614 . . . . .	216
6.5	Spesifikasjoner for BMP180 . . . . .	217
6.6	Spesifikasjoner for kretskort . . . . .	226
7.1	Biblioteker brukt i Arduino programkode . . . . .	239
7.2	Funksjoner brukt i Arduino programkode . . . . .	240
7.3	Datastruktur brukt i Arduino programkode . . . . .	241

# Introduksjon

Målet med prosjektet var å designe og konstruere en målerigg som kan hente ut egenskaper som løftekraft, effektivitet og responsivitet hos forskjellige konfigurasjoner av motor, rotor og electronic speed controller (ESC) tilhørende et multikopter, for rotorer opp til 17" i størrelse.

Oppgaven er gitt av Forsvarets Forskningsinstitutt, som vil bruke måleriggen i forskning på å bestemme hvilke oppsett av motor, rotor og ESC som har riktige egenskaper for miljøet multikopteret skal operere i, og har riktige egenskaper for operasjonene multikopteret skal utføre. Høgskolen skal beholde måleriggen med den hensikt at den skal brukes i forbindelse med fremtidige studentprosjekter som omhandler droner i samarbeid mellom Høgskolen i Sørøst-Norge (HSN) og FFI.

Prosjektplanen har gitt retningslinjer for utføringen av prosjektet for å sikre ferdigstilling innen fristen. SCRUM modellen ble brukt for å strukturere arbeidet fra et *Systems Engineering* perspektiv. Arbeidet foregikk gjennom 7 *sprint*, arbeidsperiode på normalt 2 uker, hvor alle sprintene hadde forskjellig fokus og innhold men samme overordnede mål om å videreutvikle produktet. For å kunne oppfylle kunden sine ønsker og ikke utvikle feil produkt startet utviklingen med en sprint med hovedfokus på krav- og testspesifikasjoner. Etter dette fulgte en konseptutviklingssprint, hvor hensikten var å utvikle et konsept som oppfyller kundes krav og ønsker. Et konsept ble valgt og en prototype ble konstruert og godkjent av kunde. Prosjektet ble videreutviklet med utgangspunkt i prototypen og med kravspesifikasjonen som retningslinje.

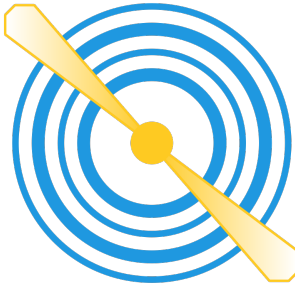
Ved prosjektets slutt var det produsert en målerigg med tilhørende måleprogrammer forhåndsprogrammert i en *Arduino* mikrokontroller. Måleriggen er kompatibel med motorer som har innfestning med dimensjonene 16x19mm og fra 25x25mm opp til 30x30 mm som bruker M3 skruer. Måling foregår ved avlesning fra en lastcelle, som måler løftekraften motor, rotor og ESC konfigurasjonen kan generere. Ved videre utvikling av produktet ville prosjektgruppen fokusert på en bedre løsning for å måle omdreiningshastighet og utvikling av et bedre brukergrensesnitt.

# Forkortelser

Forkortelse	Forklaring
ABS	Akrylnitril-butadien-styren
ADC	Analog Digital Converter
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNC	Computer Numerical Control
DAC	Digital Analog Converter
DAK	Data Assistert Konstruksjon
DC	Direct Current
DT	Destruktiv testing
ESC	Electronic Speed Controller
FEM	Finite Element Method
FFI	Forsvarets Forskningsinstitutt
GANTT	Generalized Activity Normalization Time Table
GUI	Graphical User Interface
HSN	Høgskolen i Sørøst-Norge
HSS	High Speed Steel
IDE	Integrated Development Environment
IR	Infrared Radiation
MERA & Multicopter Engine	Rotor Analyser
MPa	Megapascal
OIML	Organisation Internationale de Métrologie Légale (International Organization of Legal Metrology)
PCB	Printed Circuit Board
RPM	Runder Per Minutt
SCL	Serial Clock Line
SDA	Serial Data Line
SMBus	System Management Bus
USB	Universal Serial Bus
V&V	Verifisering og validering



# MERA



Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Prosjektplan

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Prosjektplanen omfatter hva prosjektet dreier seg om og hvordan prosjektet er lagt opp for å komme i mål med best mulig resultat.

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	12.01.17	Dokument opprettet	Eivind Foss-Pedersen
0.1	25.01.17	Redigert hovedplan og modell	Eivind Foss-Pedersen
1.0	02.02.17	Revidert	Cecilie Dokken
1.1	03.02.17	Revidert	Cecilie Dokken
1.2	08.03.17	Introduksjon endret	Truls Øhrn
2.0	27.03.17	Revidert for publisering	Halvard Fredrik

## Innholdsfortegnelse

<b>1.1</b>	<b>Introduksjon</b>	15
<b>1.2</b>	<b>Bakgrunn</b>	16
1.2.1	Problemstilling	16
1.2.2	Målsetning	16
1.2.3	Kostnadsbudsjett	17
1.2.4	Avgrensninger	17
<b>1.3</b>	<b>Modell</b>	18
1.3.1	SCRUM	18
1.3.2	Modifikasjoner	19
<b>1.4</b>	<b>Organisering</b>	20
1.4.1	GANTT	20
1.4.2	Sprinter	21
1.4.3	Milepæler	21
1.4.4	Ansvarsområder	22

# 1.1 Introduksjon

Forsvarets forskningsinstitutt, heretter forkortet til FFI, er underlagt Forsvarsdepartementet. FFI er opprettet for å drive forskning og utvikling for forsvarets behov. Forskningsområdene spenner fra sikkerhetspolitikk og strategi til teknisk utvikling av militært utstyr. FFI har også ansvar for å holde tritt med utviklingen innen vitenskap og teknologi som vil ha innvirkning på forsvarssektoren og den forsvarspolitiske situasjon.

En drone er en ubemannet autonom eller fjernstyrt farkost. Dette er teknologi som har eksistert i lang tid, men som stadig utvikles og får flere bruksområder. Det finnes ulike type droner, men i dette prosjektet dreier det seg om multikoptere. Droner brukes av både sivilt og militært personell. Forsvaret har bruk for droner til ulike formål, blant annet overvåkning og informasjonsinnhenting. Det er behov for flere typer droner med ulike egenskaper til ulike formål. Dette fører igjen til et behov for et verktøy som kan bidra til å undersøke egnetheten og potensielle forbedringer av dronen.



# 1.2 Bakgrunn

FFI har i forbindelse med sin forskning på droner og multikoptere fått behov for å kunne måle forskjeller i egenskapene ved forskjellige kombinasjoner av motor, Electronic Speed Control (ESC) og propell. Dette gjelder propeller både med og uten variabel pitch. Ut ifra målingene skal FFI kunne ta en avgjørelse om hvilket oppsett som passer best i en gitt situasjon eller et gitt miljø.

## 1.2.1 Problemstilling

På bakgrunn av oppdragsgivers behov har vi fått i oppgave å designe og konstruere en målerigg som skal kunne undersøke og hente ut de måledataene FFI har behov for. Denne måleriggen skal plasseres i en lab uten videre behov for å flytte den. Oppdragsgiver skal kunne montere ønsket kombinasjon av motor, ESC og propell, og måleriggen skal så kunne utføre målinger og oppgi resultatene digitalt. Det skal utvikles et måleprogram som måleriggen skal utføre på egenhånd. Målingene som skal utføres er blant annet maks skyvekraft, responstid og effektivitet (gram/watt). Måleresultatene brukes til å finne beste mulige kombinasjon til dronens planlagte formål.

## 1.2.2 Målsetning

Målet for dette prosjektet er å kunne levere en grundig og gjennomført rapport som tilfredsstillende oppdragsgiverene sine krav og forventninger. Samtidig som vi fokuserer på å gi FFI et godt resultat, vil vi også sikte på å gjennomføre prosjektet i henhold til skolens forventninger og krav for prosjektstyring. Herunder menes det å opparbeide en ryddig og helhetlig portfolio med dokumentasjon. Vi ønsker at FFI og HSN sitter igjen med et godt inntrykk av prosjektgruppa når prosjektet er ferdig. I løpet av hele prosjektet legges det også vekt på egenutvikling og å ta steget fra ingeniørstudent til ingeniør. Derfor fokuserer vi på:

- God kommunikasjon, både internt og eksternt
- Prosjektmedlemmene er gode representanter for både skolen og individuelt
- Prosjektmedlemmene jobber målrettet og har god flyt i arbeidet
- Høy kvalitet og interesse til eget arbeid

For å oppnå disse målene stiller vi strenge krav til prosjektgruppa både felles og individuelt.

Mer spesifikt ønsker vi at når prosjektet er fullført kan vi levere et produkt som oppdragsgiver finner verdifullt og kan anvendes og videreutvikles.

### **1.2.3 Kostnadsbudsjett**

Kostnadene relatert til prosjektet vil dekkes av HSN. Dette budsjettet har et tak på inntil kr 15 000. Utgiftspostene vil i hovedsak være tilknyttet innkjøp av blant annet materialer og elektriske komponenter.

### **1.2.4 Avgrensninger**

Prosjektet vil i stor grad bli styrt av tidsfrister. Disse fristene representerer de forskjellige presentasjonene som skal holdes iløpet av prosjektet. Her vil siste innlevering, 24. mai 2017, være frist for at alt arbeid skal være ferdigstilt. Utover dette vil arbeidsmetoder og særlig hva arbeidsoppgavene skal inneholde, bli begrenset av modellen vi har valgt å arbeide etter.

# 1.3 Modell

Som modell har vi valgt SCRUM, fordi dette framstod som en anvendelig og forståelig modell som lett kunne modifiseres. Det negative ved SCRUM for dette prosjektet er at det er en modell som hovedsaklig er laget for software-utvikling, og vi har derfor måttet gjøre visse modifikasjoner.

## 1.3.1 SCRUM

SCRUM er en agile-metode utviklet for software utvikling. Den baserer seg på at man arbeider i iterasjoner, som i SCRUM blir kalt sprinter, med en varighet på normalt 2 uker. Modellen er veldig tilpasningsdyktig som følge av planleggingsmetodene som brukes, dette tillater at endringer kan bli gjort uten at det har videre konsekvenser for planene senere i prosjektet.

I SCRUM har man tre roller, dette er product owner, scrum master og prosjektmedlem. Product owner er en person som kommer med idéene om hva produktet skal inneholde eller oppfylle. Product owner har jevnlig kontakt med eventuelle kunder og bestemmer med dette hva prosjektet skal ende med. Scrum master er gjerne prosjektlederen, og bestemmer derfor hva som skal gjøres når og hvordan dette skal gjennomføres. Han har også et overordnet ansvar for at prosjektet har framgangen det skal i tillegg til å holde møter for å styre det daglige. Prosjektmedlemmene får tildelt oppgaver de skal gjøre eller problemer de skal løse, og med dette også ansvaret for at dette gjennomføres.

Product owner lager seg en ønskeliste over funksjoner han/hun vil at produktet skal oppfylle, denne listen kalles en product backlog og er fylt av user stories i prioritert rekkefølge. En user story beskriver et av ønskene til product owneren. Denne listen bruker scrum masteren og prosjektmedlemmene når de planlegger hva de skal gjøre i en fase som heter sprint planning. Her velger de et utvalg av user stories etter prioritering som de vil implementere iløpet av den kommende sprinten.

Når sprinten er satt i gang vil oppgaver bli tildelt det enkelte prosjektmedlemmet basert på user storiene som skal implementeres. For å holde kontroll på prosjektet og sørge for at alle prosjektmedlemmene og product owneren holder scrum masteren et daglig møte som heter daily scrum. I dette møtet diskuteres det hva den enkelte har gjort og skal gjøre i tillegg til utfordringer slik at alle er oppdatert om hva som foregår. I slutten av hver sprint holdes det også to møter, et sprint review møte og et sprint retrospective møte. I sprint review møtet diskuteres det hva som har blitt gjort, hva

som ikke har blitt gjort og hva som er påbegynt, i tillegg til hva dette har gjort med product backloggen. I sprint review møtet går man gjennom hvordan sprinten har gått med tanke på prosjektmedlemmene, forhold og prosesser. Det diskuteres hva som har gått feil og hva som kan gjøres for å forbedre dette i tillegg til å planlegge hvordan man skal gjøre endringene for å forbedre.

Prosjektet fortsetter fram slik som beskrevet her og det gjentas fram til man sitter igjen med et ferdig produkt som tilfredsstillende ønskene product owner la fram i starten av prosjektet.

### 1.3.2 Modifikasjoner

For at SCRUM skal være optimalt å arbeide etter i forhold til prosjektet er det gjort noen modifikasjoner. Det viktigste er å legge til en overordnet prosjektplan som er utarbeidet som et GANTT-diagram.

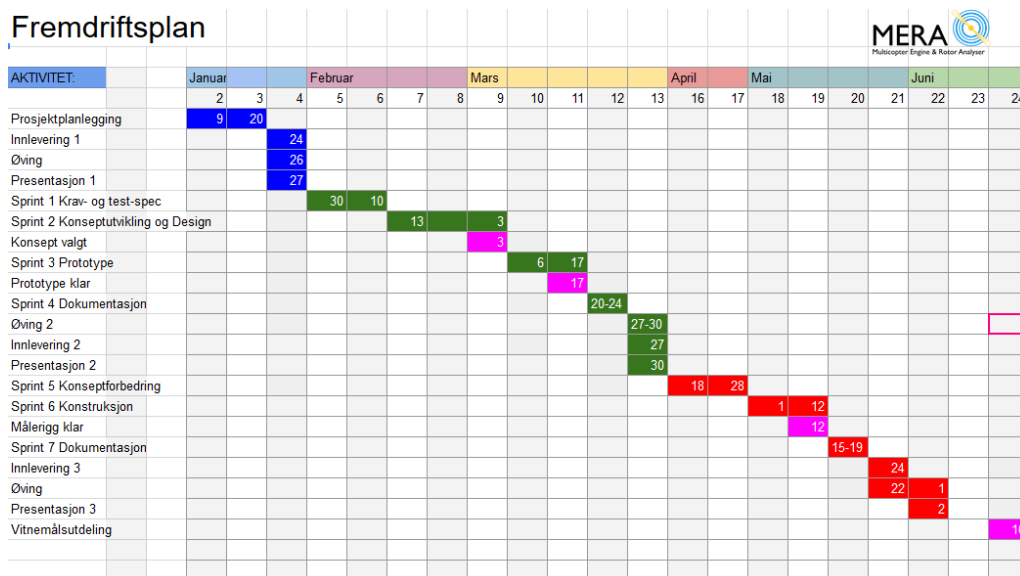
Utover dette gjelder også disse modifikasjonene:

- User stories beskriver funksjonene vi ønsker, og kravene utledes fra dette.
- Kravene blir deretter kategorisert; funksjonelle, egenskaper, restriksjoner og andre krav.
- Ut fra kravene utleder vi mindre oppgaver som er løsbare og testbare
- Disse oppgavene blir fordelt i prioritert rekkefølge i sprinter.
- Hver sprint inneholder en iterasjon av foregående sprinter samt nye oppgaver (se GANTT).
- Etter endt sprint forventer vi et "potentially shippable product". Dette kan være i form av et utvalg konsepter, et endelig konsept eller for eksempel en 3D modell.
- Sprint review og sprint retrospective holdes i ett og samme møte hvor vi inkluderer intern veileder, slik at vi samkjører disse møtene med veiledermøtene for å best kunne inkludere veileder i framgangen.

# 1.4 Organisering

## 1.4.1 GANTT

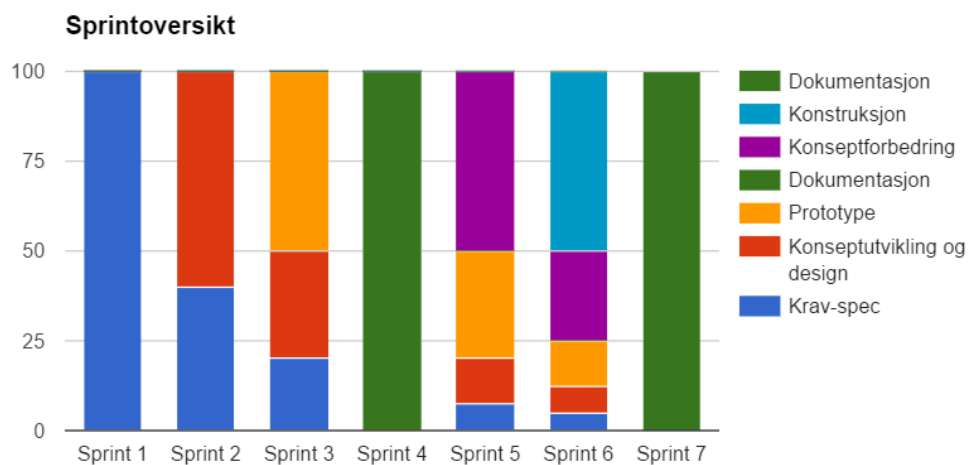
For helhetlig planlegging av prosjektet har vi utviklet et GANTT-diagram. Her er totaloversikt over når forskjellige hovedfaser av prosjektet er planlagt. Måneder og ukenummer står i toppen av diagrammet, mens aktivitetene står nummerert til venstre i diagrammet. Prosjektet gjennomføres etter modifisert SCRUM-modell og det har satt et preg på GANTT-diagrammet. Diagrammet viser en oversikt over sprintene som er planlagt og hovedoppgaven i hver sprint. Sprinter som er farget blå i fremdriftsplanen kjøres før første presentasjon, mens de grønne og røde sprintene kjøres før andre og tredje presentasjon henholdsvis. Ettersom det ligger mye fokus i dokumentasjon er det også planlagt egne dokumentasjons-sprinte. Disse vil ha en kortere varighet enn ordinære sprinte. Her vil det jobbes med å få dokumentasjonen helt oppdatert, ryddig og fullstendig. Se figur 1.1.



Figur 1.1: Gantt-diagram

## 1.4.2 Sprinter

I et eget dokument vil det bli gått nærmere i detalj over de forskjellige fokusområdene for hver enkel sprint. Her dannes det et bilde over hvordan iterasjoner er planlagt over sprintene. Så langt det er praktisk mulig vil vi dekke flest mulig aspekter av prosjektet i hver sprint. Sprintoversikten viser en trend hvor de initielle oppgavene som krav-spesifikasjon og konseptutvikling mister terreng for seinere oppgaver som typisk konstruksjon og testing.



Figur 1.2: Sprintoversikt

Alle medlemmene logger timer individuelt. Alle timer skal skrives til spesifikke oppgaver. Prosjektgruppa anvender prosjektmodellverktøyet *Jira* hvor hver oppgave får tildelt et tids-estimat før oppgaven tildeles. Dette presenterer en god oversikt over hvem som jobber med hvilken oppgave og hvor lang tid som gjenstår for en sprint. Daglige gjennomganger gir gode muligheter for å justere oppgavefordeling for å nå satte frister.

## 1.4.3 Milepæler

Milepæler er farget lilla i fremdriftsplanen, og har følgende datoer angitt:

- Konsept valgt innen 3. Mars
- Prototype klar innen 24. Mars

- Målerigg klar innen 12. Mai

#### 1.4.4 Ansvarsområder

Hvert gruppemedlem har fått utdelt egne ansvarsområder etter studieretning samt ansvarsområder som innebefatter prosessen.

- Cecilie Dokken: Kybernetikk og dokumentansvarlig
- Eivind Foss-Pedersen: Scrum-master, mekanisk og kravspesifikasjoner
- Fredrik Hansen: Mekanisk og fremdriftsplaner
- Halvard Thon: Mekanisk design og testspesifikasjoner
- Truls Øhrn: Produkt eier, mekanisk og gruppeleder





# MERA



Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## SCRUM

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Dette dokument har til hensikt å gi en oversikt over sprintene i prosjektet, deriblant innhold og mål for sprintene. Under hver sprint er timeforbruket fremstilt i tabell, disse timene er hentet fra prosjektverktøyet *JIRA*. Videre vil det bli gitt en kortfattet beskrivelse av hvordan vi brukte sprintene som verktøy i prosjektperioden.

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	08.03.17	Dokument opprettet	Cecilie Dokken
0.1	08.03.17	Introduksjon og sammendrag	Truls Øhrn
0.2	09.03.17	Dokumentert sprint oppstart og sprint 1 og 2	Eivind Foss-Pedersen
0.3	17.03.17	Dokumentert sprint 3	Truls Øhrn
0.4	22.03.17	Dokumentert sprint 3	Truls Øhrn
0.5	27.02.17	Dokumentert sprint 4	Eivind Foss-Pedersen
1.0	27.03.17	Revidert til publisering	Eivind Foss-Pedersen
1.1	10.05.17	Dokumentert sprint 5 og 6	Truls Øhrn
1.2	22.05.17	Timebruk for alle sprinter er dokumentert	Truls Øhrn og Fredrik Hansen
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Eivind Foss-Pedersen

# 2.1 Introduksjon

Som modell har vi valgt SCRUM, fordi dette framstod som en anvendelig og forståelig modell som lett kunne modifiseres. Det negative ved SCRUM for dette prosjektet er at det er en modell som hovedsaklig er laget for software-utvikling, og vi har derfor måttet gjøre visse modifikasjoner.

## 2.1.1 SCRUM

SCRUM er en agile-metode utviklet for software utvikling. Den baserer seg på at man arbeider i iterasjoner, som i SCRUM blir kalt sprinter, med en varighet på normalt 2 uker. Modellen er veldig tilpasningsdyktig som følge av planleggingsmetodene som brukes, dette tillater at endringer kan bli gjort uten at det har videre konsekvenser for planene senere i prosjektet.

I SCRUM har man tre roller, dette er product owner, scrum master og prosjektmedlem. Product owner er en person som kommer med idéene om hva produktet skal inneholde eller oppfylle. Product owner har jevnlig kontakt med eventuelle kunder og bestemmer med dette hva prosjektet skal ende med. Scrum master er gjerne prosjektlederen, og bestemmer derfor hva som skal gjøres når og hvordan dette skal gjennomføres. Han har også et overordnet ansvar for at prosjektet har framgangen det skal i tillegg til å holde møter for å styre det daglige. Prosjektmedlemmene får tildelt oppgaver de skal gjøre eller problemer de skal løse, og med dette også ansvaret for at dette gjennomføres.

Product owner lager seg en ønskeliste over funksjoner han/hun vil at produktet skal oppfylle, denne listen kalles en product backlog og er fylt av user stories i prioritert rekkefølge. En user story beskriver et av ønskene til product owneren. Denne listen bruker scrum masteren og prosjektmedlemmene når de planlegger hva de skal gjøre i en fase som heter sprint planning. Her velger de et utvalg av user stories etter prioritering som de vil implementere iløpet av den kommende sprinten.

Når sprinten er satt i gang vil oppgaver bli tildelt det enkelte prosjektmedlemmet basert på user storiene som skal implementeres. For å holde kontroll på prosjektet og sørge for at alle prosjektmedlemmene og product owneren holder scrum masteren et daglig møte som heter daily scrum. I dette møtet diskuteres det hva den enkelte har gjort og skal gjøre i tillegg til utfordringer slik at alle er oppdatert om hva som foregår. I slutten av hver sprint holdes det også to møter, et sprint review møte og et sprint retrospective møte. I sprint review møtet diskuteres det hva som har blitt gjort, hva

som ikke har blitt gjort og hva som er påbegynt, i tillegg til hva dette har gjort med product backloggen. I sprint review møtet går man gjennom hvordan sprinten har gått med tanke på prosjektmedlemmene, forhold og prosesser. Det diskuteres hva som har gått feil og hva som kan gjøres for å forbedre dette i tillegg til å planlegge hvordan man skal gjøre endringene for å forbedre.

Prosjektet fortsetter fram slik som beskrevet her og det gjentas fram til man sitter igjen med et ferdig produkt som tilfredsstillende ønskene product owner la fram i starten av prosjektet.

## 2.1.2 Modifikasjoner

For at SCRUM skal være optimalt å arbeide etter i forhold til prosjektet er det gjort noen modifikasjoner. Det viktigste er å legge til en overordnet prosjektplan som er utarbeidet som et GANTT-diagram.

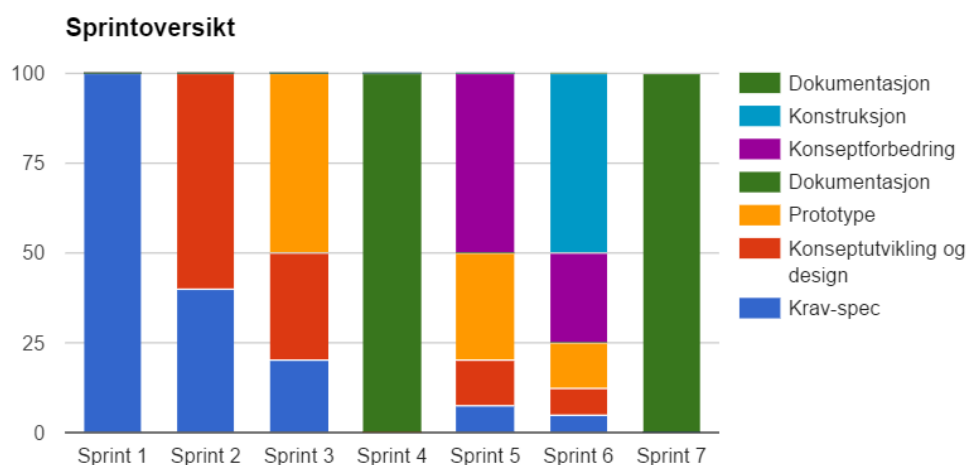
Utover dette gjelder også disse modifikasjonene:

- User stories beskriver funksjonene vi ønsker, og kravene utledes fra dette.
- Kravene blir deretter kategorisert; funksjonelle, egenskaper, restriksjoner og andre krav.
- Ut fra kravene utleder vi mindre oppgaver som er løsbare og testbare
- Disse oppgavene blir fordelt i prioritert rekkefølge i sprinter.
- Hver sprint inneholder en iterasjon av foregående sprinter samt nye oppgaver (se GANTT).
- Etter endt sprint forventer vi et "potentially shippable product". Dette kan være i form av et utvalg konsepter, et endelig konsept eller for eksempel en 3D modell.
- Sprint review og sprint retrospective holdes i ett og samme møte hvor vi inkluderer intern veileder, slik at vi samkjører disse møtene med veiledermøtene for å best kunne inkludere veileder i framgangen.

## 2.1.3 Sprintplan

Som planleggingsverktøy valgte gruppen å benytte *JIRA*, et skybasert program designet for SCRUM prosjekter. *JIRA* sørger for at prosjektgruppen har full oversikt over hvilke oppgaver som skal gjøres i den aktuelle sprinten. Programmet har

funksjonalitet som gjør det lett for hvert enkelt gruppemedlem å føre timer han/hun bruker på sine respektive oppgaver.



Figur 2.1: Sprintoversikt

Figuren over viser inndelingen av sprintene i prosjektet. Fargen og høyden på søylene indikerer hvor mye tid gruppen bruker på det aktuelle temaet. Legg merke til blå søyle, her ser vi at i sprint 2 og 3 har høyden blitt redusert. Bakgrunnen for å fortsette med forrige tema inn i neste sprint er iterasjon, vi iterer gradvis kortere lenger ut i prosjektperioden. Dette gjøres for å hele tiden iterere på tidligere arbeid og dermed sørge for at grunnlaget for løsningene vi velger er så godt som mulig.

De to grønne søylene er dokumentasjonssprintere som er lagt inn i forkant av presentasjon 2 og 3. Hensikten med dokumentasjonssprintere er å gjennomgå og eventuelt forbedre tidligere produsert dokumentasjon. En stor del av prosjektoppgaven er dokumentasjon, på bakgrunn av dette valgte vi å sette av tid øremerket til dette. Parallelt med dokumentasjonsarbeidet forbereder og øver gruppen seg på presentasjon 1, 2 og 3 i disse sprintene.

## 2.2 Sprint oppstart

Tidsrom: 08.01.17 til 01.02.17 Mål for sprinten: legge grunnlaget for et vellykket og velorganisert prosjektarbeid samt gjøre forberedelser til 1. presentasjon.

### 2.2.1 Innhold Sprint oppstart

Oppstartsfasen var egentlig ikke en sprint da vi ikke hadde valgt prosjektmodellen på dette tidspunkt. Men i dokumentasjons øyemed kaller vi det en sprint. Mange administrative avgjørelser ble tatt i denne fasen, blant annet ble ansvarsområder fordelt og det ble besluttet hvilke prosjektstyringsverktøy vi skulle bruke. Etter at det administrative var på plass fortsatte vi med krav- og testspesifikasjon, her skulle det leveres et foreløpig utkast i forbindelse med første presentasjon av prosjektet den 27. januar.

### 2.2.2 Timeforbruk Sprint oppstart

Tabell 2.1: Sprint oppstart

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Prosjektmodell	11	15,5	8,5	8,5	16	59,5
Fremdriftsplan			11,5	13	13	37,5
Maler for dokumentasjon	18	23,5	5,5	14	7,5	69,5
Kravspesifikasjon	10	22	23,5	21	17	93,5
Testspesifikasjon				10,5		10,5
Presentasjon 1	13	21	20	19	16	89
Administrative oppgaver			6		3,5	9,5
Sum timer	52	82	85	86	73	369

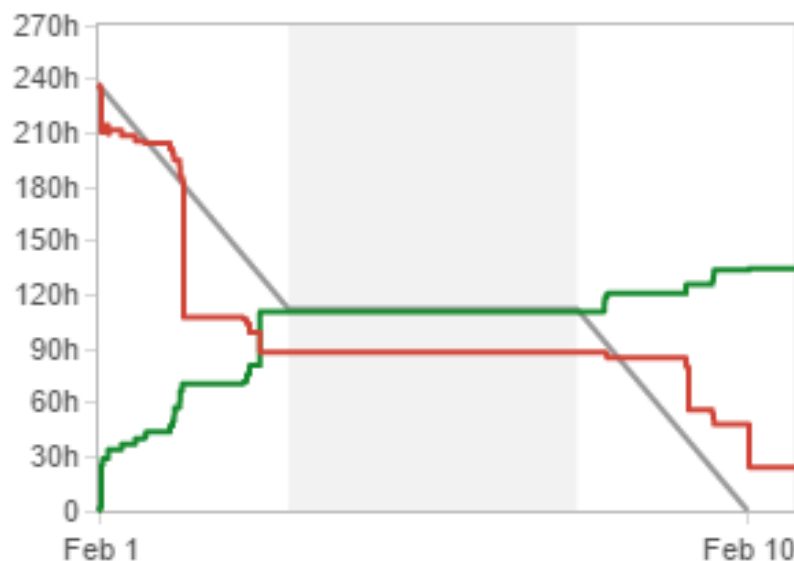
## 2.3 Sprint 1

Tidsrom: 30.01.17 til 10.02.17

Mål for sprinten: Lage en framdriftsplan i tillegg til å videreutvikle krav- og testspesifikasjon i samråd med oppdragsgiver.

### 2.3.1 Innhold Sprint 1

I sprint 1 lå hovedfokus på å få utarbeidet en god kravspesifikasjon og testspesifikasjon i samarbeid med FFI. Dette ble gjort ved å ta utgangspunkt i user stories, som SCRUM krever, og utlede krav fra disse. Her utarbeidet vi selv det vi mente ville være fornuftig for så å konferere med FFI om de var enige. Et GANTT-diagram ble brukt for å planlegge prosjektets framgang, i tillegg til en sprintoversikt (se fig. 2.1) for å vise planlagt tidsbruk i hver sprint på de gitte temaene. Mye tid ble brukt til å lære å bruke JIRA. Dette prosjektverktøyet genererer grafisk en figur som kartlegger hvor mye tid vi har brukt i forhold til gjenstående planlagt tid på oppgavene, denne kalles en *burndown chart* (se fig. 2.2).



Figur 2.2: Burndown chart sprint 1

Rød strek er antall timer gjenstående, grønn er antall timer brukt.

## 2.3.2 Timeforbruk Sprint 1

Tabell 2.2: Sprint 1

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Kravspesifikasjon	27,5	13,5	8	6	8	63
Testspesifikasjon				15		15
Sprintplanlegging	6,5	8	2,5	2,5	14	33,5
Research	3,5	2,5	3	2	2	13
Fremdriftsplan			3			3
Prosjektplan		2,5	2,5			5
Konsept		2,5	2,5	5	1	11
Administrative oppgaver	3	7	15,5	2,5	7,5	35,5
Sum timer	40,5	36	37	33	32,5	179

## 2.3.3 Konklusjon Sprint 1

Gjennom å tolke burndown chart kan vi trekke den konklusjonen at vi har grovt overestimert tiden det kreves for å fullføre oppgavene, dette kan ses ved at den røde streken har veldig lange helt loddrette fall. Dette signaliserer at vi har stått igjen med veldig mange timer til disposisjon selv om oppgaven regnes som ferdig.

Vi lærte i tillegg at det er lite produktivt å lage krav og tester uten å konsultere med oppdragsgiver helt fra starten av.



## 2.4 Sprint 2

Tidsrom: 13.02.17 til 03.03.17

Mål for sprinten: Bestemme konsept og lage et preliminært design ved hjelp av DAK verktøy.

### 2.4.1 Innhold i Sprint 2

Research, brainstorming og konseptutvikling er nøkkelord i sprint 2. Sprinten startet med research og informasjonsinnhenting, ut fra resultatene ble det produsert tekniske dokumenter. Deretter startet gruppen med idemyldring og brainstorming. Whiteboard tavlen ble flittig brukt til skissering av konsepter og tekniske løsninger. Gruppen jobbet seg frem til 3 konsepter vi mente ville oppfylle kravene fastsatt i forrige sprint. Pugh matriser er et verktøy mye brukt i tekniske prosjekter der man har flere design eller konsepter å velge mellom. Ved å liste opp kriterier og vekting vil man kunne sammenligne konseptene opp mot hverandre. Tabellen under viser en slik matrise.

Tabell 2.3: Pugh-matrise kvantifisert

Konsept → Kriterie ↓	Vekting	Bordmontert	Frittstående
Brukervennlighet	4	S	S
Robusthet	4	4	6
Støtter liten/stor propell	5	S	S
Kompleksitet/ kontruksjon	4	6	5
Kostnad	2	5	7
Videreutvikling	3	S	S
Transporterbar	2	7	6
Estetikk	1	7	8
Sikkerhet	3	3	5
Montering	1	6	4
$\Sigma$		78	85

Konseptet vi valgte å kalle *Frittstående* fikk høyest poengsum og ble dermed vår endelige løsning.

## 2.4.2 Timeforbruk Sprint 2

Tabell 2.4: Sprint 2

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Konsepter	4	18	20	24,5	11	77,5
Webside	7					7
Dokumentasjon	8	13	11,5	3	6	41,5
Administrative oppgaver	2	2,5	4	7	3,5	19
Research	21	16,5	10	11	20	78,5
Sprint planlegging		3	1	2,5	8	14,5
Iterasjon		2,5	1	4,5	3	11
Sum sprint	42	55,5	47,5	52,5	51,5	249

## 2.4.3 Iterasjon Sprint 2

I henhold til prosjektmodell skal gruppen gjennomføre en iterasjon på forrige sprint i inneværende sprint. I sprint 2 var dette første gang gruppen gjennomførte dette. En iterasjon sørger for at gruppen kvalitetssikrer arbeidet gjort i forrige sprint og sørger for at prosjektet beveger seg i riktig retning. Vi løste dette ved å gjennomgå krav- og testspesifikasjon i plenum og diskutere hvert enkelt krav og hver test. Resultatet ble små endringer som omformuleringer.

## 2.4.4 Konklusjon Sprint 2

Som i sprint 1 har gruppen et forbedringspotensiale når det gjelder timeestimering og logging av arbeid på JIRA. Dette ser vi tydelig ved å studere burndown charten for sprinten (se fig. 2.3).



Figur 2.3: Burndown chart sprint 2

## 2.5 Sprint 3

Tidsrom: 08.03.17 til 17.03.17

Mål for sprinten: Lage en fungerende prototype som oppfyller følgende krav:

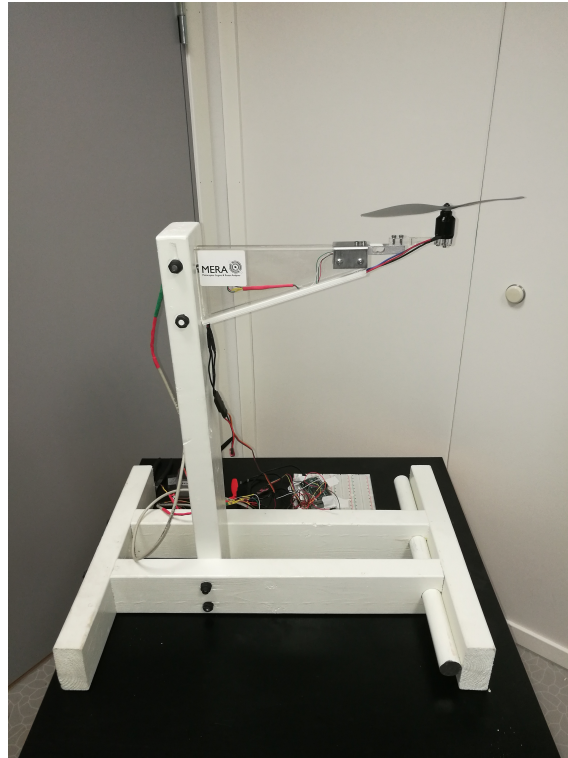
- K1.1: Måleriggen skal måle virkningsgraden til utvalgte ESC, motor og rotor konfigurasjoner (g/W).
- K3.1: Måleriggen skal kunne måle maks løftkraft.

### 2.5.1 Innhold i sprint 3

Etter sprint 2 var et konsept for måleriggen utarbeidet, det var dermed tid for å bygge en prototype basert på dette konseptet. Denne prototypen er en forenklet versjon av det ferdige produktet vi ser for oss å kunne presentere i slutten av prosjektperioden. Fra kravspesifikasjon valgte vi to svært sentrale krav, K1.1 og K3.1 som representerer hovedfunksjonen til måleriggen. Disse to kravene utgjør minstekravet til funksjonene en slik målerigg bør ha og det er derfor det naturlige sted å begynne. Så med målsetningen for sprinten kartlagt, bestilte vi nødvendig hardware som *Arduino Due*, materialer og festemidler.

Tilvirkning av deler og montering ble gjennomført på skolens prototype verksted hvor vi har nødvendig verktøy og maskiner tilgjengelig. I tillegg ble skolens nye laserkutter benyttet til fremstilling av deler til sensormodulen og motorfester. Prototypen ble mekanisk sett ferdig på rimelig kort tid, deretter ble sensorer og kabler montert. Koding og programmering av Arduino og sensorer var neste steg i prosessen. Prosjektgruppen møtte på relativt små problemer og kunne den 15. mars gjennomføre en vellykket testmåling på en motor av typen *3DR 2836 880kv* med en 11" propell (se fig. 2.4).

Parallelt med koding og programmering gjennomførte vi FEM-analyse (*Finite Element Method* analyse) og destruktiv testing på motorfestene. Bakgrunn for disse analysene var at vi manglet kjennskap til hvordan motorfestene i akryl ville oppføre seg under last. Det viste seg at avgjørelsen om å bruke akryl til motorfester var forsvarlig, grunnlaget for dette er beskrevet i teknisk dokument *Destructive testing*.



Figur 2.4: Endelig prototype

## 2.5.2 Timeforbruk Sprint 3

Tabell 2.5: Sprint 3

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Webside	12					12
Dokumentasjon	3	12,5	5	25	14	59,5
Iterasjon	1	1,5	1	1,5	2	7
Oppkobling	1,5	4,5	5,5		5	16,5
Programmering	13,5	5				18,5
Sprintplanlegging		1			3	4
Administrative oppgaver	1,5	2,5	4	3,5	5	16,5
DAK		8,5	4,5	9,5	2	24,5
Destruktiv testing			5,5	5,5		11
Konstruksjon		3,5	25	13	15	56,5
Sum timer	32,5	39	50,5	58	46	226

## 2.5.3 Iterasjon sprint 3

Som i sprint 2 skal vi gjennomføre iterasjon av forrige sprint i inneværende sprint. Vi startet med iterasjon av konsept utviklingen ved å gjennomgå pugh matrisen på nytt. Forskjellen fra første gang og denne gang var at vi nå vektet og rangerte konseptene individuelt. Resultatet av iterasjonen ble det samme som første gang, nemlig at konseptet ved navn *Frittstående* fikk høyest poengsum. Snittet av de individuelle poengsummene utgjorde 150,2 poeng mot de opprinnelige 85 poeng for frittstående og 137,2 poeng mot de opprinnelig 78 poeng for bordmontert. Høyere poengsummer skyldes forskjeller i individuell vektning og tildeling av poeng.

I tillegg ble det gjennomført en iterasjon på test og krav spesifikasjon. Dette ble gjort i plenum ved å gjennomgå hvert enkelt krav og test. Det ble ikke gjort endringer på krav og test spesifikasjon etter denne iterasjonen.

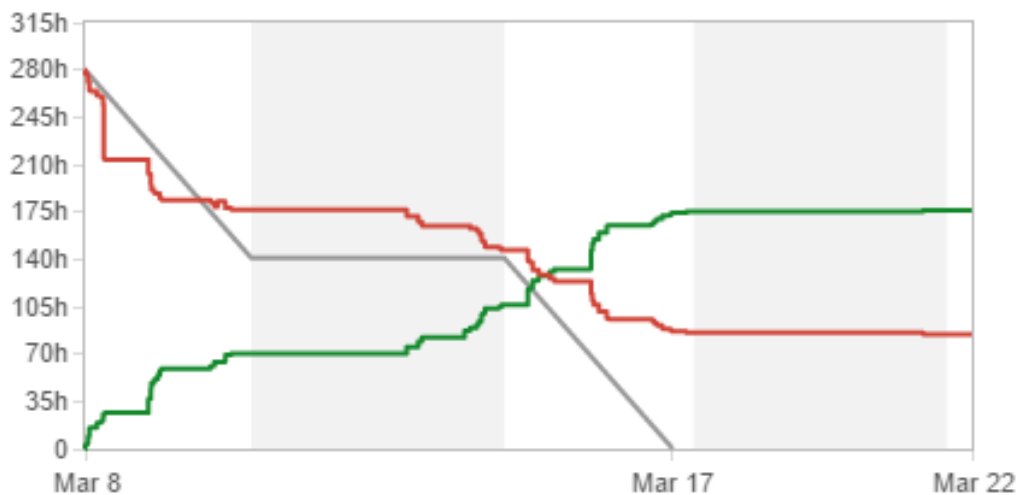
## 2.5.4 Konklusjon Sprint 3

Ifølge prosjektets fremdriftsplan skulle prototypen ferdigstilles innen 17. mars. Dette ble delvis oppnådd, mål for sprinten var at krav K1.1 og K3.1 skulle oppfylles

av prototypen. Krav K1.1 ble innfridd mens krav K3.1 vil etter planen innfris etter ytterligere programmering.

Etter at første måling ble gjennomført på prototypen steg forventningene til hva vi kan få til betraktelig. Etter passering av denne milepælen mente gruppen at vi med riktig fokus fremover ville kunne levere et produkt som innfris mange av kravene fra oppdragsgiver. Når det gjelder prosjektets fremgang og hvor langt vi kan komme i utviklingen av måleriggen, var det å få en fungerende prototype på plass så fort som vi gjorde kritisk. Dette var takket være godt samarbeid i gruppen og faglig dyktige studenter.

Ved å studere burndown chart for sprint 3 (se fig. 2.5) ser vi at timeestimeringen på JIRA stemte ganske bra med hvordan det faktisk ble. Timeestimering er alltid en utfordring i slike prosjekter, spesielt uten nevneverdig erfaring på området.



Figur 2.5: Burndown chart sprint 3

## 2.6 Sprint 4

Tidsrom: 22.03.17 til 24.03.17

Mål for sprinten: All dokumentasjon er 100% til 2.presentasjon. Gammel dokumentasjon skal revideres, og første utkast av presentasjon 2 skal lages.

### 2.6.1 Innhold i sprint 4

Sprinten har bestått i å gjennomgå all dokumentasjon produsert hittil i den hensikt gjøre den så feilfri, korrekt og klar til innlevering til sensorer. Dokumenter ble gjennomlest og om nødvendig revidert. I forbindelse med innlevering opprettet gruppen et hoveddokument, som samler alle underdokumenter for en oversiktlig og lesbar sluttrapport. Presentasjon 2 ble planlagt og vi startet arbeidet med forberedelser. Dette arbeidet innebar øving på presentasjon samt programmering av målerigg til demonstrasjon.

### 2.6.2 Timeforbruk Sprint 4

Tabell 2.6: Sprint 4

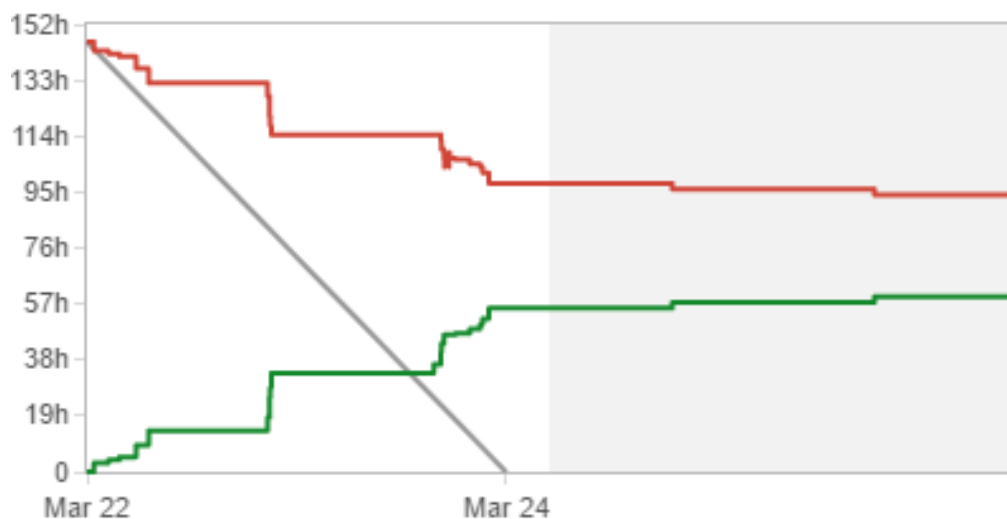
Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Hoveddokument	14	15	12,5	11,5	8	61
Teknisk dokumentasjon	12,5	6	4	23	7	52,5
Presentasjon 2	19	22	20,5	19,5	21	102
Sprintdokument		0,5			3	3,5
Regnskap			3			3
Fremdriftsplan			6			6
Non-destructive testing			1			1
Sum timer	45,5	43,5	47	54	39	229



### 2.6.3 Konklusjon sprint 4

Ifølge fremdriftsplanen skulle dokumentasjonssprinten vare 1 uke, hvor vi skulle ferdigstille dokumentasjonen så denne kunne leveres. Dette målet nådde vi ikke, så de oppgavene som gjenstod ble forskjøvet ut i neste uke.

Forventningene til prosjektets fullføring har endret seg noe, vi forventet på dette tidspunkt at måleriggen skal få en løsning for å måle motor og rotorkonfigurasjoner med variabel pitch, men at vi ikke rekker å finne en god løsning på å måle torsjonskraft som skapes av motoren.



Figur 2.6: Burndown chart sprint 4

Som man kan se på burndown chart fra sprint 4 sliter vi fortsatt med å forutse oppgaver og legge de inn i verktøyet JIRA. Derfor blir antall timer arbeidet lavere enn de egentlig er (se fig. 2.6).

## 2.7 Sprint 5

Tidsrom: 18.04.17 til 27.04.1

Mål for sprinten: Videreutvikle målerigg iht. kravspesifikasjon.

### 2.7.1 Innhold i sprint 5

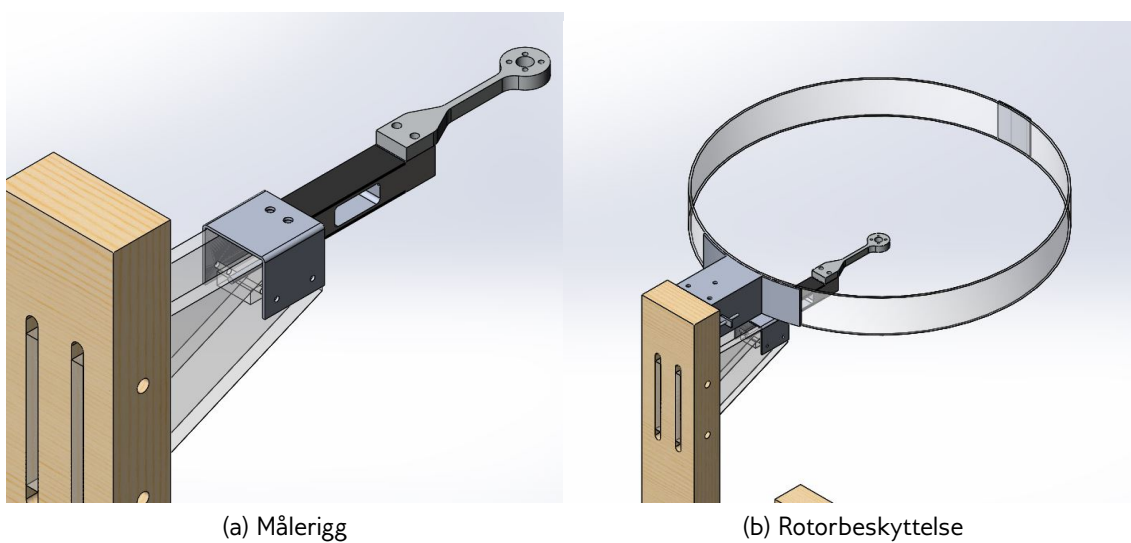
I sprint 5 var hovedfokus å videreutvikle prototypen med kravspesifikasjonen som utgangspunkt. Gruppen startet blant annet med research på mulige løsninger for måling av momentet som motoren utøver på motorfestet når propellen roterer. Etter beregninger og research ble det besluttet at pålimte strekkklapper ville kunne fungere. Momentet som motoren utøver på motorfestet er relativt lite, av den grunn måtte vi ha benyttet strekkklapper med svært høy *G-faktor (følsomhet)*, noe som viste seg å være svært kostbart. På bakgrunn av dette kombinert med prioriteringen av kravet i kravspesifikasjonen ble gruppen enige i samråd med intern veileder om at løsningen ikke implementeres men dokumenteres. Videre ble det designet kretskort for mikrokontrolleren. Dette ble gjort for i større grad å kunne skreddersy og forenkle elektronikken til vårt formål. Kretsdesignet ble ferdigstilt men grunnet prosjektets tidsplan ble bestillingen ikke sendt til produsent.

Det ble etter 2. presentasjon besluttet å beholde rammeverket (den nedre delen av måleriggen) fra prototypen og fokusere på redesign av sensormodulen. Vi redesignet motorfestet og akrylarmene som forbinder lastcellen til den vertikale søylen, for å akkommodere for den nye lastcellen (se fig. 2.7a). For måling av løftkraft på prototypen benyttet vi en forholdsvis enkel lastcelle uten datablad for å verifisere konseptet, men for nøyaktige måleresultater så vi oss nødt til å oppgradere denne. Detaljene rundt den nye lastcellen blir beskrevet i kapittel om sensorteknologi.

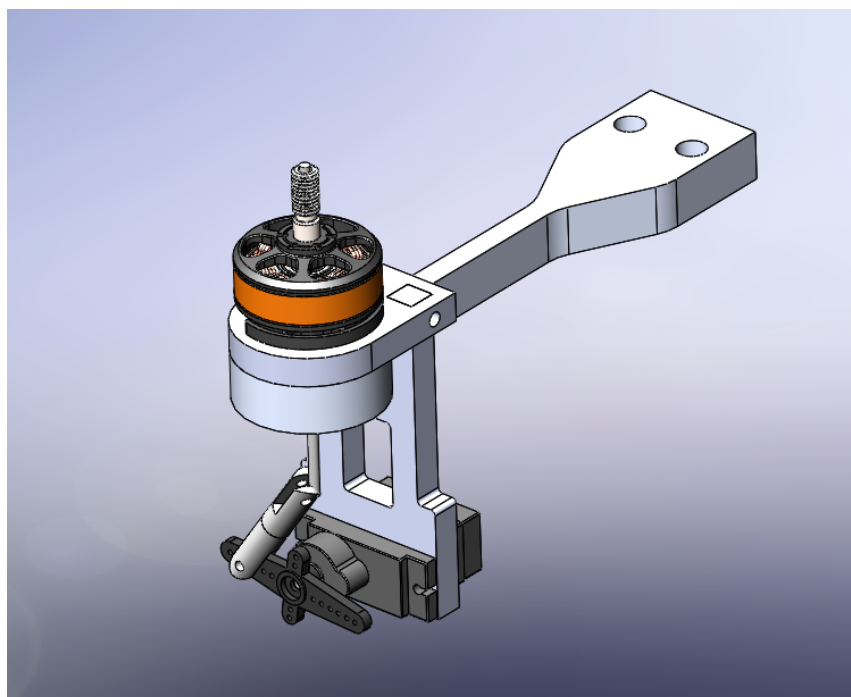
Under destruktiv testing av akryl motorfestene i sprint 3 oppdaget gruppen at akryl ikke var det optimale materiale for disse festene. Aluminium ble foreslått og vedtatt brukt som materiale til motorfestene på grunn av dets gode fresbarhet, tilstrekkelige styrke og stivhet. Et nytt design ble utformet og CNC-koden ble skrevet.

Ytterligere funksjonalitet som støtte for variabel pitch motorer ble designet og modellert i *Solidworks* (se fig. 2.8). Sikkerheten må også ivaretas ved bruk av

måleriggen, det ble derfor designet en rotorbeskyttelse (se fig. 2.7b) samt en nødstop enhet.



Figur 2.7: Konseptforbedringer



Figur 2.8: Variabel pitch mekanisme

## 2.7.2 Timeforbruk Sprint 5

Tabell 2.7: Sprint 5

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Virkningsgrad	38				9	47
Kretskort design	20,5					20,5
Sensorer	6		4			10
Ledningsnett	2		5,5		2	9,5
GUI		53,5				53,5
Sprintplanlegging			2,5	4,5	3	10
Dokumentasjon			9	23		32
DAK			2,5	24,5		27
Design			12	12,5	8	32,5
Konstruksjon			14	9	24,5	47,5
Regnskap			5			5
Research				3,5	5	8,5
Administrative oppgaver			0,5		3	3,5
Sum timer	66,5	53,5	55	77	54,5	306,5

## 2.7.3 Iterasjon sprint 5

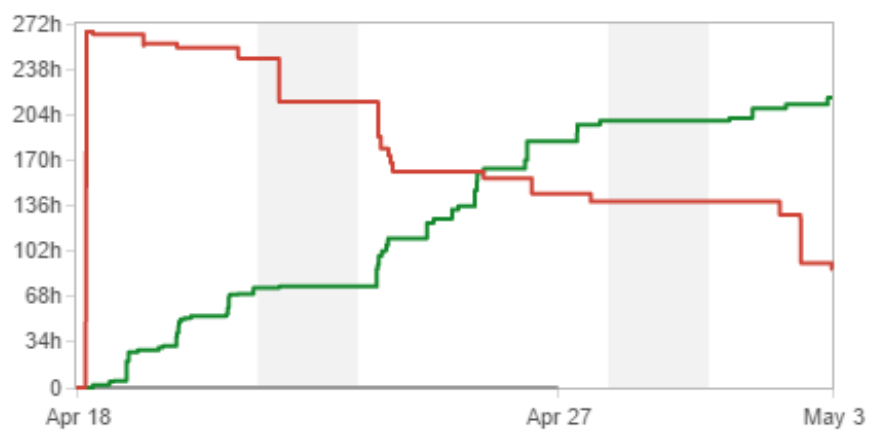
Til forskjell fra sprint 3 hvor vi produserte nye pugh matriser til de forskjellige konseptene, itererte vi på en annen måte denne gang. Etter 2. presentasjon valgte vi som nevnt tidligere å beholde deler av rammeverket mens resten redesignet vi. De løsningene som fungerte tilfredstillende tok vi med oss videre i prosjektet.

## 2.7.4 Konklusjon sprint 5

Sprint 5 bar preg av problemløsning, nytenkning og kreativitet. Målsetningen for sprinten var videreutvikling i henhold til kravspesifikasjon, grunnet tidspress ble et par av kravene og funksjonene besluttet ikke videreført i prosjektet.

Når det kommer til estimering av timer har vi i denne sprinten estimert ganske bra i forhold til tidligere sprinter. Ved å studere figur 2.9 ser man at planlagt

tid og forbrukt tid stemmer ganske bra. Når det er sagt ser man at flere av de planlagte oppgavene ble overført til neste sprint (høyre del av figur).



Figur 2.9: Burndown chart sprint 5

## 2.8 Sprint 6

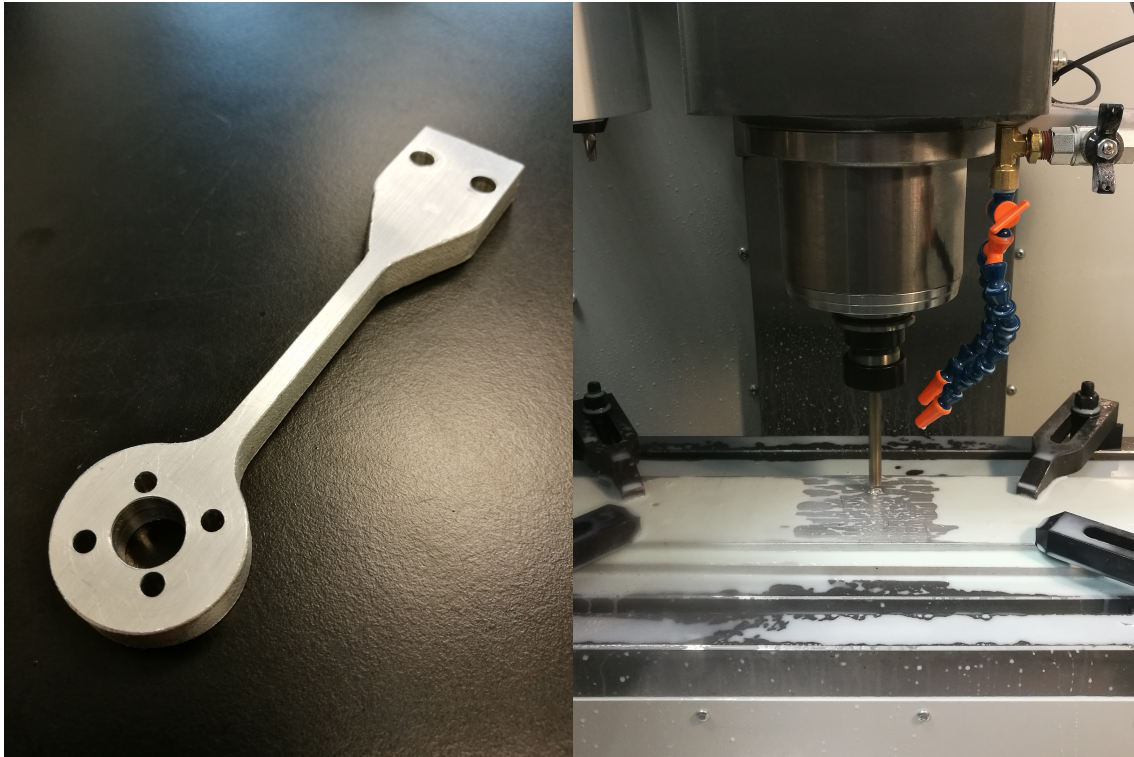
Tidsrom: 01.05.17 til 09.05.17

Mål for sprinten: implementering av funksjonalitet designet i sprint 5.

### 2.8.1 Innhold sprint 6

Sprint 6 var nært forbundet med foregående sprint. Vi skulle nå implementere løsninger og funksjonalitet designet ukene før. Alt arbeid ble gjennomført i skolens prototypeverksted og måleteknisk laboratorium. Vi benyttet skolens maskinpark som inneholder blant annet laserkutter, CNC-fresemaskin, søylebormaskin, platesaks og plateknekker til tilvirkning av deler som ikke var hyllevare.

De nye motorfestene ble frest ut med 2.5 akset fresemaskin (se fig. 2.10b). Koden for programmet ble skrevet av studentene mens selve fresingen ble utført sammen med faglærer fra høgskolen. Detaljene rundt tilvirkningen blir beskrevet i eget kapittel. Videre benyttet vi skolens 3D printer til å fremstille en mellomleggsplate som skal monteres på motorfestet. Denne platen er kun nødvendig å montere når brukeren skal måle motorer av typen *DJI E1200* eller *Tiger MN3508*.



(a) Motorfeste

(b) CNC fresing

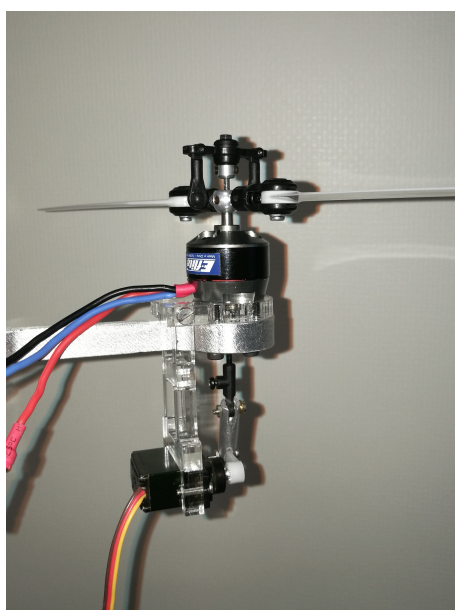
Figur 2.10: Tilvirking motorfester

Parallellt med det maskintekniske arbeidet ble det lagt ned mye tid i software og programmering av *Arduino*. Når det gjelder software hadde vi behov for et program som lar brukeren styre måleriggen samtidig som den avgir nødvendig måledata. Samspillet mellom software og mikrokontrolleren er avgjørende for at måleriggen skal fungere slik vi ønsker.

For å skjule og organisere det elektriske anlegget til måleriggen monterte vi en ledningskanal på baksiden av den vertikale søylen. Hensikten var å skjule og organisere alt av ledninger, kretskort, batterier og ESC i ledningskanalen.



Figur 2.11: Kabelkanal med lokk



Figur 2.12: Variabel pitch mekanisme og motor



Måleriggen skal ifølge kravspesifikasjonen støtte måling av motor og rotorkonfigurasjoner med variabel pitch propell. Løsningen vår ble å benytte samme motorfeste som for vanlige motorer men vi implementerer et ekstra feste til servoen som driver pitch mekanismen (se fig. 2.11). Servofestet er laget i akryl ved hjelp av skolens laserkutter.

## 2.8.2 Timeforbruk Sprint 6

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Programmering	10	35			7	52
Virkningsgrad	21					21
Webområde	0,5					0,5
Regnskap			2			2
Ledningsnett			6,5		2	8,5
Konstruksjon			13,5	24	9,5	47
Sensorer			1,5			1,5
Design				4		4
DAK					4	4
Sprintplanlegging					2	2
Administrative oppgaver					4	4
Dokumentasjon					4	4
Sum sprint	31,5	35	23,5	28	32,5	150,5

## 2.8.3 Konklusjon sprint 6

Målet for sprinten var å implementere funksjonalitet designet i forrige sprint. I klartekst betød dette å innfri så mange krav som mulig. Teknisk sett ble måleriggen ferdig konstruert innen sprinten var over. Programmering og skriving av kode ble ikke fullført, vi så oss derfor nødt til å fortsette dette arbeidet parallelt med dokumentasjonsarbeidet for å rekke å bli ferdig selvom dette ikke er i henhold til vår prosjektmodell. Årsaken til dette kan være at vi feilestimerte tidsbruken eller at ambisjonsnivået var for høyt.

## 2.9 Sprint 7

Tidsrom: 09.05.17 til 23.05.17 Mål for sprinten: all dokumentasjon er 100% til innlevering.

### 2.9.1 Innhold sprint 7

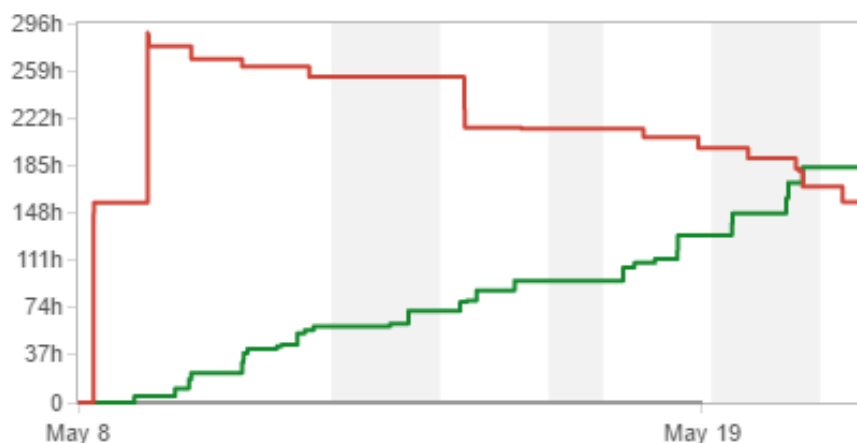
Revisjon og produksjon av ny dokumentasjon er fokusområdene denne sprinten, arbeidet med 3. presentasjon skal også påbegynnes i denne perioden. I tillegg til dette ble flere av oppgavene påbegynt i sprint 6 overført til sprint 7. Dette innebar programmering av mikrokontroller og arbeidet med måleriggens software. Som nevnt i konklusjonen i sprint 6 måtte dette arbeidet videreføres for å innfri flere krav samt gjennomføre så mange tester som mulig. Dessverre støtte prosjektgruppen på motgang i denne sprinten i form av overbelastning av mikrokontrolleren. Dette skyldes feil på en innkjøpt komponent som skulle måle strøm og spenning. Ifølge databladet skulle komponenten levere en utgangsspenning på 3.3 volt. Ved simulering av kretsen i ettertid visste det seg at denne ledet en spenning på over 10 volt videre til mikrokontrolleren. Dette resulterte i en defekt Arduino mikrokontroller og en defekt ESC. Ringvirkningene av dette var bestilling av ny mikrokontroller påfølgende dag og bestilling av egen designet kretskort for måling av strøm og spenning.

## 2.9.2 Timeforbruk Sprint 7

Oppgave	Cecilie	Eivind	Fredrik	Halvard	Truls	Total
Programmering	55,5	99,5				154
Virkningsgrad	10					10
Kretskort	7					7
Dokumentasjon	62	20,5	68	97	86	333,5
Administrative oppgaver	2		13,5	5,5	5	26
Sprintplanlegging			1	2,5	3	6,5
Konstruksjon			5,5		5	10,5
Regnskap			0,5			0,5
Ledningsnett			7		2	9
Research				6,5		6,5
Sum sprint	135,5	120	95,5	111,5	101	563,5

## 2.9.3 Konklusjon sprint 7

Mål for sprint 7 var å produsere og revidere dokumentasjon. Dette ble hovedaktiviteten for store deler av gruppen, men to av gruppemedlemmene hadde fokus på programmering og software. Hendelsen som endte med defekt mikrokontroller blant annet, førte til denne forskyvingen av oppgaver relatert til programmering av målerigg og kravoppfyllelse.



Figur 2.13: Burndown chart sprint 7



**MERA**   
Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Kravspesifikasjon

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Kravspesifikasjonen omfatter beskrivelser av funksjoner som kunde forventer ved prosjektets utgang.

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	18.01.17	Dokument opprettet	Cecilie Dokken
0.1	19.01.17	Krav og user stories lagt til	Eivind Foss-Pedersen
0.2	01.02.17	Krav redigert	Stein Haga
1.0	02.02.17	Revidert	Cecilie Dokken
1.1	09.02.17	Krav redigert	Truls Øhrn
1.2	10.02.17	Krav prioritert. User story US7.0 og krav K7.1 lagt til.	Cecilie Dokken
1.3	02.03.17	K7.1 omformulert og K7.2 lagt til etter iterasjon og veiledermøter i sprint 2.	Truls Øhrn
2.0	27.03.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen
2.1	28.04.17	US8.0, US9.0, K8.1 og K9.1 lagt til	Eivind Foss-Pedersen
3.0	23.05.17	Revidert for publisering	Eivind Foss-Pedersen

## Innholdsfortegnelse

3.1	Introduksjon . . . . .	55
3.2	Oppsett . . . . .	56
3.2.1	Prioritering . . . . .	57
3.3	User stories . . . . .	58
3.4	Funksjonelle krav . . . . .	60
3.5	Egenskapskrav . . . . .	63
3.6	Restriksjoner . . . . .	64
3.7	Grensesnitt . . . . .	64

## 3.1 Introduksjon

For at prosjektet skal gå i den retning kunden ønsker og for å unngå avsporing er det satt opp en kravspesifikasjon. Denne kravspesifikasjonen er satt opp i henhold til prosjektets arbeidsmodell, som er SCRUM. I SCRUM settes det opp user stories. Det kan beskrives som et tenkt scenario for bruk av produktet. Ut ifra disse utledes krav. Disse kravene formuleres etter ønske fra FFI. Alle kravene er systematisert og kan spores tilbake til den respektive user story og funksjonen oppdragsgiver ønsker.

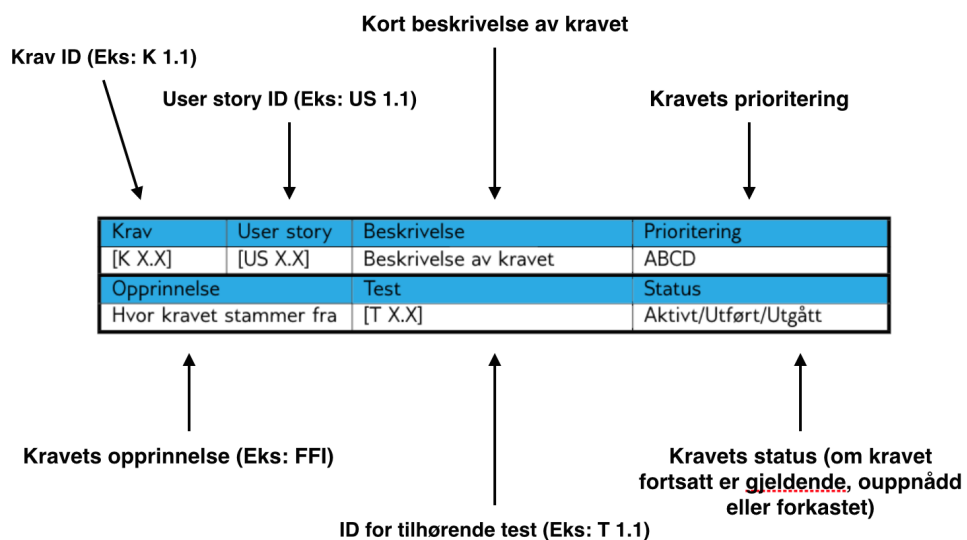


## 3.2 Oppsett

Alle user stories og krav er satt opp i hvert sitt diagram. Både user stories og krav merkes med ID for å sikre sporbarhet.



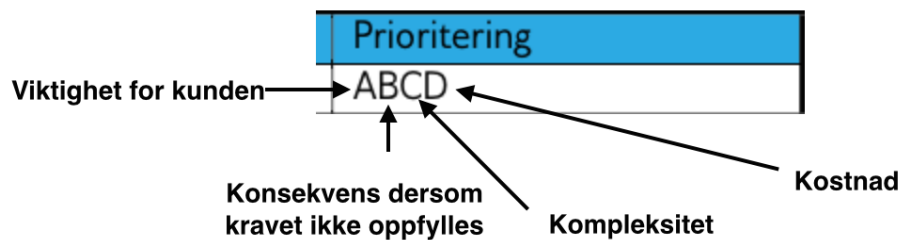
Figur 3.1: User story diagram



Figur 3.2: Diagram for krav

### 3.2.1 Prioritering

Alle kravene er merket med en prioritering.



Figur 3.3: Prioritering av krav

De klassifiseres fra A til C og fungerer slik:

- Viktighet for kunden:
  - \* A: Dette er noe kunden mener MÅ være med i produktet.
  - \* B: Kunden mener dette burde være med i produktet.
  - \* C: Kunden vil gjerne ha det med i produktet, men det er ikke av stor betydning.
- Konsekvens for systemet om kravet ikke oppfylles:
  - \* A: Om kravet ikke oppfylles virker ikke systemet.
  - \* B: Om kravet ikke oppfylles virker systemet, men ikke så godt som kunden vil.
  - \* C: Om kravet ikke oppfylles har det ikke noe å si for funksjonaliteten til systemet.
- Kompleksitet - hvor vanskelig er det å implementere:
  - \* A: Avansert
  - \* B: Mindre avansert
  - \* C: Lite avansert
- Kostnad:
  - \* A: Høy
  - \* B: Moderat
  - \* C: Lav

## 3.3 User stories

User story	Beskrivelse
[US 1.0]	Som kunde ønsker jeg å måle motorens virkningsgrad.

User story	Beskrivelse
[US 2.0]	Som FFI-ingeniør ønsker jeg å måle Loop 800 for finne motor og rotor kombinasjonen som gir lavest responstid.

User story	Beskrivelse
[US 3.0]	Som kunde ønsker jeg å måle om motor og propell kombinasjonen (DJI 1760 Carbon Fiber)(DJI E1200, 4216 CCW/CW) kan løfte 3900 gram, slik som produsenten påstår.

User story	Beskrivelse
[US 4.0]	Som bruker ønsker jeg å måle et utvalg av motorer og propeller uten å måtte bytte innfesting.

User story	Beskrivelse
[US 5.0]	Som bruker ønsker jeg at måling foregår slik at det ikke er fare for materiell- eller personskaade.

User story	Beskrivelse
[US 6.0]	Som bruker ønsker jeg at måleresultatene skal bli presentert i tabellform slik at det kan plottes på PC.

User story	Beskrivelse
[US 7.0]	Som bruker ønsker jeg å måle moment i motorfestet for å kunne kompensere for eventuell yaw.

User story	Beskrivelse
[US 8.0]	Som bruker ønsker jeg å måle motorens rpm under testing.

User story	Beskrivelse
[US 9.0]	Som bruker ønsker jeg å måle motorens temperatur under testing for å unngå materielle skader.

## 3.4 Funksjonelle krav

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 1.1]	[US 1.0]	Måleriggen skal måle virkningsgraden til utvalgte ESC, motor og rotor konfigurasjoner (g/w).	AAAB
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 1.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 2.1]	[US 2.0]	Måleriggen skal utføre Loop 800 på utvalgte ESC, motor og rotorkonfigurasjoner.	AAAA
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 2.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 2.2]	[US 2.0]	Måleriggen skal oppgi lufttrykk under testing.	ACCC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 2.2]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 2.3]	[US 2.0]	Det skal være mulig å fastslå måleusikkerheten til måleriggen.	ABCB
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 2.3]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 2.4]	[US 2.0]	Riggen skal måle utvalgte ESC, motor og rotor konfigurasjoner med variabel pitch.	AABB
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 2.4]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 3.1]	[US 3.0]	Måleriggen skal kunne måle maks skyvekraft	AABC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 3.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 6.1]	[US 6.0]	Måleriggen skal gi resultater i metriske enheter.	ACCC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 6.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 6.2]	[US 6.0]	Måleresultatene skal kunne lagres som CSV-fil.	AACC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 6.2]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 6.3]	[US 6.0]	CSV-filen skal inneholde måleverdien tid.	AACC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 6.3]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 7.1]	[US 7.0]	Måleriggen skal måle kraftmoment i motorfestet ved oppstart fra 0 til 100 % motoreffekt.	CCAC
Opprinnelse		Test	Status
Jan Dyre Bjerknes		[T 7.1]	Inaktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 7.2]	[US 7.0]	Måleriggen skal måle <i>steady state</i> moment i motorfestet.	CCAC
Opprinnelse		Test	Status
Jan Dyre Bjerknes		[T 7.2]	Inaktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 8.1]	[US 8.0]	Måleriggen skal oppgi motorens rpm under testing.	BCCC
Opprinnelse		Test	Status
Jan Dyre Bjerknes		[T 8.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 9.1]	[US 9.0]	Måleriggen skal lese av motortemperaturen ved testing.	CCBC
Opprinnelse		Test	Status
Jan Dyre Bjerknes		[T 9.1]	Aktiv

## 3.5 Egenskapskrav

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 4.1]	[US 4.0]	Måleriggen skal ha en innfesting som støtter utvalgte motorer. Se vedlegg "Utvalg motorer til måling".	BABB
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 4.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 5.1]	[US 5.0]	Rotor skal være beskyttet når det foregår måling.	BCBC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 5.1]	Aktiv

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 5.2]	[US 5.0]	Måleriggen skal ha et nødstoppsystem.	BBCB
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 5.2]	Aktiv



## 3.6 Restriksjoner

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 4.2]	[US 4.0]	Bytte av motorer skal kunne gjøres på under 5 minutter.	CCBC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 4.2]	Aktiv

## 3.7 Grensesnitt

Krav	User story	Beskrivelse	Prioritering
[K 6.3]	[US 6.0]	Måling skal styres fra en datamaskin.	BAAC
Opprinnelse		Test	Status
FFI		[T 6.3]	Aktiv



**MERA**   
Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Testspesifikasjon

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Denne testspesifikasjonen gir beskrivelse av testplanen for prosjektet MERA. Dokumentet forteller prosjektets validering/verifiserings-strategi, samt en oversikt og beskrivels av tester som planlegges for å bekrefte at krav er infridd.

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	18.01.17	Dokument opprettet.	Cecilie Dokken
1.0	3.02.17.	Tester lagt til, ført i tabeller, tildelt koder, strategi formulert.	Halvard Thon
2.0	27.03.17	Revidert for publisering	Fredrik Halvard
2.1	08.05.17	Test T7.1 og T7.2 forkastet	Halvard Thon
2.2	08.05.17	Test T8.1 og T9.1 formulert og lagt til (RPM og Temperatur)	Halvard Thon
2.3	19.05.17	Testtabell T5.1, T5.2, T4.2 og T4.1 fylt ut.	Halvard Thon
2.4	19.05.17	Testrapport for T4.1, T4.2, T5.1 og T5.2 skrevet.	Halvard Thon
2.5	21.05.17	Testrapport for T2.2, T2.4, T3.1, T6.1, T6.2 og T6.3 skrevet	Halvard Thon
2.6	22.05.17	Testrapport for T8.1 skrevet	Halvard Thon

## Innholdsfortegnelse

<b>4.1</b>	<b>Introduksjon</b>	69
<b>4.2</b>	<b>Strategi</b>	70
<b>4.3</b>	<b>Oppsett</b>	71
<b>4.4</b>	<b>Testspesifikasjoner</b>	73
4.4.1	Funksjonelle krav	73
4.4.2	Egenskapskrav	80
4.4.3	Restriksjonskrav	81
4.4.4	Grensesnittskrav	82
<b>4.5</b>	<b>Testrapporter</b>	83
4.5.1	Testrapport for T5.1	83
4.5.2	Testrapport for T5.2	83
4.5.3	Testrapport for T4.2	84
4.5.4	Testrapport for T4.1	85
4.5.5	Testrapport for T2.2	85
4.5.6	Testrapport for T2.4	85
4.5.7	Testrapport for T3.1	86
4.5.8	Testrapport for T6.2 og T6.3	86
4.5.9	Testrapport for T6.1	86
4.5.10	Testrapport for T8.1	87

## 4.1 Introduksjon

Testene beskrevet i denne spesifikasjonen er direkte avledet fra krav satt av FFI i den hensikt å bekrefte at kundens krav oppfylles. Det vil si at ingen av testene er vilkårlige, og alle testene kan direkte spores tilbake til et krav. Vi har kategorisert testene etter samme system som kravene. Det er derfor naturlig å oppgi en kort oversikt over hva som skiller de forskjellige kategoriene:

- Funksjonelle krav: Tester som verifiserer kundens krav om systemets hovedfunksjoner.
- Egenskapskrav: Tester som verifiserer kundens krav til de praktiske aspektene av systemet.
- Restriksjonskrav: Denne kategorien av tester vil verifisere kundens krav om rammeverk til prosjektet. Eksempelvis tidsforbruk, kostnad, størrelse og vekt.
- Grensesnittskrav: Tester som spesifiserer møtet mellom bruker og system.

Testspesifikasjonen vil være subjekt for kontinuerlig endring som følge av en iterativ prosess. Tett kommunikasjon mellom prosjektgruppa og kunde fører til endringer og oppdatering av kravspesifikasjonen, hvor dette avleder korresponderende endringer i testplanen.

Ettersom vi anvender SCRUM som prosjektmodell vil opphavet til testen følge en logisk kjede tilbake til *User-stories*. Testkoden forteller at *Test T1.1* stammer fra det første kravet (*K1.1*) til *User-story* 1.0.

Testene er ført inn i tabeller som gir en oversikt over all informasjon angående test, krav og prioritet. Dette spesifiseres nærmere i avsnittet *Oppsett*

Der det i spesifikasjonen refereres til *en vilkårlig konfigurasjon* er dette en test hvor fokuset er på måleriggens ytelser/funksjoner. Testobjektet er av mindre viktighet i disse testene. Det noteres at det likevel vil være et fornuftig valg å gjennomføre disse testene med forskjellige konfigurasjoner per test.

Det refereres til *Et utvalg* av forskjellige konfigurasjoner. Disse er nærmere spesifisert i et eget dokument som inneholder konfigurasjonene av motor/rotor/ESC som er mest relevant i henhold til kundens interesse. Det gjøres oppmerksom på at utvalget oppdateres kontinuerlig.

## 4.2 Strategi

Prosjektets strategi for validering og verifisering av systemet er basert på tillit mellom kunde og utvikler. Prosjektgruppa sikter mot en testprosedyre som gir kunden full tillit til at kravene er møtt og systemet utfører funksjonene på en tilfredstillende måte. Ved gjennomgang av tesplanen og tilhørende rapporter skal det fremkomme at sluttproduktet har høy kvalitet og er driftsikkert.

## 4.3 Oppsett

Test	Krav ID	Opprettet
T X.X	K X.X	dd.mm.åå
Beskrivelse		
Testkriterier		
Utstyr/ressurser		
Testresultat		
Dokumentasjon		
Kommentar		
Utført av		
Utført når		

Testene er oppsatt i tabeller som vist ovenfor. Tabellene er utformet slik at den gir all informasjon et prosjektmedlem trenger for korrekt utførelse av testen. Under følger en utredning om hva de forskjellige radene i tabellen inneholder.

Øverste linje gir informasjon om testkode, tilhørende kravkode og dato opprettet. Hver test har en individuell kode som korresponderer med koden til kravet som testen skal verifisere. Eksempelvis vil test Tx.x være testkoden til testen som verifiserer krav Kx.x.

*Beskrivelse:* gir en kort beskrivelse av hvordan testen skal gjennomføres. Dette skal være en operasjonsbeskrivelse som gir en kort oversikt for testoperatøren.

*Testkriterie:* består av en enkelt kortfattet setning som beskriver kravet om godkjenning av testen.

*Utstyr/ressurser:* beskriver alt av materiell og utstyr som behøves for å gjennomføre testen. I tester som krever flere enn en testoperatør vil dette være oppgitt her.

*Testresultat:* vil bestå av testens resultat i form av GODKJENT/IKKE GODKJENT

*Kommentar:* denne raden brukes etter behov. Mindre detaljer som f.eks endring i krav, prioritet, spesifikke prosedyrer eller andre avvik fylles inn her. Her vil det



også oppgis om testen forkastes.

*Utført av:* Navn på testoperatøren(e)

*Utført når:* Tidspunkt testen ble konkludert.

Oppsettet sikter mot generell oversikt og sporbarhet. Tabellenes funksjon er henvisning av testenes status og hvor prosjektet ligger an i forhold til verifisering av krav. Etterhvert som testene blir gjennomført vil det foreligge en mer detaljert rapport for hver test i slutten av dette dokumentet.

## 4.4 Testspesifikasjoner

### 4.4.1 Funksjonelle krav

Test	Krav ID	Opprettet
T1.1	K1.1	11.01.17
Beskrivelse	Et testobjekt plasseres i måleriggen i henhold til design. Et antall målinger gjennomføres.	
Testkriterier	Måleriggen skal produsere et dokument som beskriver virkningsgraden til motoren.	
Utstyr/ressurser	Et testobjekt (her en vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon) og måleriggen med datamaskin.	
Testresultater		
Kommentar		
Utført av		
Utført når		

Test	Krav ID	Opprettet
T2.1	K2.1	11.01.17
Beskrivelse	Et testobjekt skal settes inn i måleriggen i henhold til design og et vilkårlig antall loop800 skal gjennomføres.	
Testkriterier	Testen skal gjennomføres i henhold til spesifisert tid og måleriggen skal kunne produsere et dokument som beskriver motor og rotorkonfigurasjonens respons på loop800.	
Utstyr/ressurser	Et testobjekt (her en vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon) og måleriggen med datamaskin.	
Testresultater		
Kommentar		
Utført av		
Utført når		

Test	Krav ID	Opprettet
T2.2	K2.2	11.01.17
Beskrivelse	En vilkårlig test skal gjennomføres i måleriggen i henhold til design.	
Testkriterier	Måleriggen skal produsere et dokument som beskriver lufttrykket omkring måleriggen under testing.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med datamaskin og en vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar		
Utført av	Cecilie Dokken	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T2.3	K2.3	11.01.17
Beskrivelse	Det gjennomføres x antall tester i henhold til design. Testobjektet er en kjent last. Ref. eget dokument om måleusikkerhet	
Testkriterier	Standardavviket beregnes.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med datamaskin og et testobjekt med kjent last.	
Testresultater	Se dokument <i>Måleriggens oppløsning og usikkerhet</i>	
Kommentar	Må utføres med en kjent last, eller kjent tidsintervall. Måleriggen må kunne kalibreres slik at den er både forventningsrett og har beregnet standardavvik.	
Utført av	Halvard Thon og Eivind Foss-Pedersen	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T2.4	K2.4	11.01.17
Beskrivelse	Et testobjekt settes inn i måleriggen i henhold til design. En test gjennomføres hvor testobjektet skal produsere skyvekraft oppover og nedover.	
Testkriterier	Måleriggen skal produsere et dokument som beskriver motorens evne til å gi skyvekraft opp og ned.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med datamaskin, et utvalg motor/rotor/ESC-konfigurasjoner som har variabel pitch.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar		
Utført av	Cecilie Dokken	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T3.1	K3.1	11.01.17
Beskrivelse	Et testobjekt plasseres i måleriggen i henhold til design. Testobjektet er en vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon. Testobjektet kjøres over hele sin ytelsesskala.	
Testkriterier	Måleriggen skal produsere et dokument som beskriver testobjektets maksimum skyvekraft og når maksimum skyvekraft inntreffer (i form av $\mu s$ pådrag).	
Utstyr/ressurser	Målerigg med datamaskin, et utvalg motor/rotor/ESC-konfigurasjoner.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar	Testresultatene bør sammenliknes med maks skyvekraft spesifisert av produsent.	
Utført av	Cecilie Dokken	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T6.1	K6.1	11.01.17
Beskrivelse	Et testobjekt plasseres i måleriggen i henhold til design. Testobjektet her er en vilkårlig last eller motor/rotorkonfigurasjon.	
Testkriterier	Måleriggen produserer et dokument som beskriver testresultater i metriske enheter.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med datamaskin og et testobjekt med vilkårlig last.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar	Denne testen kan samkjøres med andre tester.	
Utført av	Cecilie Dokken	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T6.2	K6.2	11.01.17
Beskrivelse	Et testobjekt plasseres i måleriggen i henhold til design. En vilkårlig test gjennomføres.	
Testkriterier	Måleriggen produserer et dokument med måleresultatene som kan lagres som CSV-fil.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med datamaskin og et vilkårlig testobjekt som produserer en last.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar		
Utført av	Cecilie Dokken	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T6.3	K6.3	09.02.17
Beskrivelse	Et testobjekt plasseres i måleriggen i henhold til design. En loop800-test gjennomføres.	
Testkriterier	Måleriggen produserer et resultat som viser tid.	
Utstyr/ressurser	Måleriggen med datamaskin, en vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar	Ble ikke gjennomført på loop800.	
Utført av	Eivind Foss-Pedersen, Cecilie Dokken	
Utført når	21.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T7.1	K7.1	10.02.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon settes inn i målerigg i henhold til design. Rotoren settes så i rotasjon og akselereres fra 0% til 100%.	
Testkriterier	Måleriggen produserer data over treghets-momentet motorfestet opptar fra rotoren.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med en motor/rotor/ESC-konfigurasjon og en datamaskin.	
Testresultater		
Kommentar	Krav K7.1 forkastet, test T7.1 utgår.	
Utført av		
Utført når		

Test	Krav ID	Opprettet
T7.2	K7.2	02.03.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon settes inn i målerigg i henhold til design. Motoren settes så i rotasjon og holdes under konstant RPM.	
Testkriterier	Måleriggen produserer data over <i>steady-state</i> -momentkrefter som motorfestet opptar fra rotoren	
Utstyr/ressurser	Målerigg med en motor/rotor/ESC-konfigurasjon og en datamaskin	
Testresultater		
Kommentar	Krav K7.2 forkastet, test T7.2 utgår.	
Utført av		
Utført når		

Test	Krav ID	Opprettet
T8.1	K8.1	08.05.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon settes inn i målerigg i henhold til design. Motoren settes så i rotasjon.	
Testkriterier	Måleriggen produserer data over motorens omdreingshastighet (RPM)	
Utstyr/ressurser	Målerigg med en motor/rotor/ESC-konfigurasjon og en datamaskin	
Testresultater	IKKE GODKJENT	
Kommentar	RPM blir avlest, men gir verdier som avviker fra spesifisering. Det undersøkes om problemet er i motorens ytelse eller i software.	
Utført av	Cecilie Dokken og Halvard Thon	
Utført når	22.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T9.1	K9.1	08.05.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotor/ESC-konfigurasjon settes inn i målerigg i henhold til design. Motoren settes så i rotasjon.	
Testkriterier	Måleriggen produserer data over motorens utvendige temperatur	
Utstyr/ressurser	Målerigg med en motor/rotor/ESC-konfigurasjon og en datamaskin	
Testresultater		
Kommentar		
Utført av		
Utført når		



## 4.4.2 Egenskapskrav

Test	Krav ID	Opprettet
T4.1	K4.1	18.01.17
Beskrivelse	Testoperatøren fester samtlige motorer som er spesifisert i vedlegg <i>Utvalg motorer</i> i innfestingen på måleriggen. Dette gjøres i henhold til design. Merk at forskjellige grupper motorer har forskjellige tilhørende innfestinger	
Testkriterier	Innfestingen ( <i>Soppen</i> ) skal støtte alle motorene som den er spesifisert for og motorene skal være festet forsvarlig og med rett vinkel	
Utstyr/ressurser	Samtlige motorer spesifisert i <i>Utvalg motorer</i> og tilhørende <i>sopper</i> . Passende verktøy (skrujern, bits).	
Testresultater	GODKJENT*	
Kommentar	*for følgende: DJI snail, DJI e600, 3DR, T-motor Navigator MN3508	
Utført av	Halvard Thon og Fredrik Hansen	
Utført når	19.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T5.1	K5.1	12.01.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotorkonfigurasjon plasseres i måleriggen. En vilkårlig måling som innebærer at propellen roteres gjennomføres. Måleoperatøren inspiserer mulighet for å berøre propell når den spinner.	
Testkriterier	Berøring av propell er fysisk hindret.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med motor/rotorkonfigurasjon.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar	Denne testen bør gjennomføres med to personer tilstede.	
Utført av	Fredrik Hansen, Eivind Foss-Pedersen, Truls Øhrn og Halvard Thon	
Utført når	19.05.17	

Test	Krav ID	Opprettet
T5.2	K5.2	12.01.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotorkonfigurasjon plasseres i måleriggen i henhold til design. En vilkårlig måling startes. Nødstoppsystemet aktiveres før målingen er fullført.	
Testkriterier	Krafttilførselen til alle roterende/bevegelige deler kuttes. Rotasjon opphører gradvis.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med en vilkårlig motor/rotorkonfigurasjon.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar		
Utført av	Fredrik Hansen og Eivind Foss-Pedersen	
Utført når	19.05.17	

#### 4.4.3 Restriksjonskrav

Test	Krav ID	Opprettet
T4.2	K4.2	11.01.17
Beskrivelse	En vilkårlig motor/rotorkonfigurasjon plasseres i måleriggen i henhold til design. Stoppeklokke startes når testobjektet er forsvarlig plassert. Testoperatøren fjerner testobjektet og erstatter det med et annet. Tiden stansen når neste testobjekt er plassert forsvarlig og er klart til test.	
Testkriterier	Bytte av testobjekter gjennomføres på maksimum 5 minutter.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med minst to vilkårlige motor/rotorkonfigurasjoner og ei stoppeklokke.	
Testresultater	GODKJENT	
Kommentar	16 × 19mm til 16 × 19mm på 3min 30s. 16 × 19mm til 25 × 25mm på 3min 50s.	
Utført av	Fredrik Hansen, Eivind Foss-Pedersen og Halvard Thon	
Utført når	19.05.17	

#### 4.4.4 Grensesnittskrav

Test	Krav ID	Opprettet
T6.3	K6.3	11.01.17
Beskrivelse	Det plasseres en vilkårlig motor/rotorkonfigurasjon i måleriggen i henhold til design. Testoperatøren iverksetter alle målingene som måleriggen skal kunne gjennomføre.	
Testkriterier	Målingene skal velges, startes og avsluttes fra en datamaskin.	
Utstyr/ressurser	Målerigg med en vilkårlig motor/rotorkonfigurasjon og en datamaskin.	
Testresultater		
Kommentar		
Utført av		
Utført når		

## 4.5 Testrapporter

Dette avsnittet inneholder rapportene for hver test som har blitt gjennomført i prosjektet. De består hovedsaklig av en litt mer detaljert beskrivelse av testprosedyren og eventuell drøfting rundt testresultatet.

### 4.5.1 Testrapport for T5.1

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonen. Fokuset på denne testen er inspeksjon av propellbeskyttelsen til riggen. For å oppnå en godkjent test må propellbeskyttelsen fungere i henhold til designet uten feil eller mangler.

Propellbeskyttelsen ble felt ned og justert til passe høyde for den aktuelle motor/rotor-konfigurasjonen. Det ble igangsatt rotasjon av en propell med diameter på  $279,4\text{mm}$ . Testoperatøren inspiserte at beskyttelsen ikke tillot berøring av propellen fra siden. Beskyttelsen motstår effektivt berøring fra siden uten at man kommer i kontakt med den roterende propellen. Beskyttelsen forblir i sin opprinnelige posisjon etter berøring, hvilket verifiserer at nivelleringsmekanismen fungerer tilstrekkelig.

Det gjøres imidlertid oppmerksom på at propellbeskyttelsen ikke forhindrer berøring av propellen ovenifra eller nedenifra. Med tanke på at dette er usannsynlige retninger for uaktsom berøring av propellen kan det sies at testen er godkjent. Det må noteres at brukere av riggen som har langt hår, store klær eller andre løse gjenstander må opptre forsiktig når riggen tas i bruk.

### 4.5.2 Testrapport for T5.2

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonen. For at denne testen skulle godkjennes på en tilfredstillende måte var det behov for å gjennomføre prosedyren på flere motor/rotorkonfigurasjoner.

I henhold til design ble det igangsatt rotasjon av en Snail motor med en propell med diameter på  $178\text{mm}$ . Denne ble kjørt med fullt pådrag. Nødstoppsystemet ble aktivert ved å trykke på nødstopppknappen. All krafttilførsel til motoren ble øyeblikkelig brutt og motorens rotasjon opphørte. Grunnet Snail-motoren sin

innebygde aktive bremsing stoppet motoren nærmest momentant. En identisk test ble også gjennomført på en 3DR motor med propell med diameter på  $178\text{mm}$ . Denne motoren har ikke innebygd aktiv bremsing. Nødstoppsystemet ble aktivert og krafttilførselen ble øyeblikkelig brutt igjen. Rotasjonen til motoren opphørte gradvis og stoppet helt etter et par sekunder. I henhold til kravet og testspesifikasjonen resulterte dette i en godkjent test.

### 4.5.3 Testrapport for T4.2

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonen. For at denne testen skulle godkjennes på en tilfredstillende måte var det behov for å kjøre testen på flere motor/rotorkonfigurasjoner og med to forskjellige testoperatører.

En Snail motor med propell ble festet i måleriggen i henhold til design. Det vil si at motoren var forsvarlig festet med alle festemidler og innleggskive. Denne motoren har en innfesting bestående av 4 stk. M3 skruer i en  $16 \times 19\text{mm}$  dimensjon. Alle elektriske kabler var koblet til slik at motoren var klar til testing. En stoppeklokke ble startet og prosedyren med å bytte motor ble iverksatt. Motoren som erstattet den opprinnelige konfigurasjonen var en 3DR, som forøvrig har samme dimensjon og skruer som Snail-motoren. Tiden ble stoppet da 3DR-motoren med innleggsskiven var festet til soppen og alle elektriske kabler koblet til slik at motoren var klar til testing. Hele prosedyren ble gjennomført på 3 min 30 sek.

Neste test ble gjennomført ved bytte av 3DR-motoren til en T-motor navigator 3508MN. I motsetning til de to første motorene har denne en innfesting bestående av 4 M3 skruer i en  $25 \times 25\text{mm}$  dimensjon. For innfesting av denne motoren kreves det at passende adapter festes mellom motor og sopp. Prosedyren var ellers lik som ved første test. Som forventet tok det siste byttet lenger tid. T-motoren var klar til test etter 3 min 50 sek.

For å ytterligere verifisere at kravet er innfridd ble testen repetert med en annen testoperatør, som gjennomførte prosedyren på enda kortere tid. Dette tilsier at kravet om å kunne bytte motorer på under 5 minutter er innfridd og testen godkjennes.

#### 4.5.4 Testrapport for T4.1

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonene. Det gjøres oppmerksom på at testen bare er delvis gjennomført ettersom det ikke har latt seg oppdrive alle motorene måleriggen er spesifisert for.

Denne testen er samkjørt med flere andre tester hvor det har vært nødvendig å feste forskjellige motor/rotor-konfigurasjoner i måleriggen. Måleriggens innfesting, som består av sopp med innleggsskiver, er verifisert for følgende motorer:

- DJI Snail
- DJI e600
- 3D Robotics (3DR) 2836
- RC Tiger T-serie Navigator 3508MN

#### 4.5.5 Testrapport for T2.2

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonene. Denne testen ble gjort parallelt med en annen test ettersom lufttrykksfunksjonen er implementert i en testfunksjon. Når testen var gjennomført var det produsert et dokument med forskjellige testdata som var tilgjengelige på dette tidspunktet, inklusive lufttrykk. Dette blir oppgitt i *millibar* med to desimaler. Det noteres i tillegg at det er metriske enheter og verdiene er i CSV-format. Testen konkluderes derfor godkjent.

#### 4.5.6 Testrapport for T2.4

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonene. Fokuset på denne testen var hovedsaklig rundt lastcellen sin evne til å måle skyvekraft i begge retninger. For å kunne ha tillit til at lastcellen registrerer kraft symmetrisk valgte vi å montere en motor vanlig og registrere dens løftekraft oppover, deretter montere motoren nedover og sammenlikne løftekraften ved tilsvarende pådrag. Testen ble gjennomført slik ettersom en motor/rotor-konfigurasjon med variabel pitch kan ha avvik mellom løftekraft opp og ned ved samme pådrag.

Testresultatene viste at lastcellen gir lik løftekraft opp og ned ved disse testforholdene. Testen kan dermed avskrives som godkjent og kravet er innfridd.

### 4.5.7 Testrapport for T3.1

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonene. Testen ble gjennomført på flere testobjekter, hvor en av de var en DJI e600 motor med en 12,42" propell. Denne motor/ESC-konfigurasjonen har oppgitt en maksimal løftekraft på 1600g fra leverandøren, så det var mulig å sammenlikne resultater. Det varierer fra motor til motor ved hvilket pådrag maksimal skyvekraft oppnås. Det er også variasjon mellom motorer ved hvilket pådrag som krever for at rotasjon startes.

Testen er konstruert slik at testobjektet starter med  $1000\mu s$  (minimum) pådrag og stiger jevnt med ca.  $\frac{12\mu s}{s}$  helt til pådraget når  $2000\mu s$  (maksimum). Det blir så produsert måledata hvor verdienene er i CSV-format. Dette kan enkelt settes inn i regneark og videre til grafer som viser skyvekraft som funksjon av pådrag. Det kommer da tydelig frem motor/rotor/ESC-konfigurasjonens maksimale skyvekraft og ved hvilket pådrag dette inntreffer. Det vises også ved hvilket pådrag motoren krever for å starte. Testen er derfor godkjent og kravet innfridd på en tilfredstillende måte.

### 4.5.8 Testrapport for T6.2 og T6.3

Denne testen er gjennomført med noe avvik fra spesifikasjonene. Med det menes det at testen er ikke kjørt separat, men i kombinasjon med andre tester. Grunnen for dette er for å produsere flere målevariabler under testen. Fokuset var at etter en test er gjennomført skal det fremkomme et dokument hvor måleverdiene er presentert i CSV-format.

En test ble gjennomført og variablene tid, pådrag, lufttrykk og skyvekraft ble målt. Disse verdiene ble gjengitt i CSV-format etter testen var fullført. Testen godkjennes og kravet K6.2 er innfridd for disse verdiene.

Godkjenning av denne testen medførte også godkjenning av test T6.3 ettersom målevariabelen tid også ble inkludert i dokumentet. Det noteres at testspesifikasjonen sier at det skal gjennomføres ved test av en loop800, men fokuset for testen er å verifisere at målevariabelen tid tas med. Godkjenning av testen er derfor fortsatt gyldig.

### 4.5.9 Testrapport for T6.1

Denne testen kan delvis godkjennes ved å referere til test T2.2, T2.4, T3.1 og T6.3. Resultatene fra disse testene verifiserer at følgende målevariabler presenteres i

metriske enheter:

- Lufttrykk, *millibar*
- Skyvekraft, *gram*
- Tid, *Sekunder*

Målevariabler som gjenstår å verifisere at presenteres i metriske enheter er effekt - *watt*.

#### 4.5.10 Testrapport for T8.1

Testen ble gjennomført i henhold til spesifikasjonene ved bruk av en 3DR 2836 og tilhørende ESC. Fra produsenten er det oppgitt at motoren har 880kV, hvilket tilsvarer en teoretisk RPM på 9768 når tilført en 11V spenning.

Testen viste en del avvik fra dette tallet per testdato, men RPM blir avlest. Det jobbes med å finne ut om problemet er i software eller om motoren ikke yter etter spesifikasjonene. Testen er derfor ikke godkjent.





# MERA



Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Design

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Dette kapitlet gir innsikt i prosessen rundt utvikling av måleriggen. Det drøftes rundt forskjellige løsninger og valg av blant annet design, dimensjonering, materialvalg og andre tekniske løsninger. Det gis også en detaljert beskrivelse av tilvirkningsprosessen for konstruksjonselementer.

Versjon	Dato	Tilført	Forfatter	Godkjent av
0.1	23.05.17	Konsept	ALLE	HT
0.2	23.05.17	Ground Effect	EFP, TØ	FH
0.3	23.05.17	Innfestning	HT	FH
0.4	23.05.17	Materialvalg innfestning	EFP	HT
0.5	23.05.17	Destructive testing	HT, FH	TØ
0.6	23.05.17	Prototype konstruksjon	HT, FH, TØ	CD
0.7	23.05.17	Sensorarm	HT	FH
0.8	23.05.17	Variabel pitch	HT	FH
0.9	23.05.17	Moment i infestning	HT	FH
0.10	23.05.17	CNC tilvirkning	TØ	FH
0.11	23.05.17	Ledningsnett	FH	HT
0.12	23.05.17	Sikkerhet	FH	HT
1.0	23.05.17	Revidert for publisering		ALLE

## Innholdsfortegnelse

<b>5.1</b>	<b>Introduksjon</b>	93
<b>5.2</b>	<b>Konsept</b>	94
5.2.1	Pugh-matrise	98
5.2.2	Kvantifisert pugh-matrise	99
5.2.3	Iterasjon	99
<b>5.3</b>	<b>Ground Effect</b>	101
5.3.1	Ground Effect	101
<b>5.4</b>	<b>Innfesting</b>	104
5.4.1	Generelle egenskaper for innfesting	104
5.4.2	Brakett	105
5.4.3	Klemme	106
5.4.4	Drøfting og konklusjon	107
<b>5.5</b>	<b>Materialvalg innfestning</b>	108
5.5.1	Akrylglass	108
5.5.2	Stål	110
5.5.3	Aluminium	112
5.5.4	Konklusjon	114
<b>5.6</b>	<b>Destructive testing</b>	115
5.6.1	Komponentene som ble testet	116
5.6.2	Testutstyret	118
5.6.3	Teoretiske beregninger	119
5.6.4	Testresultater	121
5.6.5	Drøfting og sammenlikning	128
5.6.6	Konklusjon	131
<b>5.7</b>	<b>Prototype konstruksjon</b>	133
5.7.1	Generelt om prototypen	133
5.7.2	Tilvirkning	137
<b>5.8</b>	<b>Sensorarm</b>	144
5.8.1	Kort om sensorene	144
5.8.2	Design og tilvirkning	146
<b>5.9</b>	<b>Variabel pitch</b>	151
5.9.1	Utvikling av konsepter	152
5.9.2	Tilvirkning og konstruksjon	155
5.9.3	Konklusjon	157
<b>5.10</b>	<b>Moment i innfestning</b>	158
5.10.1	Generelt om YAW	158
5.10.2	Måling av YAW med sirkulær aksel	160
5.10.3	Måling av YAW med egen lastcelle	162

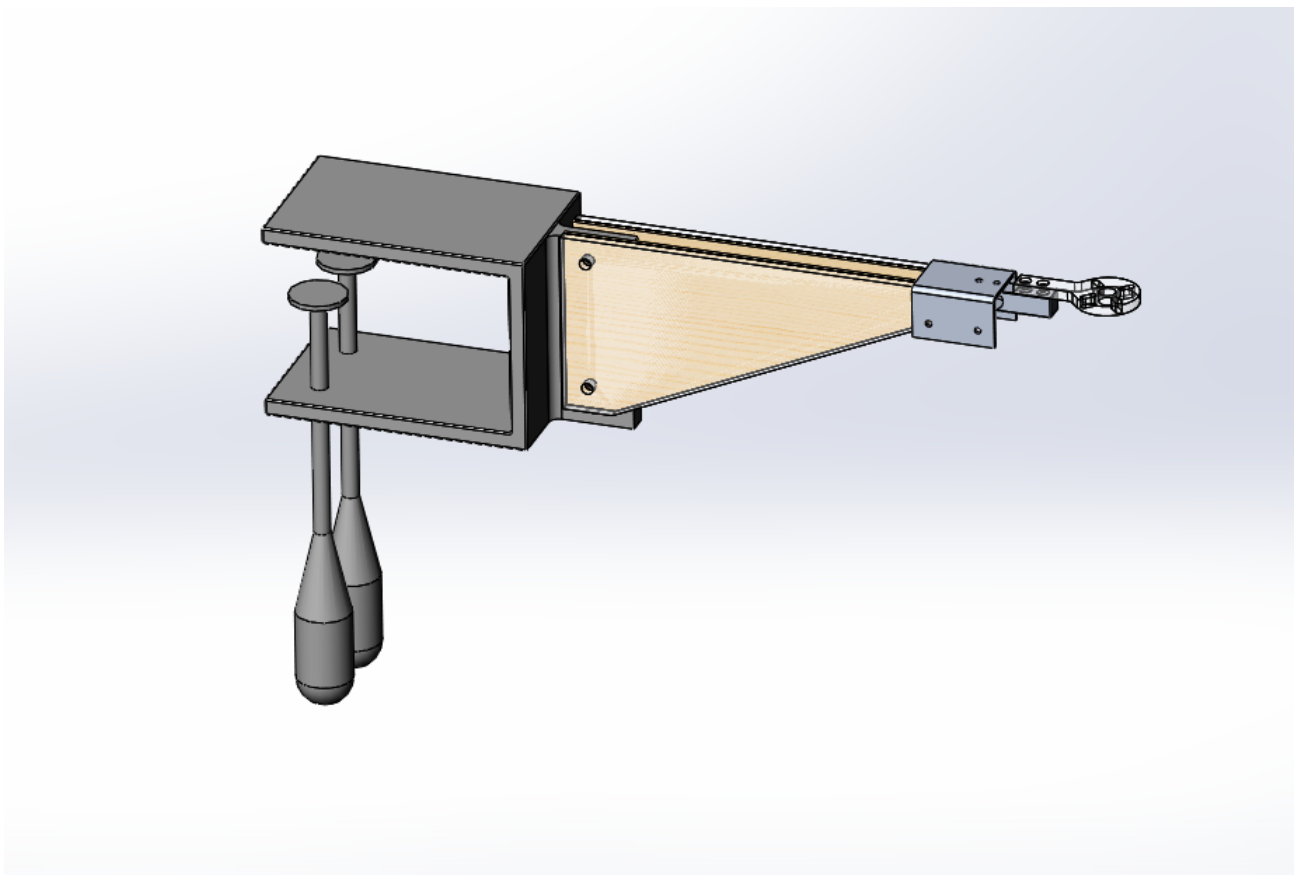
5.10.4	Kombinert sopp og lastcelle . . . . .	166
5.10.5	Design og beregning . . . . .	167
5.10.6	Strekklapper . . . . .	177
5.10.7	Konklusjon . . . . .	177
<b>5.11</b>	<b>CNC Tilvirkning . . . . .</b>	<b>178</b>
5.11.1	CNC fresing . . . . .	178
5.11.2	Utførelse . . . . .	180
<b>5.12</b>	<b>Ledningsnett . . . . .</b>	<b>185</b>
5.12.1	Kabelkanal . . . . .	185
5.12.2	Ledningsnett . . . . .	188
<b>5.13</b>	<b>Sikkerhet . . . . .</b>	<b>190</b>
5.13.1	Propellbeskyttelse . . . . .	190
5.13.2	Nødstoppsystem . . . . .	194

# 5.1 Introduksjon

Utviklingen av måleriggen har ført til at gruppen har måttet ta mange valg og gjøre beregninger for å tilrettelegge for måling. Dette kapitlet er satt sammen av dokumenter som inneholder disse beregningene og forklaringene. Måleriggens utseende og fysiske dimensjoner blir utredet for i dokumentene *Konsept*, *Ground effect*, *Sikkerhet*, *Innfesting*, *Sensorarm*, *Variabel pitch* og *Moment i innfestning*. Fremgangsmåten i konstruksjon av måleriggen kommer fram i dokumentene *Prototype konstruksjon*, *CNC Tilvirkning*, *Ledningsnett*. Begrunnelsene for materialene som er brukt i sensormodulen utredes for i dokumentene *Materialvalg* og *Destructive testing*.

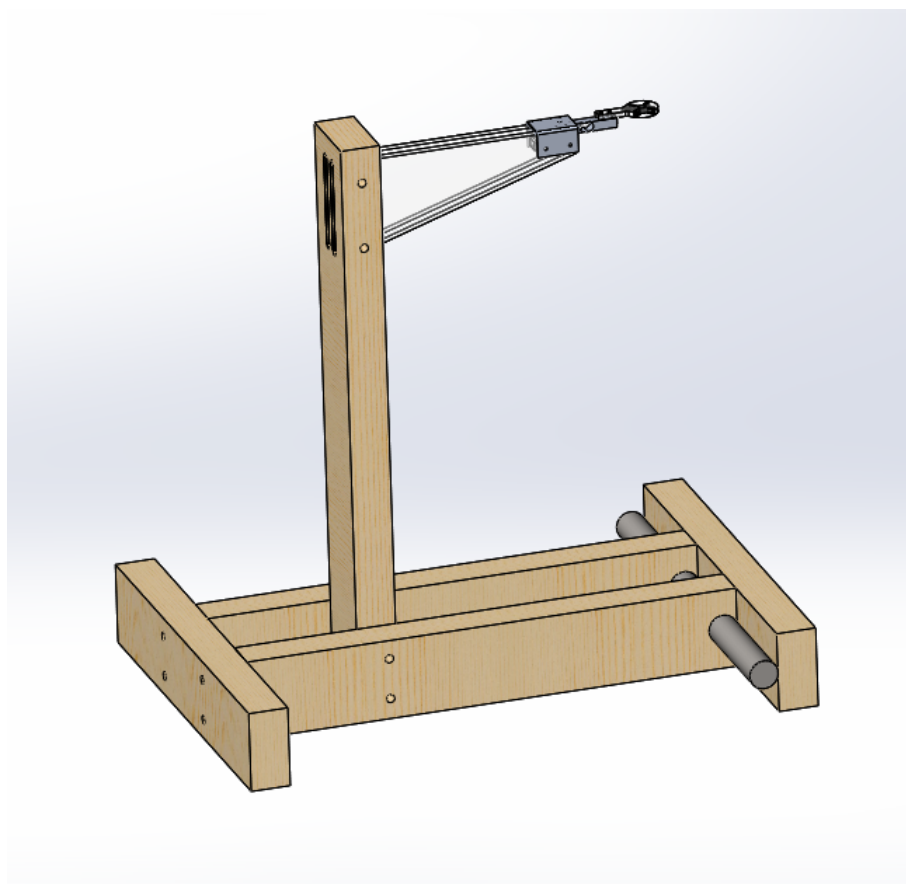
## 5.2 Konsept

Vi har sammenlignet 3 konsepter i pugh-matriser for å finne det beste konseptet til prosjektet. Det første konseptet er en bordmontert arm som kan festes til de fleste bord, se fig. 5.44. Armen er 25 cm lang og har en monteringsanordning for motorer ytterst på armen. Sensorer vil monteres ytterst, mellom armen og motorfeste, og ledninger vil gå langs armen. Det andre konseptet har lik innfestning av motor og komponenter som første konsept, men har et eget understell som gjør den frittstående istedenfor å bli montert på en bordplate, (se fig. 5.45). Her vil ledninger og mikrokontroller bli montert i en vertikal søyle som binder målearmen og understellet sammen. Det tredje konseptet er en bordmodell, med et hull i senter av et bord hvor motor og propell blir montert, (se fig. 5.3 og 5.4). Sensorer og ledninger vil bli montert på en todelt støttering i senter av hullet.

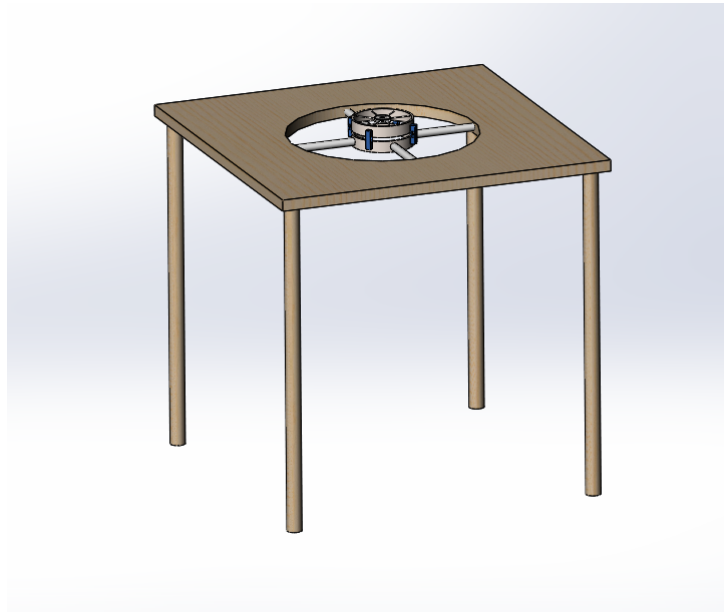


Figur 5.1: Konzept 1 - Bordmontert

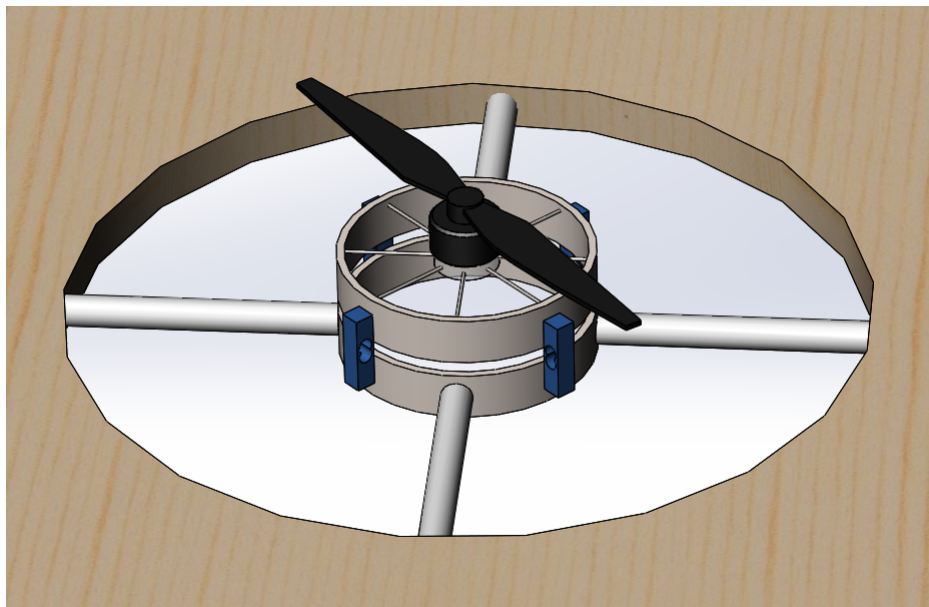




Figur 5.2: Konsept 2 - Frittstående



Figur 5.3: Konzept 3 - Bord



Figur 5.4: Konzept 3 - Innfesting

### 5.2.1 Pugh-matrise

Tabell 5.1: Pugh-matrise for konsept

Konsept → Kriterie ↓	Vekting	Bordmontert	Frittstående	Bord
Brukervennlighet	4	-	R	S
Robusthet	2	S	R	+
Støtter liten/stor propell	5	S	R	-
Kompleksitet/ kontruksjon	4	+	R	-
Kostnad	2	S	R	-
Videreutvikling	3	S	R	-
Transporterbar	2	+	R	-
Estetikk	1	S	R	+
Sikkerhet	3	-	R	+
Montering	1	+	R	-
$\sum$ S		13	R	4
$\sum$ +		7	R	6
$\sum$ -		7	R	17

Vi startet med en pugh-matrise som sammenlignet de tre konseptene mot hverandre. Her valgte vi å sette den gulvstående modellen som referanse, det vil si den vi sammenlignet de andre konseptene mot, og så om de andre konseptene var bedre, dårligere eller like gode som referansen. Hvis konseptet var bedre en referansen fikk det et plusstegn, hvis konseptet var dårligere fikk det et minustegn, og ved like god brukte vi bokstaven S for samme. Til slutt summerte vi antall +, -, og S-er og så hvilket konsept vi skulle gå for. Vi har kvantifisert de ulike punktene etter hvor viktige de er utfra våre krav, og rangert de på en skala fra 1 til 5. Her kom vi frem til at konsept 1 og 2 stilte likt, og at konsept 3 ble forkastet. Referansen vil ha et resultat med bare "S", så på bakgrunn av at konsept 1 har likt antall + og -, er konsept 1 og 2 like gode.

## 5.2.2 Kvantifisert pugh-matrise

Tabell 5.2: Pugh-matrise kvantifisert

Konsept → Kriterie ↓	Vekting	Bordmontert	Frittstående
Brukervennlighet	4	5	5
Robusthet	2	4	6
Støtter liten/stor propell	5	5	5
Kompleksitet/ kontruksjon	4	6	5
Kostnad	2	5	7
Videreutvikling	3	5	5
Transporterbar	2	7	6
Estetikk	1	7	8
Sikkerhet	3	3	5
Montering	1	6	4
$\Sigma$		78	85

Deretter satte vi opp en kvantifisert pugh-matrise for å sammenligne konsept 1 og 2. Her rangerte vi de to konseptene fra 1 - 10, hvor 10 er best innenfor de ulike punktene. Den totale poengsummen ble regnet ut, og resultatet viser at konsept 2 er best egnet for vårt prosjekt, og det er dette konseptet vi vil jobbe videre med.

## 5.2.3 Iterasjon

Iterasjon er en naturlig del av prosjektmodellen vi følger i dette prosjektet. Med bakgrunn i dette gjennomførte vi en iterasjon på konseptene. Vi løste dette ved at hvert enkelt gruppelem satte opp egne matriser med de originale kriteriene og vektet disse på nytt individuelt. Hensikten med dette er at vi tenker igjennom valgte løsninger en ekstra gang, for å sørge for at rett konsept blir valgt. Dette ble gjennomført den 8. mars i starten av sprint 3 i henhold til sprintoversikt og prosjektplan.

Etter sammenligning av matrisene i plenum viste resultatene at vi igjen landet på konseptet med en frittstående målerigg. Dette betyr det valgte konsept er det

beste i våre øyne og vi fortsetter derfor utvikling av en prototype.

## 5.3 Ground Effect

En rotor skaper oppdrift ved at når den roterer vil den på grunn av sin vingeprofil presse luft nedover. Er rotoren nærme nok bakken eller et flat og relativt hardt underlag som forstyrrer luftstrømmen vil dette påvirke løfteevnen.

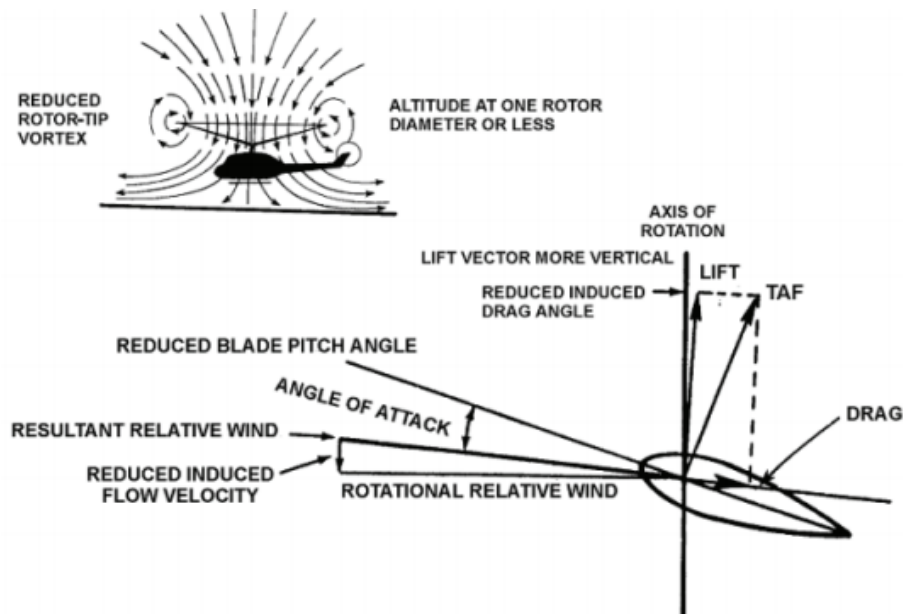
I vårt prosjekt som omhandler utvikling av en målerigg for multikopter rotor og motor konfigurasjoner, så vil luftstrømmen rundt en rotor ha en del å si. For at resultatene fra måleriggen skal være reelle må forholdene under målingene også være reelle. Med reelle forhold menes et multikopter flyvende i en høyde over bakken i vindstille omgivelser. Det er her hensyn for *Ground Effect* må tas med i utviklingen av målerigg.

### 5.3.1 Ground Effect

Når et helikopter hovrer over bakken i en viss høyde vil fenomenet *Ground effect* inntreffe. Dette er på grunn av to forskjellige fenomener, *induced flow* forstyrres og malstrømmene som dannes rundt tuppene av rotorene blir forstyrret.

#### Induced flow

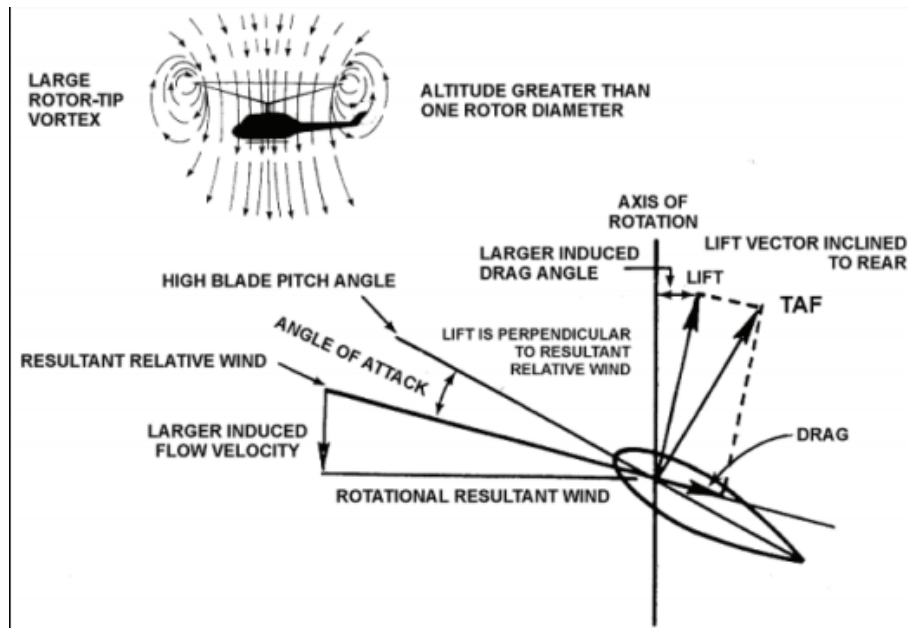
Induced flow, luftsøylen som går gjennom rotor-arealet, blir forstyrret av bakken ved lav flygehøyde og blir sakkert ned. Resultatet av dette gjør at det blir mindre *drag*, som fører til at løft-vektoren blir mer vertikal. Dette fører til at angrepsvinkel på bladet (angle of attack, vinkelen mellom bladets midtlinje og bevegelsesvektoren) ikke trenger å være like stor for å generere samme løftet som den ville gjort i større høyder, (se figur 5.5).



Figur 5.5: In ground effect hover - hentet fra [1]

### Wing tip vortex

I enden av de roterende rotorbladene vil det oppstå et fenomen som heter wing tip vortex. Dette er malstrømmer som oppstår når bladene treffer stillestående luft. Fenomenet kan lett sees når et fly passerer for eksempel en sky. Disse malstrømmene vil så forstyrre rotorbladet som kommer etter og ha en turbulens-skapende effekt. Er rotoren over ground effect-høyde vil ikke luftsøylen som dannes av rotoren ha noe å si (se figur 5.6). Er rotoren i ground effect høyde vil luften som presses langs bakken forstyrre dannelsen av disse malstrømmene, fordi de hemmer størrelsene de kan oppnå (se figur 5.5). Siden disse blir begrenset i størrelse vil større deler av rotorbladet generere effektiv løft istedenfor å resirkulere deler av malstrømmen. Dette fører til et mer effektivt løft, så man må bruke mindre kraft på å holde seg i en svevende posisjon.



Figur 5.6: Out of ground effect hover - hentet fra [1]

### Konklusjon

Kilden U.S. Army Field Manual Fundamentals of Flight sier at dette skjer opp til og med en høyde fra bakken lik diameteren til rotoren[1]. Andre kilder påstår at det vil oppstå en ground effect opp til en høyde lik  $\frac{5}{4}$  av rotor diameter[2]. Derfor har vi i vårt design bestemt å ha rotoren 54 cm over stativet under, fordi oppgaven er begrenset til rotorer på 17 tommer som øverste grense.  $17'' * 2,54cm = 43,18cm \Rightarrow 43,18cm * 1,25 = 53,975 cm$ .



## 5.4 Innfesting

En målerigg for multikopter motor/rotor må kunne støtte et utvalg av motorer fra forskjellige produsenter, ettersom en av hovedoppgavene er sammenlikning av data. Dette poserer en utfordring med tanke på design av interface mellom rigg og motor. Brukervennlighet og universale løsninger er hovedfokuset i dette dokumentet. Det er ikke bærekraftig å måtte bruke en forskjellig interface for hver motor som skal testes.

### Tillegg til konklusjonen

Det bemerkes at ved tidspunktet dette dokumentet ble skrevet var kjennskapen til en multikoptermotor svært begrenset. Kort tid etter publiseringen av dokumentet var det åpenbart at bruk av ringklemmer som innfesting for motorene var totalt uegnet. Leseren kan derfor se bort ifra dette avsnittet.

### 5.4.1 Generelle egenskaper for innfesting

Det er et par momenter som bør tas i betraktning når design av innfesting utvikles. For å eliminere eventuelle feilkilder under testing og med tanke på motorens design bør montering av motor på målerigg kunne gjøres på samme måte som montering av motor på multikopter. Det vil si at interface mellom motor og rigg bør ha samme design som interface mellom motor og multikopter. Dette vil også eliminere faren for eventuell tidlig slitasje da motoren opptar krefter i henhold til sitt design.

Ved å designe innfestingen mellom motor og målerigg lik som innfesting mellom multikopter og motor forsikres det mot feilkilder ved måling fom følge av forskyvning/geometrisk avvik. Det vil oppstå målefeil om motoren festes inn med feil vinkel.

Ved avvik i innfesting vil målt skyvekraft ( $F_m$ ) avvike fra reell skyvekraft etter forholdet:

$$F_m = F_t \cos(\theta)$$

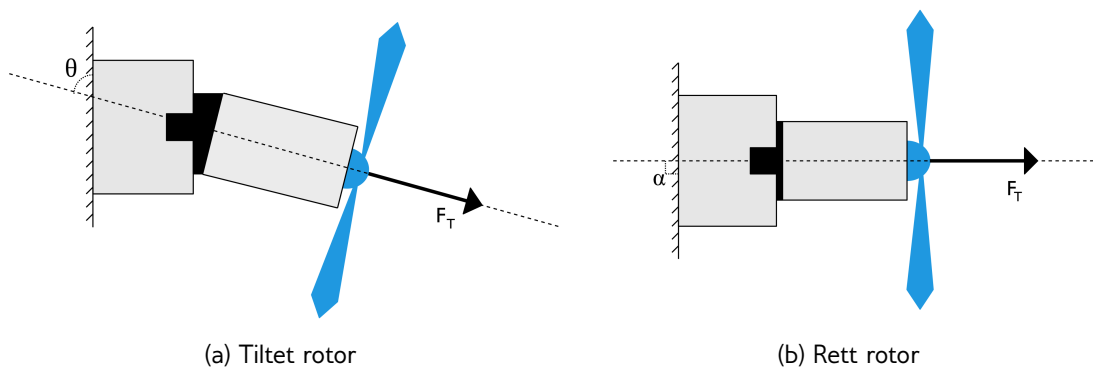
som figur 5.7a antyder. For at reell skyvekraft skal samstemme med målt skyvekraft må innfesting gjøres som figur 5.7b viser, hvor  $F_t = F_m$  for  $\alpha = \frac{\pi}{2}$

Innfestingen må designes slik at motoren kan innspennes uten rom for vanding. Vibrasjoner som følge av løs innfesting vil generere støy og unøyaktige måledata. Det vil også gi unødige påkjenninger for motor og rigg. Designet av innfesting må også gjøres slik at torsjonsspenninger overføres til passende målesensor. Momentet som motoren genererer skal måles og kan derfor ikke delvis tas opp og dempes i innfesting eller riggen forøvrig. Det må også tas i betraktning at interface mellom motor og rigg ikke forstyrrer luftstrømmingen fra rotoren under testing. Dette kan påvirke testresultatene som følge av turbulens, men hovedsaklig via lasten som innfestingen tar opp fra luftstrømmen. Følgende vil det nå vurderes forskjellige løsninger som vurderes for måleriggen.

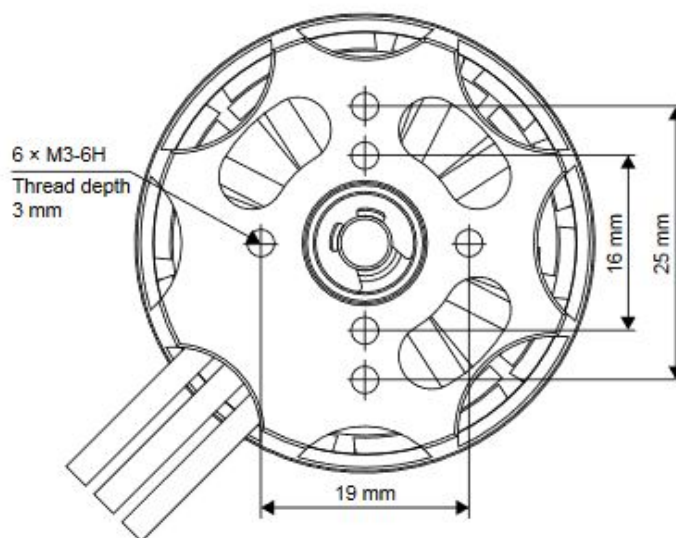
### 5.4.2 Brakett

Hovedgruppen av motorer som skal testes (foreløpig) er fra samme produsent (DJI). Disse motorene har felles monteringsprosedyre hvor forskjellene er dimensjon.

Her anvendes 4 maskinskruer av typen M3 og motorinnfesting har tilsvarende gjengede hull med dybde 3-4 mm. Ved å designe en brakett som har tilsvarende konfigurasjon vil riggen kunne ha en universal interface for motorene den spesifiseres for med rotorstørrelser opp til og med 17 tommer. Innfesting for motorer som støtter rotorstørrelser over 17 tommer vil imidlertid ikke tilsi store endringer i design da disse motorene krever de samme skruene



Figur 5.7: Skyvekraft



Figur 5.8: DJI E800 Innfesting (*E800 user manual*, 23.01.15)[3]

med en annen geometrisk konfigurasjon av skruerhullene. Dette vil derimot antagelig kreve en ny brakett. Øvrige multikoptermotorer har andre konfigurering av innfesting/montasje, men hovedsaklig er det via maskinskruer på motorens underside. Forskjellen er geometrisk plassering og antall skruer. Fornuftig design av brakett vil kunne støtte de fleste motorer hvor innfesting/montasje foregår via motorens underside, uavhengig av antall skruer som kreves. Braketter som egner seg som interface mellom motor og målerigg er ikke generelt tilgjengelig og vil måtte designes og tilvirkes. Dette medfører en viss bruk av tid og kostnad for prosjektet.

### 5.4.3 Klemme

*Se avsnitt 4.1.1*

Innfesting av motor ved bruk av en variabel ringklemme er en løsning som kan støtte samtlige aktuelle motorer. Felles for alle konvensjonelle multikoptermotorer er sirkulær geometri. Innspenning kan da gjøres universalt og ved relativt god brukervennlighet m.t.p verktøyfritt montering/demontering. Størrelsen på multikoptermotorene øker relativt lite i forhold til kapasitet, så en ringklemme vil kunne støtte et stort utvalg av motorer. Med tanke på størrelsen/konfigurasjon vil ringklemmer ha liten innvirkning på luftstrømninger fra rotor og vil dermed ikke være en særlig kilde for feilmålinger. Derimot vil det

stille større krav til nøyaktighet ved montering ettersom det ikke har noen form for selvjustering. Målefeil som følge av geometrisk unøyaktighet er et moment som må tas med i designet og bruk av ringklemmene. Det vil sannsynligvis kreve en ekstra anordning for justering av geometrisk korrekt montasje ved bruk av ringklemmer. Det finnes et bredt utvalg av ringklemmer som egner seg som innfesting. Disse er billige og lett tilgjengelig i tillegg til god pålitelighet. De vil imidlertid ha behov for noe modifisering for å kunne overføre torsjon på en måte som gjør måling mulig.

#### 5.4.4 Drøfting og konklusjon

Ved valg av metode for innfesting må aspekter som resurser, kostnad, gjennomførbarhet, kvalitet og design vurderes mot hverandre. De to løsningene som er vurdert scorer ulikt over de forskjellige kriteriene, men aspekter som er mest relevant for kundens krav vil vektlegges høyere generelt.

Brakettene har en høyere kompleksitet i forhold til ringklemmene. Ettersom det ikke er hylleware for den konfigurasjonen måleriggen krever, må de designes og tilvirkes fra bunn. Til motsetning er klemmene en lett tilgjengelig komponent. Dette tilsvarer den største forskjellene mellom de to i form av tid og kostnad. Klemmene vil også kunne støtte et bredere spekter av motorer med tanke på størrelse, hvor en brakett begrenses til et utvalg. Brakettene vil også være mer følsomme for motorprodusentenes konfigurasjon av motorfester. Om utvalget av motorer som skal testes er variert må ekstra braketter designes og tilvirkes. Som kilde til målefeil vil klemmene være mindre ønskelige i forhold til brakettene. Selv om brakettene krever mer omtanke under design for å ikke påvirke eller ta opp for mye krefter fra luftstrømning, vil de være overlegne klemmene når det kommer til presisjon og justering.

Klemmene vil være mer brukervennlig for kunden ettersom montering og demontering av motorer vil kunne gjøres hurtigere og kreve mindre ekstra utstyr i prosessen. Ved bruk av braketter vil brukeren måtte feste maskinskruene manuelt for hver montering eller demontering.

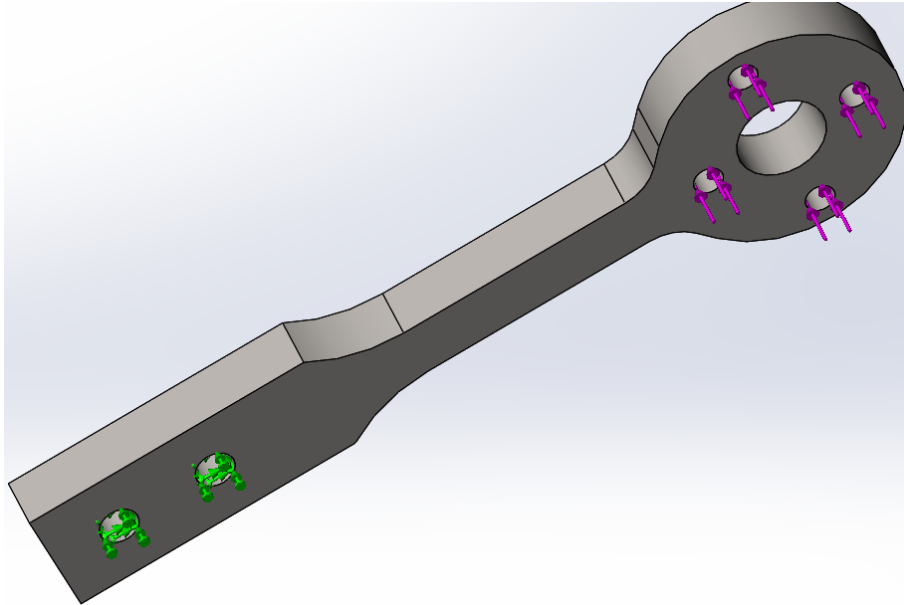
Til konklusjon vil brakettene være det ønskelige løsningen for interface mellom motor og målerigg. Kompleksiteten i forhold til klemmene til tross, vil brakettene møte kundens ønsker i større grad enn klemmene. Enkelhet og hurtig bytte av motorer veies mindre enn målenøyaktighet og presisjon. Kvaliteter som presisjon og nøyaktighet veies svært høyt og vil være avgjørende faktorer som trumfer over brukervennlighet. Dette er i tillegg spesifisert som krav fra kunden.

## 5.5 Materialvalg innfestning

For å kunne feste motor og propell til lastcellen har vi måttet komme opp med en universal festeordning som vil passe alle motorer og propeller i utvalget. Vi har laget to forskjellige festeordninger for å akkommodere for de forskjellige størrelsene. Et spørsmål som oppstår er hvilket materiale disse skal produseres i. Tilgjengelige materialer på skolen er polymetylmetakrylat (akrylglass), konstruksjonsstål eller aluminium 6086-t6. Gjennom FEM-analyser kan vi få en klar indikasjon på hvilket materiale som er hensiktsmessig å bruke.

### 5.5.1 Akrylglass

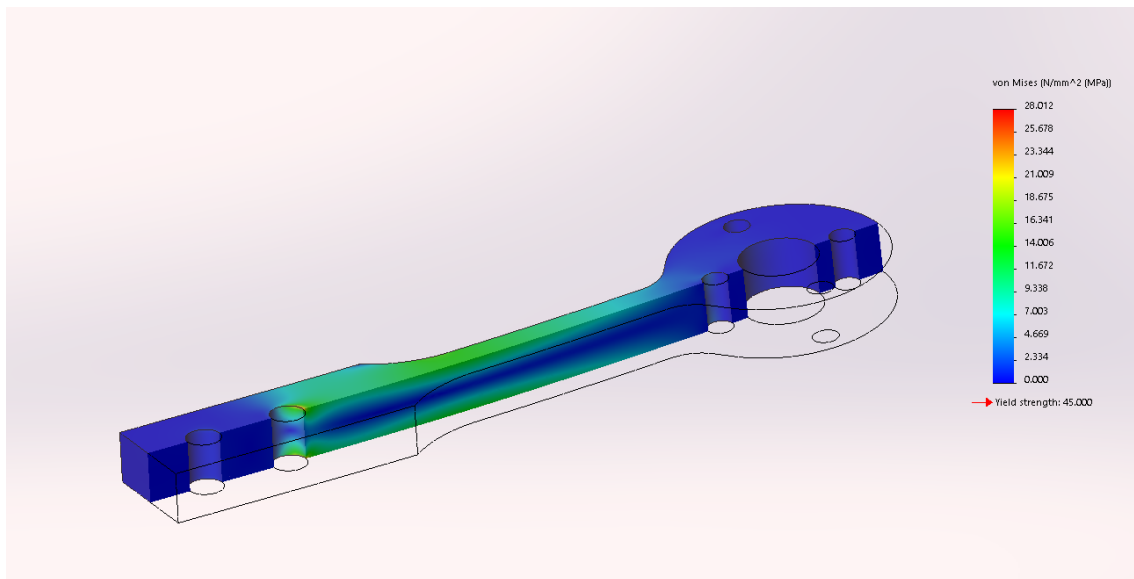
Ved å benytte skolens laserkutter har vi kunnet skjære ut motorfester i akrylglass som er 10mm tykt. Vi har med denne og de andre materialene tatt utgangspunkt i teoretisk maks løftekraft som konfigurasjonen skal kunne produsere. For den lille konfigurasjonen har vi satt 1,3 kg som tilsvarer 12,753 N, og for den store har vi beregnet 3,9 kg som tilsvarer 38,259 N. Festeordningen er festet i skruehullene bak slik at den ikke kan bevege seg i hverken x-, y- eller z- retning, dette for å simulere at den er festet med skruer, se fig. 5.9.



Figur 5.9: Simulering av innfestning med skruer og maks kraft fra liten konfigurasjon.

Resultatene av analysen viser at de største kreftene oppleves i innfestning til ytterste skruen i tillegg til innsnevring av materialet i retning motorfestene, se fig. 5.10. På det meste oppleves det 23,012 MPa i et veldig lite område, noe som gir en sikkerhetsfaktor på 1,95 opp mot flytgrensen til akrylglass som er på 45 MPa (se vedlegg 6, figur 5).

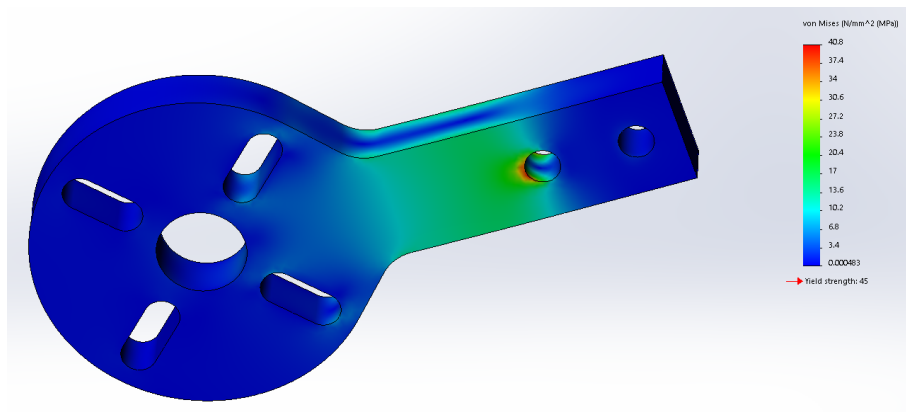
Dette er noe som er godt nok for testing via en prototype hvor vi ikke kommer til å gå opp til maks verdi. Problemet oppstår i den store festeordningen, hvor maks verdi oppnådd er mye høyere og tett oppunder flytgrensa til akrylglass (se fig. 5.11). De høyeste spenningene vil fortsatt opptre i kanten til det ytterste skrueshullet. Det vil oppleves opp til 40,8 MPa i dette området, sikkerhetsfaktoren her blir med andre ord altfor liten. Vi gjorde et forsøk å legge til en chamfer på skrueshullene for å se om en trinnvis vinkelendring ville hjelpe og hindre så høye spenninger. Dette fungerte dårlig og førte til spenninger rundt flytgrensa og opp til over 80 MPa i de samme problemområdene som uten chamfer (se fig. 5.12). Konklusjonen er at vi må bytte materiale.



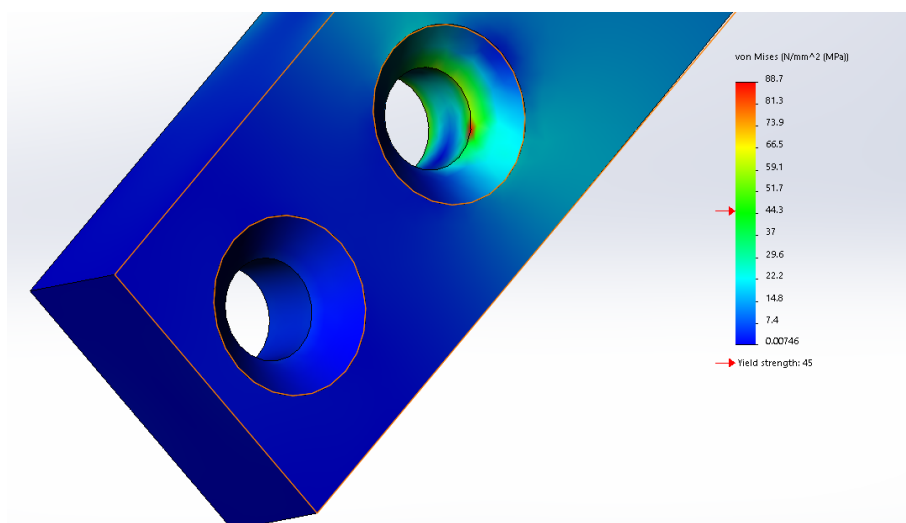
Figur 5.10: Illustrasjon av hvordan kreftene spres i festeanordningen.

### 5.5.2 Stål

Stålet vi har tilgang på er standard konstruksjonsstål. Ettersom vi ikke har tilgang på datablader for dette stålet, har vi gjort en tilnærming og brukt *plain carbon steel* i simulasjonene. Dette stålet har en flytgrense på 221 MPa (se vedlegg 6, figur 7). Resultatene fra simuleringene med stål hadde veldig mye bedre resultater enn akrylglasset, de høyeste verdiene vi fikk med chamfer var 42,2 MPa på liten og 94,5 MPa på stor festeanordning (se fig. 5.13a og 5.13b).



Figur 5.11: Spenningene i den store festeanordningen sett nedenfra.



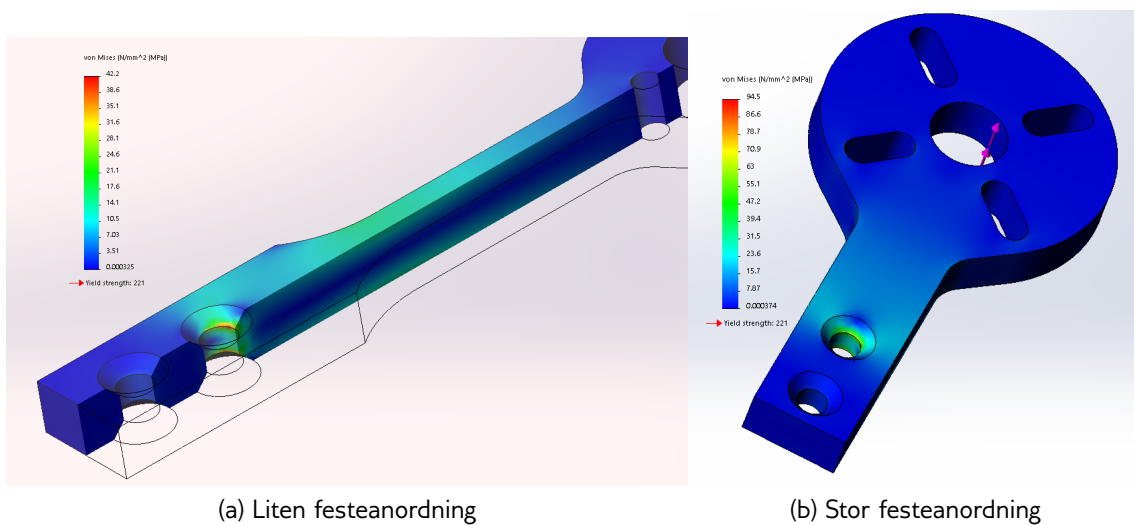
Figur 5.12: Spenningene som opptrer ved bruk av en chamfer.

Med den store festeanordningen får vi her en sikkerhetsfaktor på 2,33. Dette er mye bedre enn med akrylglass, og er noe vi kunne brukt. Problemet med stål er at det er vanskelig og dyrt å tilvirke slik som vi vil ha det. I tillegg vil egenvekten på prøvestykket bli veldig høy med tanke på massetettheten til stål. Derfor prøver vi også med aluminium, siden vi lett kan produsere festeanordninger av aluminium med CNC tilvirkning.

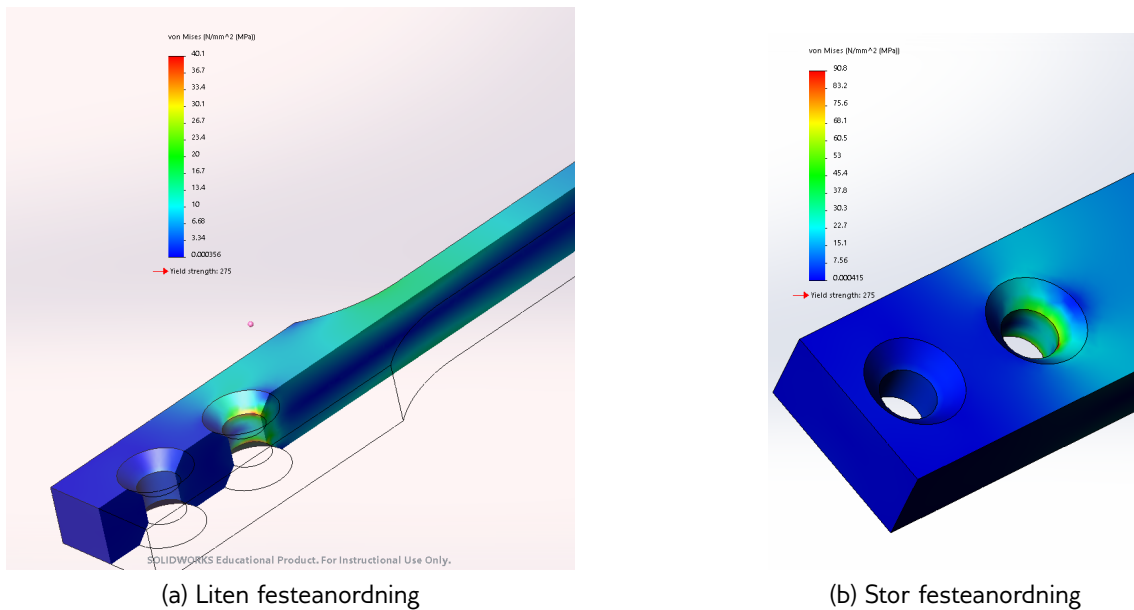


### 5.5.3 Aluminium

Innfestning og krefter ble gjort på samme måte som tidligere, og med en flytgrense på 275 (se vedlegg 6, figur 6) opplevde vi resultater vi var mer fornøyd med. Her prøvde vi også med og uten chamfer for å se om det ble store forskjeller i spenningene, som igjen i stor grad opptrer rundt ytre skruehull i innfestning til lastcellen. I resultatene med chamfer fikk liten festeordning spenninger på opp til 40,1 MPa og den store opp til 90,8 MPa (se fig. 5.14a og 5.14b).

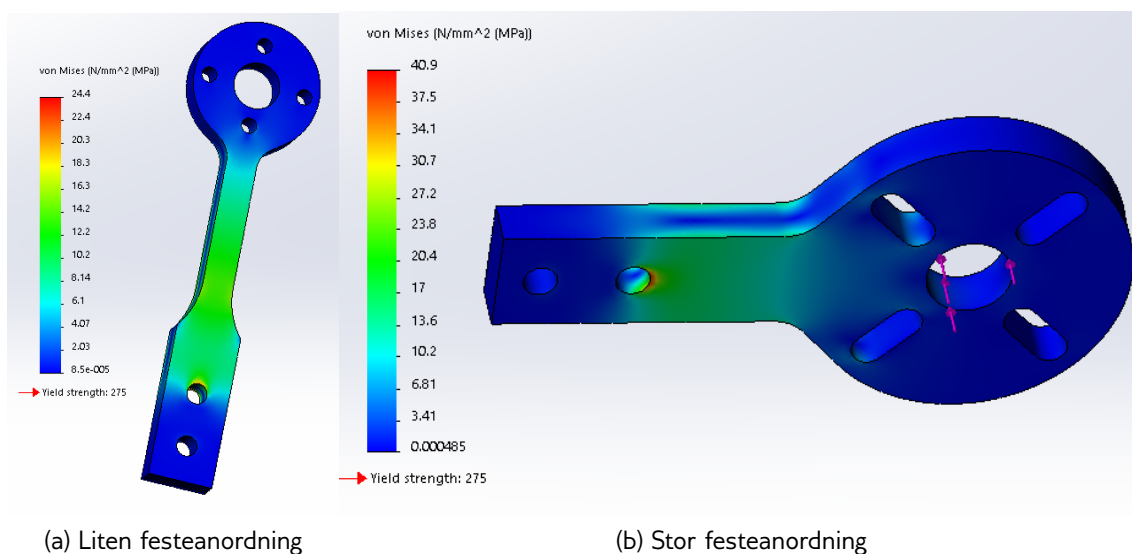


Figur 5.13: Festeordninger i stål med chamfer



Figur 5.14: Festeanordninger i aluminium med chamfer

Siden spenningene i festeanordningen ble lavere i akryl uten chamfer prøvde vi det samme på aluminiumsbitene, og dette var korrekt. Spenningene ble omtrent halvert så vi ender opp med en veldig god sikkerhetsfaktor mot flyt. Liten anordning har sikkerhetsfaktor på 11,27 og stor har 6,72 (se fig. 5.15a og 5.15b).



Figur 5.15: Festeanordninger i aluminium uten chamfer

### 5.5.4 Konklusjon

Siden aluminiumsbitene ga oss best sikkerhetsfaktor, i tillegg til at de er relativt enkle å framstille med skolens utstyr har vi valgt å gå for festeanordninger laget av aluminium uten chamfer.

## 5.6 Destructive testing

I forbindelse med ferdigstilling av den mekaniske delen av prototypen ble det øyeblikkelig iverksatt diverse testaktiviteter. Aktivitetene bestod i hovedsak av funksjonstester på sensormodulen for å kontrollere oppkoblinger, koding og diverse annen konfigurasjon av det elektriske systemet. Dette innebar oppspenning av multikoptermotorer med tilhørende rotor og igangsetting av disse. Ettersom det ikke er implementert passende sikkerhetstiltak i tilfellet svikt av innfesting i prototypen, ble det av sikkerhetsmessige årsaker utført styrkeberegninger ved *Finite element method* (Ref. egen rapport.) og reelle styrketester ved materialstrekkmaskin for bekreftelse.

Det forekommer uten tvil at det svakeste komponenten i prototypen er soppene. Disse er foreløpig tilvirket i akryl-plast. Av dette er det naturlig å konkludere med at eventuelle brudd vil inntreffe i disse komponentene. Svikt i soppene under maksimal påført skyvekraft har potensielt store konsekvenser for materiell og personell i umiddelbar nærhet av riggen. Det er derfor svært viktig å operere med en passende sikkerhetsfaktor mot svikt.

Det ble også sammenliknet og drøftet rundt testresultater av sopper med forskjellig design. Ved testdato var det tilvirket flere kopier av sopper med litt forskjellig design og dimensjoner. Dette gav mulighet for tolkning av mulige fremtidige designendringer ved endelig produkt. De mest interessante aspektene oppsummeres som:

- Bruddkraft
- Nedbøying
- Hvor brudd inntreffer
- Effekter av kjervvirkning som følge av småskader, skruehull, overganger etc.

Tatt i betraktning at det kun er funksjonstesting av en prototype så var målet med den destruktive testingen hovedsaklig å anslå om motor/rotor-testing kan foregå sikkert m.t.p person/material-skader med forsvarlig gode marginer.

Videre er det en beskrivelse av testobjektene, deres virkemåte og konfigurasjon. Testutstyret som ble anvendt er beskrevet med spesifikasjoner

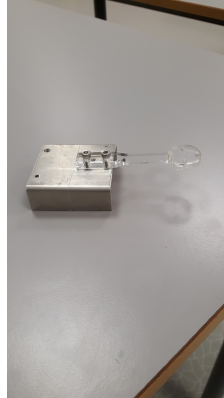
og nødvendige endringer som ble foretatt for å oppnå identiske forhold under testing. Teoretiske beregninger er foretatt for sammenlikning av reelle testresultater og avvik drøftes. Avslutningsvis er rapporten konkludert i henhold til testenes formål.

### 5.6.1 Komponentene som ble testet



Figur 5.16: Nyeste versjon sopper

Figur 5.16 viser det nyeste designet av soppene. Innspenning av motorene gjøres via fire hull til høyre på figurene (sirkulære for liten sopp, avlange for stor sopp) og skyvekraften kan antas vil virke jevnt fordelt gjennom disse. Med andre ord kan kraften antas å virke som en punktlast gjennom det store sirkulære hullet. Oppspenning foregår via hullparet til venstre på figurene. For å oppnå mest reelle resultater under destruktiv testing ble kraften påført over de sentrerte sirkulære hullene, og oppspenning gjenskapet via en tilvirket brakett i samsvar med prototypen.



Figur 5.17: Gjenskapt oppspenning av sopp

Figur 5.17 viser en liten sopp av eldre design oppspent på provisorisk aluminiumsbrakett. Dette er en god gjenskaping av forholdene i prototypen (ref. kapittel om prototype konstruksjon). Under testing ble det observert noe defleksjon i selve braketten. Den viser tydelige tegn på varig deformasjon etter testene ble fullført. I det øvre sjiktet av påført last (*ca.*  $70N - 230N$ ) kan denne defleksjonen ikke neglisjeres, dog i det aktuelle kraftintervallet ( $0N - 40N$ ) kan vi se bort ifra denne kilden til feilresultat.

Komponentene ble nøye undersøkt i forkant av testing ved hjelp av visuell inspeksjon og mikroskop. Dette for å lokalisere feil og/eller skader i godset som kan bidra som faktorer når brudd inntreffer. Dette er tatt med i betraktningen for resultater der bruddflaten inntreffer andre steder enn FEM-analysen anslår. Etter brudd inntraff er også bruddflaten nøye inspisert ved bruk av mikroskop for å avgjøre grunn til tidlig eller avvikende lokasjon for bruddet.

### 5.6.2 Testutstyret



Figur 5.18: Materialstrekkmaskin type Lloyd Ir10K

Testutstyret består i all hovedsak av en Lloyd Ir10K (5.18) materialstrekkmaskin med tilhørende fikstur og datamaskin for fjernstyring og grafisk presentasjon av testresultatene. Denne maskinen kan påføre aksial kraft opp til 10 000 Newton i høyderetningen. Dette er mer enn tilstrekkelig kraft nødvendig for den aktuelle testingen. Den grafiske fremstillingen av testresultatene er en graf som viser påført kraft som funksjon av forlengelse (*Forlengelse i dette tilfellet tilsvarer nedbøyning*).

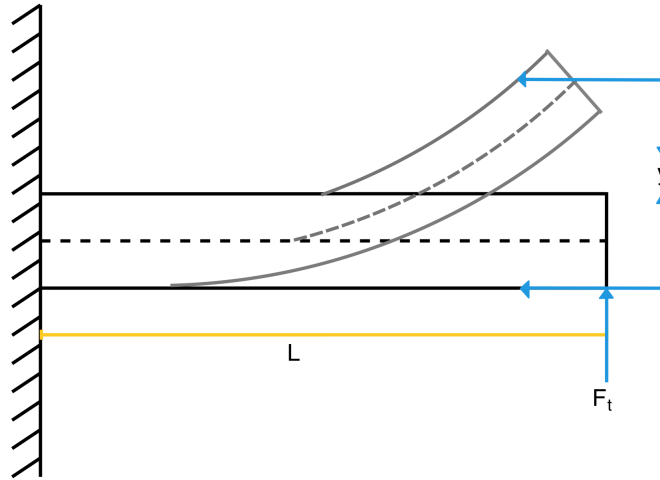
Materialstrekkmaskiner av denne typen har en oppløsning på 0.0001 Newton med en usikkerhet på mindre enn 0.5%. Forlengelsen har en oppløsning på mindre enn 0.05  $\mu m$ [4]. Det bemerkes at maskinen ikke er kalibrert etter 1992, men for testens formål ble det konkludert med at målenøyaktigheten er mer enn tilstrekkelig. Derimot for fremtidige tester og kalibrering av måleutstyr gjort med denne maskinen må dette tas med i beregningen når kilder til målefeil vurderes. Samtlige tester ble gjort med en hastighet på  $80 mm/min$

Av ekstrautstyr er det noe verktøy og festemidler, men ikke annet nevneverdig enn provisorisk brakett for innfesting som beskrevet tidligere. Testene ble også filmet.

### 5.6.3 Teoretiske beregninger

I forbindelse med designprosessen ble det også utført teoretiske beregninger for å anslå passende dimensjoner. Et viktig aspekt i disse beregningene er defleksjon av soppene. Det er vesentlig at soppene, når påvirket av kraft, ikke har en nedbøyning av større grad enn at det kan neglisjeres i målesammenheng. Defleksjon vil være en kilde til målefeil, ref. kapittel om innfesting.





Figur 5.19: Skjematisk fremvisning av defleksjon (overdrevet)

Soppen kan ansees som fast innspent slik figur 5.19 viser. Nedbøyingen (*defleksjon*)  $y_t$  ved en slik innspenning er proporsjonal med kraften  $F_t$ , slik fasthetslæren sier [5]:

$$y_t = \frac{F_t \times l^3}{3 \times E \times I_{x0}}$$

hvor  $l$  er avstand fra innspenning til kraftens angrepslinje,  $E$  er materialets elastisitetsmodul (E-modul) og  $I_{x0}$  er andre-ordens aksialt arealmoment i den akutte tverrsnittsflaten. Denne måten for beregning av defleksjon kan anvendes om materialets E-modul er lineært fram til flytgrense.

Beregninger for sammenlikninger ble gjort for både stor og liten sopp. Tverrsnittsflaten som avgjør soppens  $I_{x0}$  er valgt ved innfesting, men gjort noe forenklet; ettersom hullgeometri ved motorinnfesting ikke er en vesentlig faktor for nedbøyning så er nytt og gammelt design beregnet likt. I tillegg er tverrsnittsarealet beregnet ut fra soppens smaleste del av skaftet. Dette ligger relativt tett til innfesting men vil likevel gi noe avvik, hvilket er tatt i betraktning under sammenlikninger.

### Beregning defleksjon av liten sopp

Det er mest interessant å vite når det er størst defleksjon i soppen, så  $F_t$  er valgt til den største skyvekraften vi forventer at soppen utsettes for. Det er fra DJI snail, hvilket tilsvarer en kraft på  $12.752N$ . E-modulen settes til  $3200MPa$  for akrylplast (se vedlegg 6, figur 5). Soppens aktuelle tverrsnitt har et areal på  $6mm \times 10mm$ , hvilket tilsvarer  $I_{x0} = 500mm^4$ .  $l$  settes til  $40mm$ . Defleksjonen beregnes deretter:

$$y_t = \frac{12.752N \times 40^3mm^3}{3 \times 3200N/mm^2 \times 500mm^4} \Leftrightarrow y_t = 0.17mm$$

### Beregning defleksjon av stor sopp

Tilsvarende beregning for stor sopp gir relativt like parametere. Endringene er hovedsaklig dimensjoner:

- $l = 35mm$
- $I_{x0} = 1058.3mm^4$
- $F_t = 38.259N$

Denne beregningen vil være mer korrekt enn for liten sopp ettersom tverrsnittsarealet er konstant langs hele skaftet, til og med ved innspenning. Beregningen gir:

$$y_t = \frac{38.259N \times 35^3mm^3}{3 \times 3200N/mm^2 \times 1058.3mm^4} \Leftrightarrow y_t = 0.16mm$$

## 5.6.4 Testresultater

De tre første testene er gjort på testobjekter med identisk design og egner seg godt til sammenlikning. Det undersøkes effekter av kjerv som følge av design og skader/feil under tilvirkning. De representerer også det eldste og mest utdaterte designet og er derfor ikke like relevante i forbindelse med testingens formål. De tre neste testene er derimot svært relevante i forhold til testingens formål

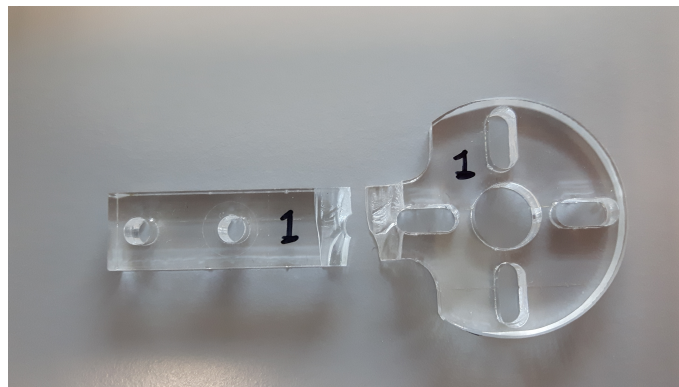
og derav vektlagt mest med tanke på beregninger. Testresultatene beskrevet i samme rekkefølge som de ble utført.

### 1. Stor sopp med gammelt design og smal godstykkelse

Akrylsopp med godstykkelse på  $6\text{mm}$ :

- Defleksjon ved brudd  $y_t = 6.953\text{mm}$
- Kraft ved brudd  $F_t \approx 200\text{N}$

(Kraft ved brudd er her et anslag ettersom kraften gikk over maksimal verdi på grafen. Passende justeringer ble gjort for neste test.)



Figur 5.20: Brudd i overgang, på tvers av hull

Bruddet inntraff i overgangen mellom skaft og motorinnfesting slik figur 5.20 viser. Undersøkelse av bruddflaten via mikroskop viser tydelige rastlinjer som antyder at bruddet startet i overkant, dvs. spenningsiden, av soppen. Plasseringen av bruddflaten er mer eller mindre som forventet, ettersom det kan observeres at bruddflaten går igjennom innfestingshullet. Dette er ved den smaleste tverrsnittsflaten for soppen, i tillegg til at hullet vil gi en kjervvirkning. Det er derimot ikke tverrsnittsflaten som opplever de største spenningene, så noe oversett kjerv eller annen material-feil kan antas. Dette var forutsett i forkant av testing og redesignet.

### 2. Stor sopp med gammelt design og smal godstykkelse

Akrylsopp med godstykkelse på  $6\text{mm}$ :

- Defleksjon ved brudd  $y_t = 6.566mm$
- Kraft ved brudd  $202.9N$



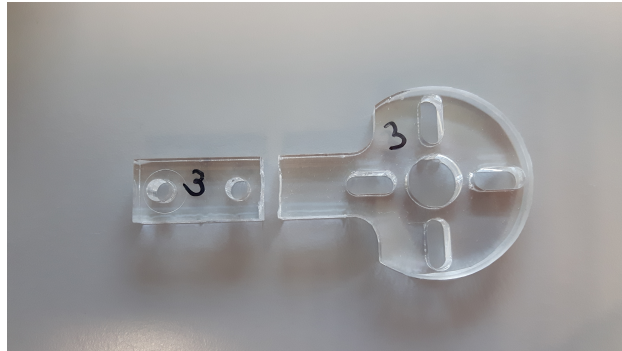
Figur 5.21: Brudd over innspenningshull

Bruddet inntraff ved innspenningshullet slik figur 5.21 viser. Dette stemmer godt overens med FEM-analyse og øvrige beregninger. Det er sannsynlig at skruehullet opptrer som kjerv og bidrar til noe spenningskonsentrasjon her, i tillegg til at tverrsnittsflaten her har minst areal. Det bemerkes at sammenliknet med den foregående testen så er det tilnærmet lik kraft ved brudd, men ulik lokasjon av brudd. Grunnen til dette er ikke kjent, ettersom grundigere undersøkelser er krevet og ikke prioritert på disse testobjektene. Det er også observert antydninger til sprøere bruddflate på denne testen sammenliknet med forrige.

### 3. Stor sopp med gammelt design og smal godstykkelse

Akrylsopp med godstykkelse på  $6mm$

- Defleksjon ved brudd  $3.674mm$
- Kraft ved brudd  $115.2N$



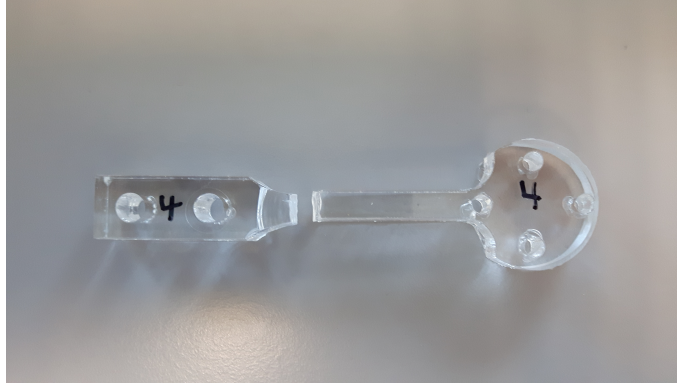
Figur 5.22: Brudd i skaftet, nær innspenning

Bruddet inntraff ca  $3.25\text{mm}$  fra innspenningshullet slik figur 5.22 viser. Dette er et avvik med modifikasjoner i forhold til FEM-analysen og øvrige beregninger. På en side er bruddflaten i tverrsnittet som opplever største spenninger om man ser bort i fra spenningene i hullkanten. På den andre siden inntraff bruddet ved en vesentlig mindre kraft sammenliknet med de to foregående testene. Undersøkelse av bruddflaten viser imidlertid at bruddet startet i hjørnet av tverrsnittsflaten på oversiden (spenningsiden). Dette fremkommer av tydelige rastlinjer rundt bruddopprikkelsen. Området rundt antyder at det var et duktilt brudd frem til restbrudd inntraff, deretter er det tegn på et sprøtt brudd. Dette antas å være grunnet høy bruddhastighet under restbrudd. Nærmere undersøkelse av området rundt bruddstart viser en material-feil som følge av tilvirkning. Soppene er skåret ut i akryl med laserkutter og et hakk som følge av ekstra smelting vil bidra med stor kjervvirkning. I tillegg noteres det at dette testobjektet ble innspent med noe høy forspenning av skruene, hvilket kan bidra til økt spenning rundt skruerhullene.

#### Liten sopp med gammelt design og bred godstykkelse

Akrylsopp med godstykkelse på  $10\text{mm}$

- Defleksjon ved brudd  $13.81\text{mm}$
- Kraft ved brudd  $227.4\text{N}$



Figur 5.23: Brudd i overgang fra innfesting til skaft

Bruddet inntraff i overgangen mellom innspenning og den smale delen av skaftet slik figur 5.23 viser. Dette stemmer godt med FEM-analysen og designet forøvrig. I forkant av testen ble det observert flere feil rundt bruddstedet som figuren viser. Disse har oppstått både som følge av ekstra smelting av gods under laserkutting i tillegg til avskalinger når soppen ble trykket ut av akrylplaten grunnet utilstrekkelig gjennomskjæring. Ettersom alle foregående testobjekter antydte at brudd startet i spenningside ble dette testobjektet plassert slik at spenningene opptredte i siden med færrest materialfeil. Det tilsvarer siden som lå opp under tilvirkning. Denne siden hadde ingen nevneverdige materialfeil, hvilket kan ha bidratt til at dette testobjektet viste størst motstand mot brudd av de små soppene.

Bruddflaten forøvrig antydte fra tydelige rastlinjer at bruddet startet i øvre hjørne på tverrsnittsfalten, i samsvar med foregående tester. Bruddflaten bar preg av et duktilt brudd i store deler av flaten (over halvparten av høyderetningen) før sprøtt restbrudd. Restbruddet foregår med stor hastighet og det observeres at splinter av akryl løsner i retning skjærspenning med høy energi

#### Liten sopp med nytt design og bred godstykkelse

Akrylsopp med godstykkelse på  $10\text{mm}$

- Defleksjon ved brudd  $16.87\text{mm}$
- Kraft ved brudd  $199.1\text{N}$



Figur 5.24: Brudd i overgang mellom innspenning og skaft

Bruddet inntraff i overgangen mellom innspenning og den smale delen av skaftet, som vist på figur 5.24, i stor likhet med foregående test. I tillegg til likhet rundt bruddets lokasjon er testobjektet svært likt det foregående m.t.p materialfeil. På undersiden var det flere skader og feil i materialet og soppen ble derfor oppspent slik at strekkspenningene opptrådte på andre siden. Forøvrig er testene svært sammenliknbare når det kommer til bruddflate: brudd startet i øvre hjørne av tverrsnittsflaten og viser tegn til duktilt brudd før sprøtt restbrudd inntraff. Igjen brøt det av en ekstra splint i retning skjærspenning.

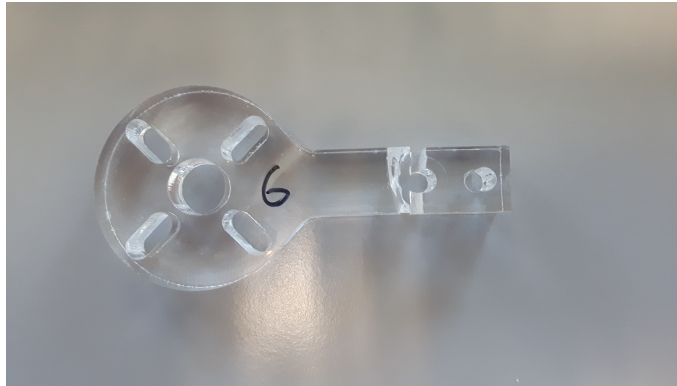
Av nevneverdig avvik avkommer det at brudd inntraff her ved 87.6% av kraften sammenliknet med bruddkraften til foregående testobjekt. Dette er ikke en neglisjerbar differanse. Det er derimot vanskelig å avgjøre eksakt grunn til dette avviket. Ingen tydelige material-feil eller andre tegn til tidligere svikt ble observert i forkant av knekktest. Ettersom det bare er gjort to tester på relativt identiske testobjekter er det også vanskelig å avgjøre om hvilken som gikk til brudd som normalt. Det kan antas at det gamle designet har litt større bruddkraft ettersom skruehullene for innspenning har litt større innbyrdes avstand, men kan ikke anslås med sikkerhet før ytterligere testing er gjennomført.

### **Stor sopp med nytt design og bred godstykkelse**

Akrylsopp med godstykkelse på 10mm

- Defleksjon ved brudd 9.77mm

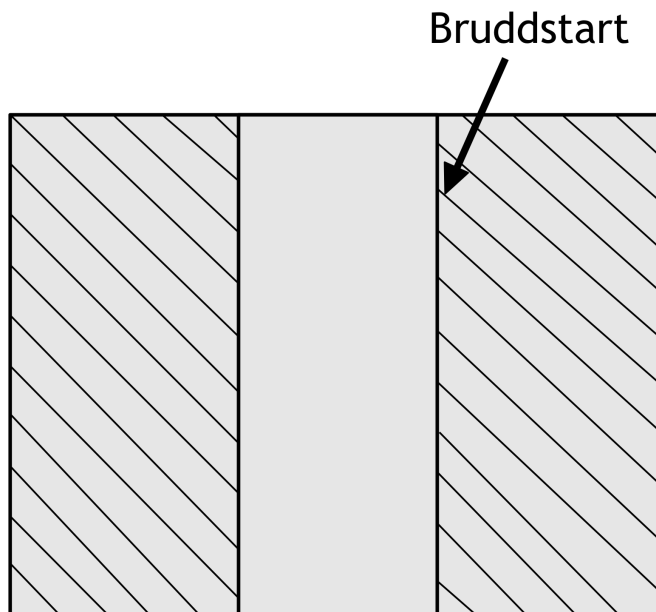
- Kraft ved brudd 322N



Figur 5.25: Brudd ved innfestingshull

Bruddet inntraff ved skruetaket slik figur 5.25 viser, i godt samsvar med FEM-analysen. Bruddflaten er ved skruetaket og går normalt på skaftets retning. Testobjektet viste opp til flere skader på trykksiden i likhet med foregående testobjekter, men spenningsiden var uten synlige skader/feil som kan bidra til påbegynnelse av brudd. (Det ble observert litt større ruhet i overgangen fra skaft til innfestingsområde for motorer, noe som bør tas med i betraktning for fremtidig bruk av laserkutter som tilvirkningsmetode.)





Figur 5.26: Skjematisk tverrsnitt av bruddflate

Nøyere inspeksjon av bruddflaten viste at brudd ble påbegynt på en merkverdig plass i forhold til tidligere tester (5.26.). Tydelige rastlinjer viser at brudd startet i periferien til skruerhullet, ca. 2 – 3mm ned fra spenningsflaten. Grundig undersøkelse av området rundt bruddstart ga ingen årsak til hvorfor bruddet startet her. Det kan være grunnet materialfeil av en størrelsesorden som krever et kraftigere mikroskop. Bruddkraften tatt i betraktning tilsier at vesentlige materialfeil antagelig ikke er tilfellet for dette bruddet. For øvrig gir bruddflaten tegn på duktilt brudd frem til sprøtt restbrudd. Film av bruddet viser flere små splinter fra bruddet oppnår stor hastighet.

### 5.6.5 Drøfting og sammenlikning

I dette avsnittet sammenliknes og drøftes det rundt de tre siste testene, ettersom de er mest relevante i forhold til testingens formål. Først og fremst er det naturlig å drøfte bruddkreftene til de forskjellige konfigurasjonene og anslå en sikkerhet mot brudd for videre bruk under prototypetesting. Sikkerheten beregnes ut i fra forholdet

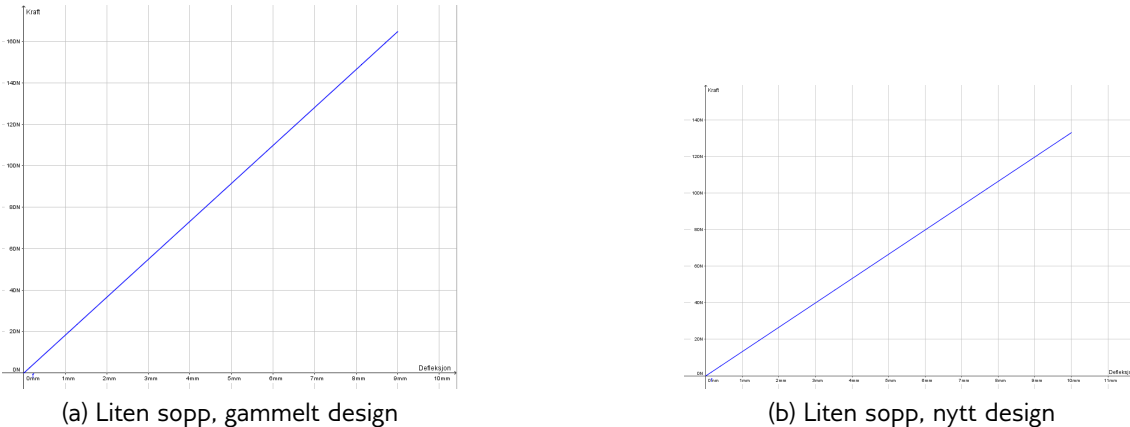
$$n = \frac{F_b}{F_{max}}$$

Hvor  $F_b$  representerer observert kraft ved brudd og  $F_{max}$  representerer maksimal kraft soppen vil utsettes for under prototypetesting.

For den lille soppen velges det å vurdere sikkerheten for soppen som gikk til brudd ved lavest kraft. Det er to grunner til dette; det er fornuftig å gå ut ifra den laveste sikkerhetsfaktoren når avvikende testresultater fremvises, spesielt ettersom grunnen til avviket ikke er kjent. Den andre grunnen er at det er denne soppen som har mest relevant design og brukes til prototypetesting. Sikkerhetsfaktoren beregnes til:

$$n = \frac{199.1N}{12.752N} \Leftrightarrow n = 15.61$$

Initielt sett er denne verdien for sikkerhet mot brudd svært god. Det må likevel bemerkes at soppen vil undergå dynamisk belastning og vibrasjoner under prototypetesting. Av dette medfølger det at utmatting kan være en faktor som må vurderes ved forlenget bruk.



Figur 5.27: Kraft som funksjon av nedbøying

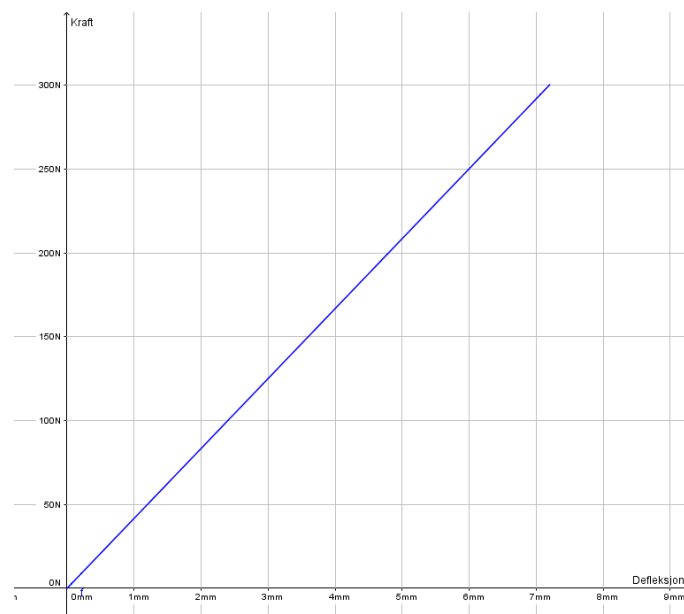
Figur 5.27 er en grafisk gjenskapning av forholdet mellom kraft og nedbøying for de små soppene. Det ble observert at forholdet er tilnærmet lineært frem til et visst punkt. Ved dette punktet foregår det plastisk deformasjon og stigningen på grafen vil avta. Ettersom akryl er et relativt sprøtt material inntreffer imidlertid brudd svært kort etter plastisk deformasjon hadde startet. For den lille soppen med gammelt design (5.23) avtok stigningen ved ca  $9mm$ . Den andre lille soppen med nytt design (5.24) viste plastisk deformasjon ved en nedbøying på ca  $10mm$ . Det er svært likt, men stigningstallet har et markant

avvik mellom disse to: a)  $\frac{df_1}{dx} = 18.3$  og b)  $\frac{df_2}{dx} = 13.3$ . Om dette er et enkelttilfelle eller er grunnet forskjellig design kan ikke avgjøres med sikkerhet uten ytterligere testing.

For den store soppen må det bemerkes at det kun ble gjennomført en test på den aktuelle konfigurasjonen for prototypetesting. Dette grunner ut i noe begrenset tilgang på materialer for tilvirkning. Sikkerheten mot brudd beregnes ut ifra dataene observert fra testen:

$$n = \frac{322N}{38.259N} \Leftrightarrow n = 8.42$$

Igjen viser dette til en god sikkerhet mot brudd. Selv om det er usikkerhet om disse testverdiene er representative som følge av manglende repetisjon, er det akseptabelt å anta at verdiene ikke avviker langt fra en median av testverdier denne konfigurasjonen ville vist. Likevel er det gode marginer for sikkerhet under prototypetesting. Det må her, som nevnt tidligere, tas i betraktning at soppen vil undergå dynamisk belastning og vibrasjoner.



Figur 5.28: Kraft som funksjon av nedbøying for stor sopp med nytt design

Figur 5.28 viser en grafisk gjenskapning av forholdet mellom kraft og nedbøying for stor sopp med nytt design. Kalkuleringene viser at dette er et svært mye stivere design:  $\frac{df_3}{dx} = 41.7$ . Til sammenlikning med liten sopp kan et relativt forhold mellom stivhetene i de forskjellige designene beregnes:

$$N_f = \frac{F_{maxS}}{F_{maxL}} = \frac{38.259}{12.752} = 3$$

og

$$N_d = \frac{df_3}{df_2} = \frac{41.7}{13.3} = 3.14$$

Ettersom  $N_f \approx N_d$  ser vi at designet på soppene gir omtrent samme defleksjon ved maksimal påført kraft. Den observerte lineæriteten i det aktuelle kraftintervallet tilsier at den relative defleksjonen mellom de to soppene er tilnærmet lik.

Videre ble defleksjon ved aktuell last undersøkt nærmere for sammenlikning av teoretiske beregninger. Det vil si at den aktuelle soppen innspennes i materialstrekkmaskinen og påført sin tenkt maksimale brukslast, henholdsvis  $38.259N$  (testet ved  $38.91N$ ) for den store soppen og  $12.752N$  (testet ved  $12.97N$ ) for den lille. 5 uavhengige tester ble kjørt på hvert testobjekt, og snittet for defleksjon ble utregnet:

Den store soppen viste en gjennomsnittelig defleksjon på  $1.06mm$ , den lille viste en gjennomsnittelig defleksjon på  $0.912$ . Dette stemmer greit med beregningene gjort i seksjon 4.1 og 4.2.

### 5.6.6 Konklusjon

Med tanke på at testens formål i hovedsak er å kontrollere at akrylsoppene kan brukes til prototypetesting på en sikker måte, kan det bekreftes. Empiriske data har visse avvik med teoretiske beregninger og FEM-analyser, men sikkerheten mot brudd ved aktuell last er såpass stor at det ikke er grunn til å stanse testing. Dette gjelder for begge størrelsene. Det gjøres imidlertid oppmerksom på følgende:

- Feil som følge av tilvirkningsskader har stor innvirkning på soppens integritet. Små skader, sprekker, riper og liknende svekker soppens styrke vesentlig. Før testing må soppen inspiseres visuelt for skader. Hovedsaklig

er det skader i soppens spenningside som bidrar til brudd, så innspenning må skje slik at siden med mest skader representerer trykksiden. Fremtidig bruk av akryl som materiale for soppene må vurderes. Forekomst av skader i komponentene som følge av tilvirkning må tas med videre i vurderingen om bruk av laserkutter er riktig tilvirkningsmetode. Eventuelt om det er behov for tiltak for å forbedre integriteten til komponentene ved f.eks. knekking av kanter, pussing og polering.

- Forspenning av skruer skal ikke overdrives. Så lenge komponenten sitter fast er det ikke grunn til videre stramming av skruene ettersom dette medfører ekstra spenninger i soppen. Ved testing over lengre perioder må skruene regelmessig inspiseres i tilfelle induuerte vibrasjoner medfører at de løsner.
- Akrylkomponenter som går til brudd medfører at det løsner mindre splinter som oppnår store hastigheter. Ved bruk av akrylkomponenter som utsettes for krefter i den grad brudd er en fare må passende verneutstyr anvendes.
- Defleksjon i soppene er i stor grad proporsjonal med kraften. Denne defleksjonen representerer en kilde til målefeil, men er såpass liten ved den aktuelle kraften at den kan neglisjeres for prototypetesting. For endelig tenkt design må denne målefeilen vurderes opp mot kompleksiteten det innebærer å endre design.

For prototypetesting er det uproblematisk å anvende akrylsoppene i sitt nåværende design, men det anbefales at en visuell inspeksjon av soppen gjennomføres i forkant av testing. Ved korrekt bruk av soppene er det ingen fare for brudd. Med tanke på at soppene burde kunne brukes over lengre perioder og dermed mange spenningscykluser bør aluminium være det endelige materialet.

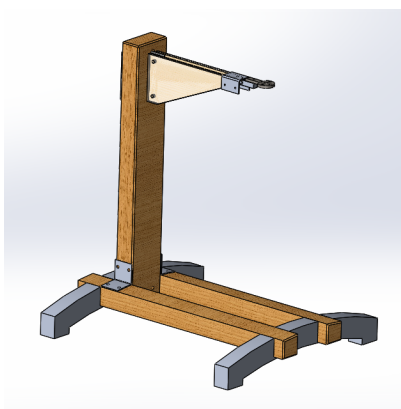
## 5.7 Prototype konstruksjon

Konstruksjon av prototype ble utført i henhold til verifisering/validering, men mer essensielt som et førsteinntrykk. Her menes et førsteinntrykk for kunden, FFI. Det må understrekes at det kun er et førsteinntrykk, ettersom prototypen bare representerer essensen av måleriggen og dens funksjoner. Mindre funksjoner og andre egenskaper er ikke tatt med. Målet med prototypen er todelt:

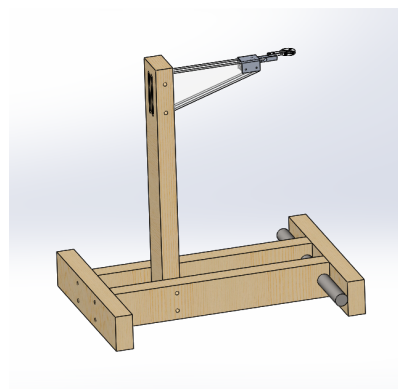
- 1. Validering. Bygger vi det riktige produktet? Prototypen representerer en materialisering av kravspesifikasjonen utarbeidet og godkjent av kunden. Ved demonstrasjon av en funksjonell modell vil det kunne bekreftes hvorvidt vi har tolket kundens krav korrekt og er på sporet til å lage et produkt i henhold til kundens ønsker.
- 2. Testing. Prototypen åpner muligheter for gjennomføring av mange tester spesifisert i testspesifikasjon. Tatt i betraktning at noen tilleggsfunksjoner er utelatt fra prototypen så vil ikke alle funksjonelle tester la seg gjennomføre. Likevel kan en vesentlig del av kravene kunne testes og vi vil verifisere til en viss grad at vi bygger produktet riktig.

### 5.7.1 Generelt om prototypen

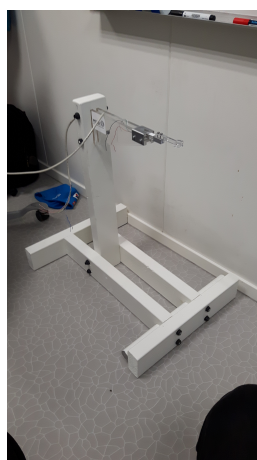
Det ble utarbeidet en 3D-modell av måleriggen i henhold til konseptevaluering. Denne modellen representerte et initielt design og inneholdt derfor ikke alle funksjonene nødvendig for å oppfylle samtlige krav, men representerte et godt billedlig verktøy på hvordan måleriggen skulle utvikles videre. Denne modellen ble ytterligere modifisert for konstruksjon av prototype. Fokuset på funksjon og validering medførte at aspekter som estetikk og dimensjonering i større grad ble neglisjert i forhold til tenkt ferdig produkt. Det ble også ilagt vekt på at konstruksjon av prototypen ikke skulle være en tidkrevende prosess.



(a) Initielt design



(b) Prototype design



(c) Prototype konstruert

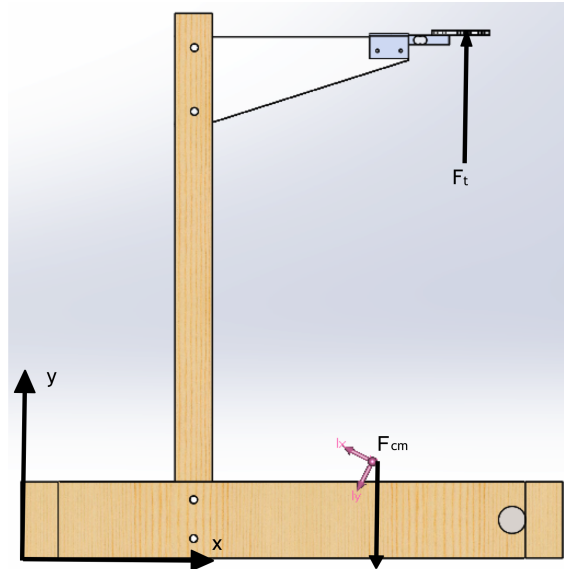
Figur 5.29: Prototype

Som figuren (5.29) viser kommer det tydelig frem hvordan prototypen (c) avviker fra originalt design (a). Fokuset på funksjon og tidsbruk ved konstruksjon har gått på bekostning av estetikk. Det gjøres oppmerksom på at i konseptevalueringen er estetikk vektet relativt lavt. Likevel er det noen estetiske trekk i det initielle designet. Selv om det er irrelevant for funksjonell testing av motorer og rotorbidrar utseende, om enn ubevisst, til et bedre helhetlig inntrykk av riggen. Det estetiske aspektet er balansert hårfint mot hvor mye ekstra tid det representerer ved konstruksjon.

I tillegg til en kraftig reduksjon av estetikk har også prototypen andre spesifikke avviker fra det initielle designet. Den vertikale bjelken er flyttet noe mer frem for å få plass til montering av elektriske komponenter på baksiden. Brakettene i bunn av den vertikale bjelken er ikke tatt med. Disse brakettene tjener konstruksjonen med hovedsaklig tre ting, avstiving, vinkling og økt robusthet av stammen. Av dette medfører det at prototypen ikke har representativ stivhet og nøyaktighet, i tillegg til litt svakere konstruksjon, dog tilstrekkelig for dens formål.

Initielt var de transverse bjelkene erstattet av stålbjelker i prototypedesignet. Dette trekket er antagelig det beste eksempelet på hvor estetikk har viket for funksjonalitet/tidsbruk. Stålblatene konstituerer over 75% av massen til prototypen og gir riggen et lavt massesentrum. Grunnet manglende tilgang på materialer ble disse igjen fjernet og erstattet med  $48 \times 98\text{mm}$  bjelker ( $2 \times 4''$ ). En beregning med overslag av modellen med stålblater viste at riggen hadde en god sikkerhet mot velting. Den reduserte massen i bunn av riggen reduserte denne veltesikkerheten til et uakseptabelt nivå. Dette ble løst ved å implementere en massiv stålsylinder





Figur 5.30: Beregning av massesentrum og sikkerhet mot velt

som vises nede til høyre på figur 5.30. Nye kalkuleringer ble gjort.

La origo være nederst til venstre. Dette punktet representerer omdreingspunkt ved tipping. Påført en skyvekraft  $F_t$  opp fra innfesting vil gi riggen et moment om origo. Positiv retning er definert med klokka. Massesentrum er 452mm fra origo i x-retning (mot høyre).  $F_t$  sin angrepslinje er 583mm fra origo i x-retning. Ettersom  $F_{cm} = 9,81m s^{-2} \times 8.95kg = 87.8N$  blir kraftligningen som følger:

$$\Sigma M_0 = 0 \Leftrightarrow F_{cm} \times 452mm - F_t \times 583mm = 0$$

Løst for  $F_t$  gir:

$$F_t = \frac{F_{cm} \times 452mm}{583mm} \Leftrightarrow F_t = 68.1N$$

Det vil si at riggen vil tippe om det monteres en rotor/motor som kan yte 68.1N skyvekraft. I kravspesifikasjonen er det satt en øvre grense på 17" rotor. Denne yter maksimalt  $F_{max} 38.26N$ . Det gir en sikkerhet N mot velting:

$$N_{tilt} = \frac{F_t}{F_{max}} \Leftrightarrow N_{tilt} = 1.78$$

Dette er tilfredstillende sikkerhet mot velting for prototypen. Noe øking er tiltenkt endelig produkt for å begrense risikoen for materiell/personskade.

Akrylplatene som bærer lastcellen og tar opp spenningene fra skyvekraften, er opprinnelig planlagt med et lag finèr på innsiden hvor MERA-logoen skulle graves. Den geometriske formen på platene var opprinnelig beregnet slik at spenningen induisert fra skyvekraft var konstant langs hele platens lengde. I prototypen er finèr-platene fjernet og geometrien har noe avvik. Dimensjoneringen er likvel grei. Innfestingen av motor til målerigg via braketter kjent som *Sopp* er tenkt tilvirket i maskinert metall. Dette er derimot svært tidkrevende m.t.p prototypens formål, så disse er kuttet ut av akryl med laserkutter. Laserkutteren har en svært god nøyaktighet, hvilket medfører at geometrien av soppen vil være lik det initielle designet og gi god målenøyaktighet. Godstykkelsen er noe større i henhold til lavere tillatt spenning i akryl kontra metall. Dette oppsummerer hovedsaklig avvikene fra initielt design og prototype-design. Den reelle prototypen har ytterligere avvik som figur 5.29 antyder, men ikke noe nevneverdig med tanke på funksjonalitet. I modellen er det ikke tatt med bolter, skiver, muttere eller kabler med terminaler. Den er i tillegg malt hvit.

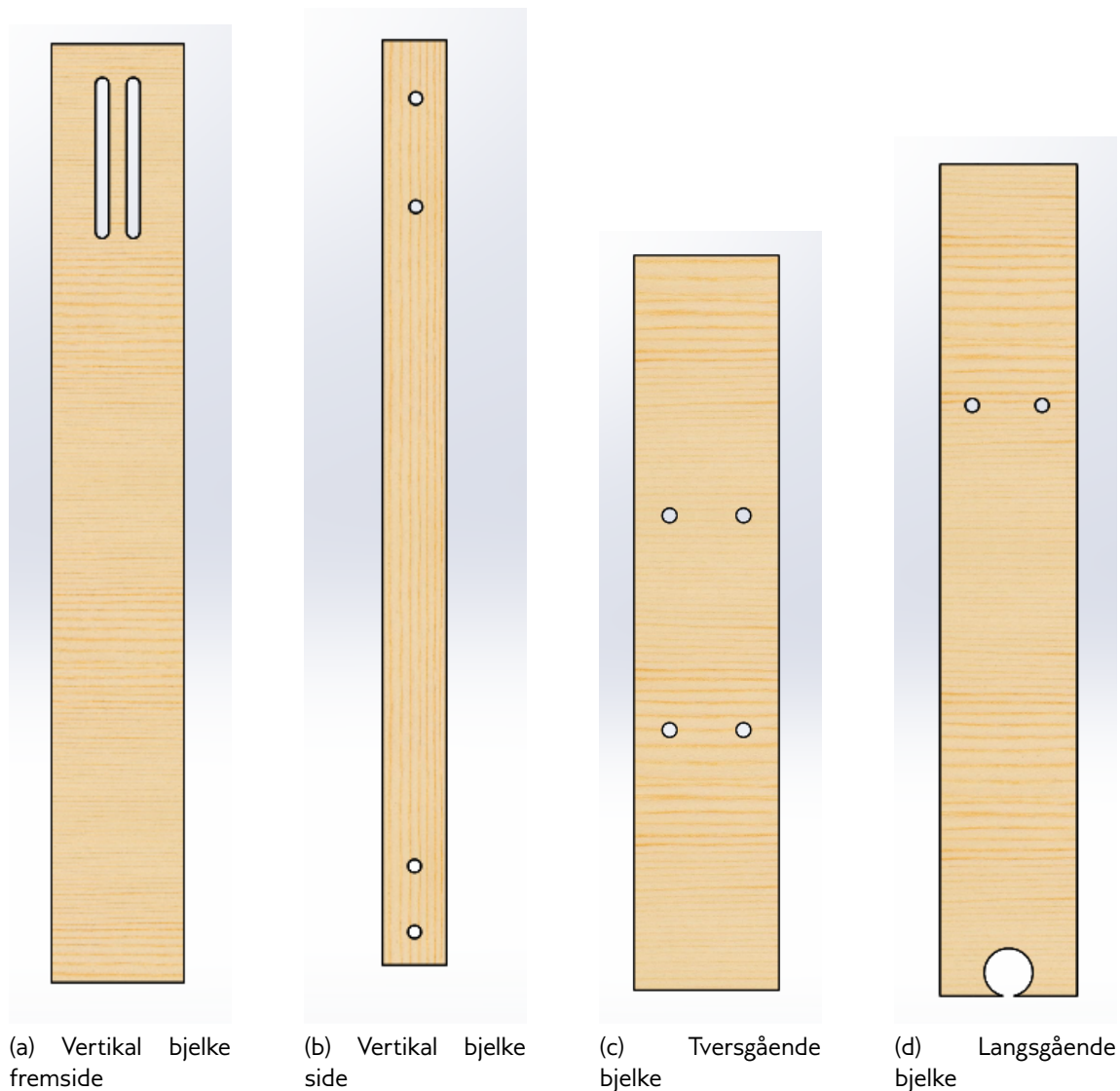
## 5.7.2 Tilvirkning

Under følger en enkel beskrivelse av tilvirkningsprosessen til prototypens deler. I grove hovedtrekk ble alle komponenter av tre fullført først og deretter rammeverket ferdigstilt. Av festemidler til rammeverket er det benyttet M10 gjengestag med tilhørende skiver og muttere. Disse er kappet til passende lengde og muttere er senere ikledd plast. Det er naturlig å dele prototypen i to hovedbestanddeler: Rammeverket og sensormodul.

### Rammeverk

Bjelkene som konstituerer rammeverket er  $98\text{mm} \times 48\text{mm}$  trebjelker kappet i forskjellig lengder i henhold til designet. Hovedsaklig består rammeverket av to langsgående horisontale bjelker med tverrgående bjelker montert på endene. Selve målesensoren er montert inn i rammeverket via en vertikal bjelke som løfter

innfestingen 530mm over det nedre rammeverket. Denne høyden samsvarer med *Ground-effect* fra rotoren.

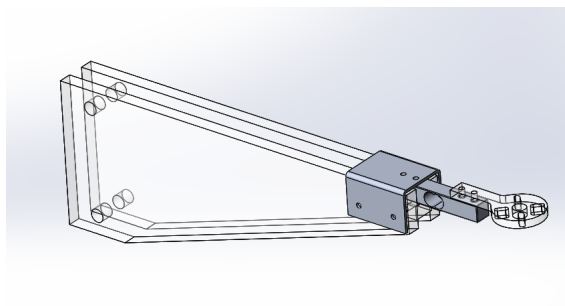


Figur 5.31: Rammeverk

Ved tilvirkning av slisser på vertikalbjelken (Fig. 5.31a) er det først boret et 10mm hull, deretter ble resterende gods fjernet ved stikksag. Akrylplatene som tar opp spenningen fra lastcellene innsperres i slissene og skrues fast med M10 gjengestag/muttere via hullene i toppen av siden på den vertikale bjelken (Fig. 5.31b). I bunn av den vertikale bjelken er det to hull for fiksering til det nedre rammeverket. Disse korresponderer med M10 hullparet i øvre del av den langsgående bjelken (Fig 5.31d). I denne bjelken er det boret ut et 35mm hull i den ene enden for å montere stålsylindren. Den tres inn i transvers retning og

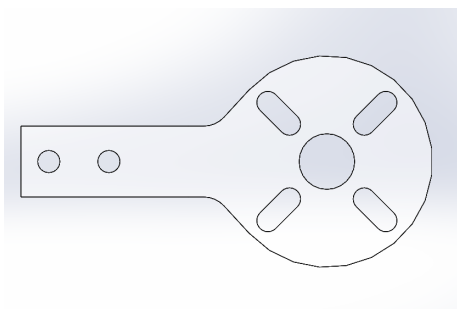
sentreres før de tversgående bjelkene (Fig 5.31c) innfestes og låser stålsylindren på plass.

### Sensormodulen

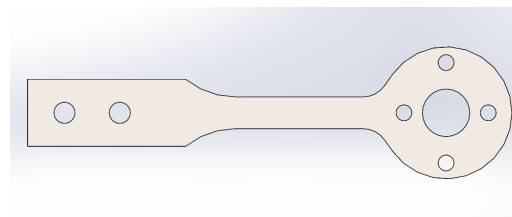


Figur 5.32: Sensormodul prototype

Denne modulen representerer essensen av måleriggen og ble derav tildelt mer tid under konstruksjon. Sensormodulen har større krav til nøyaktighet enn rammeverket i den forstand, hvilket resulterte i svært ulike tilvirkningsmetoder, selv for prototypen.



(a) Sopp e600/800/1200



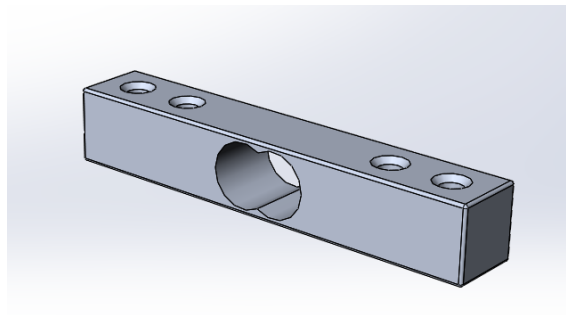
(b) Sopp e305/310/Snail

Figur 5.33: Soppene

Brakettene (Fig 5.33a og 5.33b), kalt *sopper*, tjener som innfestingen for de forskjellige motorene som skal testes. De kommer i to forskjellige konfigurasjoner av designmessige grunner; ettersom størrelsen på motorene og skyvekraften de yter øker med størrelsen har vi delt de inn i to konfigurasjoner. Sopp (5.33a) støtter motorene DJI e600, e800 og e1200. Sopp (5.33b) støtter DJI e305 e310 og Snail. Den lille soppen har et tynnere og lengre skaft for å

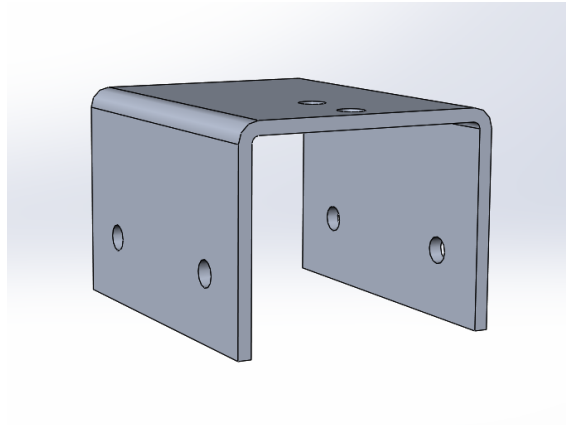
redusere *ground-effect* ved måling. Selve motorinnfesting vil kunne gjøres relativt effektivt ved begge konfigurasjonene ettersom hullene er nøyaktig tilpasset sine respektive motorklasser. For prototypen er disse skåret ut i akryl med laserkutter. Godstykkelsen er 10mm for begge *soppene*. Denne designavgjørelsen ble tatt ettersom det per konstruksjonsdato ikke var andre aktuelle alternativer tilgjengelig med tanke på tidseffektivitet. Styrkeberegning av soppene vil avgjøre hvilke motorer som er forsvarlig å teste i prototypen, i tillegg til om sikkerhetsfaktoren er akseptabel å operere med og om redesign er nødvendig. Ved endelig design er disse alternativt tiltenkt i frest aluminium.

Soppene er fastspent i en lastcelle som registrerer last ved forlengelse av sin geometri. Denne er innkjøpt og har en maksimal øvre last på 5 kg. For mer spesifikk informasjon refereres det til kapittel om lastcelle.



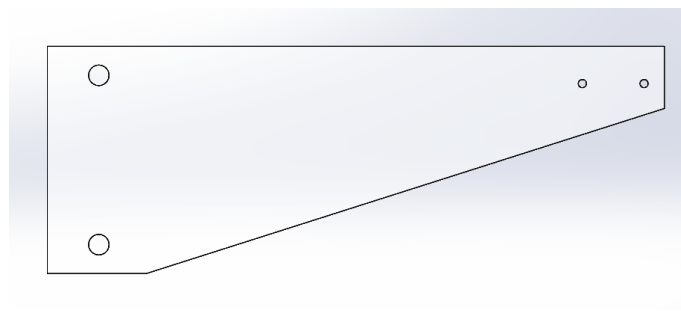
Figur 5.34: Lastcelle

Enden av skaftet på soppen festes i tilhørende hull på enden av lastcellen (Fig. 5.34) med M4 maskinskruer. Festing av lastcellen til riggen forøvrig gjøres via M4 maskinskruer på motsatt ende til tilhørende aluminiumsbrakett.



Figur 5.35: Aluminiumsbrakett for fiksering av lastcelle

Aluminiumsbraketten (Fig. 5.35) med godstykkelse 2mm er opprinnelig kappet med platesaks og hullene boret i forkant av knekking. Den er så i to omganger knekt til en passende kanal-profil. Braketten sørger for god fiksering av lastcellen og bidrar til stivhet i konstruksjonen. Den er dimensjonert slik at lastcellen ikke kommer i kontakt med andre komponenter enn braketten. Dette for å unngå uforutsette målefeil ved testing av motorer/rotorer, i tillegg til at utskifting av lastcelle kan gjøres effektivt. To M4-hull på nedre del av flensene sørger for god fiksering av braketten til akrylplatene, med en ekstra foring i mellom for ytterligere avstiving.



Figur 5.36: Akrylplaten

Akrylplatene er komponenten som binder sammen sensormodulen med rammeverket. Hele konfigurasjonen er skåret ut i 10mm akryl. Opprinnelig design var kalkulert slik at ved maksimal skyvekraft fra 17" rotor (  $38.26N$  ) ville gi en konstant bøyespenning langs akrylplatens lengderetning. Denne bøyespenningen var kalkulert med en god sikkerhetsmargin. Prototypen avviker noe fra det opprinnelige designet, uten at sikkerhetsfaktoren reduserte seg til

uakseptable verdier. Akrylplatene er montert i par. I tillegg til økt robusthet vil denne konfigurasjonen sørge for økt nøyaktighet og stivhet i sensormodulen. Dette tjener også til en god rute for trekking av signalkabler, ettersom de kan trekkes relativt lite sjenerende i tomrommet mellom akrylplatene.

Dette oppsummerer komponentene i prototypen, deres tilvirkning og montering.

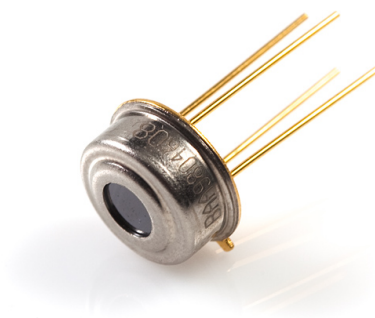


## 5.8 Sensorarm

I henhold til krav K8.1 og K9.1 er det implementert to ekstra sensorer i måleriggen. Kravene sier at riggen skal måle motortemperatur og motorens omdreiningshastighet (RPM). Det medfører en sensor for måling av omdreiningshastighet og en for måling av motorens utvendige temperatur. De to sensorene som er valgt fungerer best når de er relativt nær motoren som måles. Dette er en utfordring ettersom det er vesentlige forskjell i dimensjonene til forskjellige motorer. For eksempel er 3D-robotics motoren 27mm i diameter mot MT 4006 Antigravity's diameter på 44mm. I tillegg varierer også høyden mellom de forskjellige motorene. Dette tilsier at fiksturet for sensorene må ha noen frihetsgrader for bevegelse for å kunne benytte sensorene på best mulig måte. Forøvrig er også brukervennlighet og funksjonalitet røde tråder for denne komponenten.

### 5.8.1 Kort om sensorene

#### Temperatur

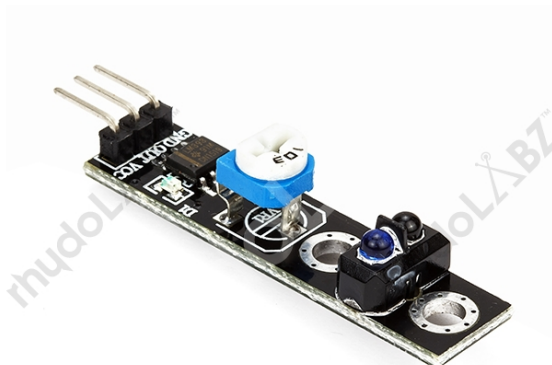


Figur 5.37: Infrarød temperatursensor, *Infrared Thermometer - MLX90614 Sparkfun.com 2017*[6]

Overvåking av motorens temperatur er viktig ettersom overoppheting kan resultere i kritisk svikt i motor, brann og havari av multikopteret. Det er

derimot litt problematisk å feste et termometer direkte på motorens overflate. Selv om det er plass vil det være vanskelig å koble opp sensoren ettersom flaten som skal overvåkes roterer. En trådløs sensor festet på motorens overflate egner seg heller ikke da eksentrisiteten som sensorens egenvekt skaper medfører kraftig reduksjon i stabiliteten til systemet og vibrasjoner. I tillegg ville dette vært lite brukervennlig ettersom sensoren måtte monteres og demonteres for hver motor. Løsningen er å anvende en sensor som kan måle temperatur uten å være i kontakt med overflaten. Derfor er det valgt å bruke en sensor som avgjør temperatur ved hjelp av infrarød stråling. Sensoren oppgir snittemperaturen av alle objektene den mottar infrarød stråling fra. Det tilsier at den må kunne siktes inn såpass nøye at den kun mottar IR-stråling fra motoren.

## RPM



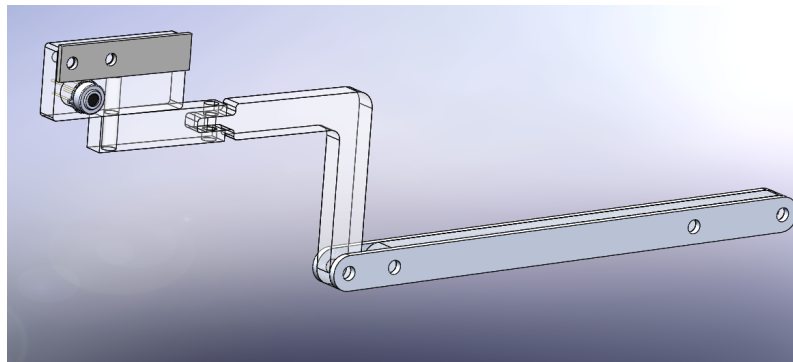
Figur 5.38: Infrarød refleksjonssensor, *rhydolabz.com 2017*

Ved måling av motorens RPM oppstår flere av de samme problemene som ved temperaturmåling. Den kan heller ikke festes på motorens overflate. Løsningen er igjen å anvende en sensor som bruker infrarød stråling for å måle RPM. I korte trekk er sensorens virkningsmekanisme å oppdage reflektert stråling fra en overflate. I motsetning til temperatursensoren så genererer RPM-sensoren eget infrarødt lys mot motorens overflate. Ved å gjøre motorens overflate delvis hvit og svart vil mengden reflektert lys variere. Dette oppnås enkelt ved bruk av hvit tape. Frekvensen for hver gang mengden reflektert lys gjør et sprang vil representere motorens omdreiningfrekvens. En enkel omregning konverterer denne verdien til RPM. I likhet med temperatursensoren betyr dette også at RPM-sensoren må siktes nøye inn mot motorens overflate for optimal måling.

Begge sensorene er beskrevet i kapittel om sensorer.

## 5.8.2 Design og tilvirkning

Fiksturet som skal bære sensorene har et par kriterier til design. I tillegg til overnevnte egenskaper for frihet til bevegelse må det også passes på at komponentene ikke forstyrrer måling forøvrig. Sensorarmen må ikke fungere som en avstiver mellom lastcellen/soppen og resten av sensormodulen da dette medfører målefeil for løftekraft og eventuell yaw. Samtidig må sensorarmen designes slik at den ikke forstyrrer luftstrømmen fra rotoren og bidrar med økt ground-effect i stor grad.



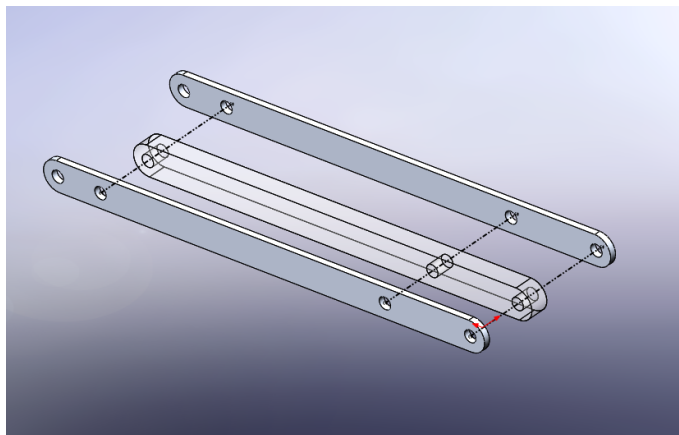
Figur 5.39: Sensorarmen i sin helhet

Figur 5.39 viser designet for sensorarmen. Den monteres direkte til sensormodulen via to M4 skruehull helt til høyre på figuren. På denne måten er den helt uavhengig av både lastcellen og soppen. Sensorarmen består av fire komponenter i tillegg til festemidler og selve sensorene.

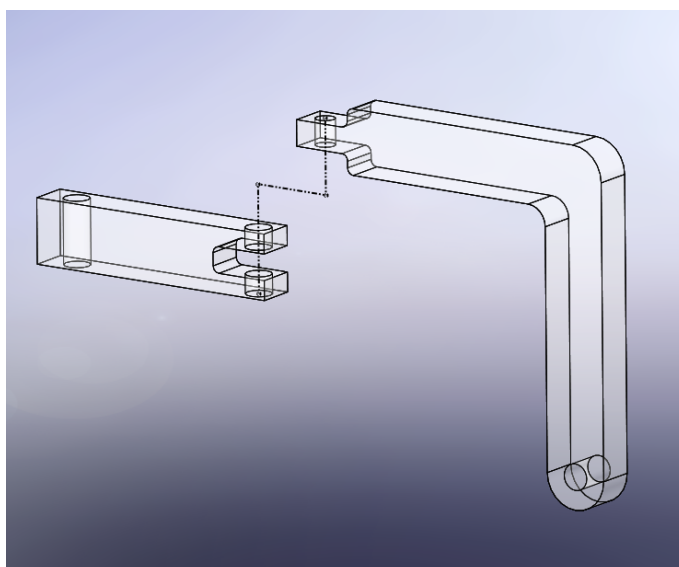
Figur 5.40 viser oppbygningen og monteringen av den horisontale bæreammen til sensorarmen. Denne fikses til sensormodulen uten noen grader av bevegelse. Den består av en akrylkjerne mellom to aluminiumsplater. Akrylkjernen har en godstykkelse på  $6\text{mm}$  og er skåret ut med laserkutter. Dette er en svært hurtig tilvirkningsteknikk som produserer en ferdig komponent, men som nevnt i kapittel om destruktiv testing har det visse bakdeler. Akryl er ikke veldig sterkt relativt til dimensjonen, i tillegg til at laserkuttingen gir små skader som følge av ekstra smelting. Bæreammen er derfor forsterket med aluminiumsplater på hver side. Med en godstykkelse på  $2\text{mm}$  bidrar de til nok styrke for armen. De

virker også som innfesting for neste komponent via M4-hullet til venstre på figuren. Aluminiumsplatene ble kappet til passende dimensjon med platesaksmaskin. Hullene er boret ut ved søylebor og endene ble avrundet ved bruk av vinkelsliper og roterende slipemaskin.

Fra bæreammen monteres det en vinkelarm via M3-hullet i nedre høyre hjørne på figur 5.41 og skruetullet øverst til venstre på figur 5.40. Ved å kun benytte én skrue vil armen kunne rotere rundt dette punktet. Denne frihetsgraden for bevegelse er sensorarmens mekanisme for justering av høyde. Videre er den

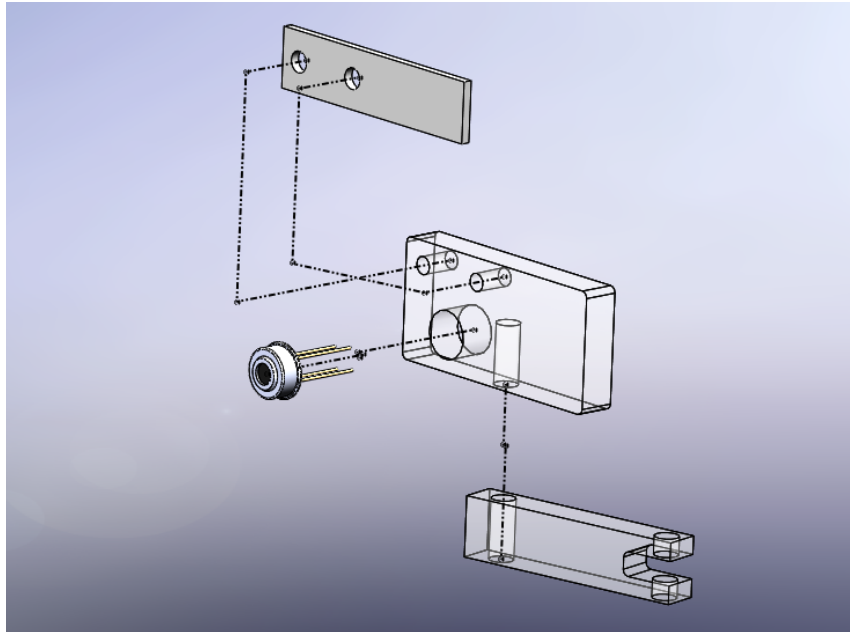


Figur 5.40: Horisontal bæream



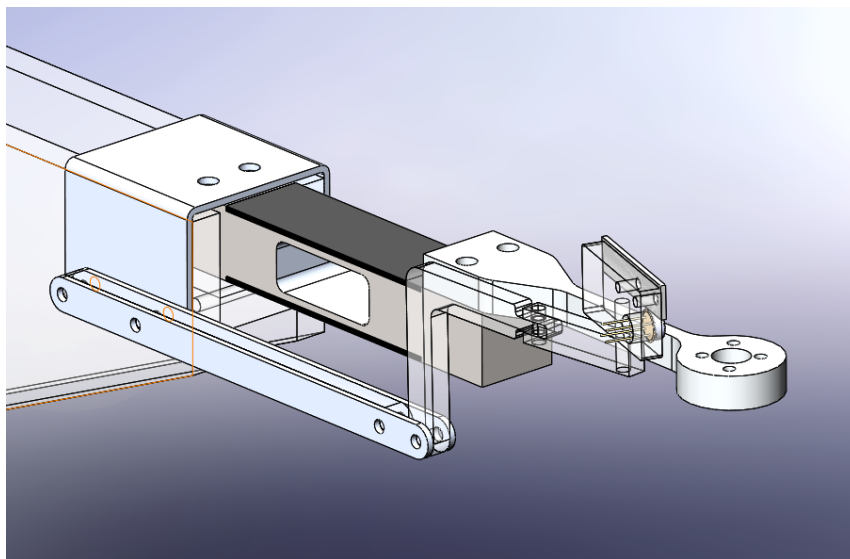
Figur 5.41: Vinkelarm med ledd

montert til en mindre horisontal arm via en han/hun-konfigurasjon med et M3 skruehull slik figuren viser. Sammen utgjør de et ledd og muliggjør optimalisering for sensorene ved måling av motorer med forskjellig diameter. Begge komponentene er tilvirket med laserkutter og hullene er boret med presisjonsbor.



Figur 5.42: Sensorbrakett

Siste komponent består av en sensorbrakett hvor de to aktuelle sensorene monteres. Som overnevnte komponenter er denne også tilvirket via laserkutter. Braketten monteres til vinkelarmen via en gjennomgående M3 skruer og et kulelager. Kulelageret bidrar til enkel rotasjon mellom vinkelarmen og sensorbraketten. Dette muliggjør ytterligere justering for å la sensorene peke normalt på motorens overflate. Sensorene festes til braketten via passende hull. RPM-sensoren (forenklet på figur 5.42) monteres via to skruer. Temperatursensoren limes direkte på sensorbraketten. Terminering av sensorene til signalkabler foregår på begge sider av sensorbraketten og føres videre tilbake langs sensorarmen. De tilpasses slik at det er nok slakk over leddene for å unngå strekk og ledningsbrudd.



Figur 5.43: Sensorarmen montert til sensormodul

Figur 5.43 viser sensorarmen i sin helhet montert på sensormodulen. Med sine grader av frihet for bevegelse kan den justeres for å passe til alle motorene spesifisert for måleriggen. For brukervennlighet er det brukt mutterforlenger i alle ledd. Dette gjør det enkelt å stramme og løsne for justeringer. Vinkelarmen og sensorbraketten kan enkelt foldes inn under bærearman når den ikke er i bruk eller ved behov for bytte av motor.

## 5.9 Variabel pitch

Variabel pitch er en mekanisme som tillater hvert rotorblad å rotere om sin egen lengdeakse. Denne funksjonen er brukt mye i både fly og skipsindustrien ettersom propeller med variabel pitch har flere ønskelige egenskaper relativt til propeller og rotorer med fast pitch. Eksempelvis gir variabel pitch mulighet for fartøyet å endre retningen på skyvekraften uten behov for å endre omdreiningretning på motor eller ved bruk av en girkasse. En annen egenskap er at rotoren kan oppnå tilnærmet konstant virkningsgrad over et hastighetsintervall. Variabel pitch mekanisme gir også bedre akselerasjon, retardasjon og respons generelt. For multikoptere gir variabel pitch en annen viktig egenskap: sentralisert kraftforsyning. Skyvekraft justeres via variabel pitch og fjerner behov for å ha en motor per rotor. Dette representerer en vesentlig vektreduksjon for multikopteret og tillater lengre flytid.

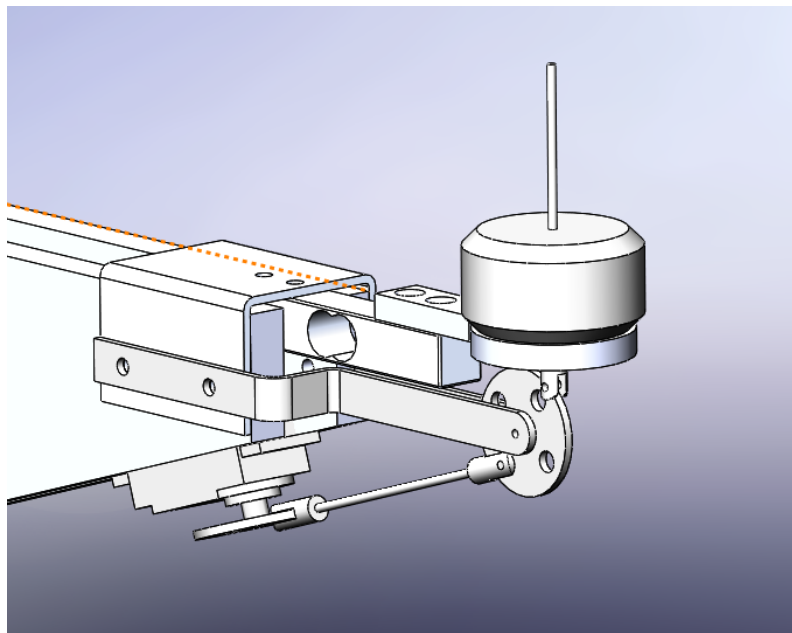
For multikoptere finnes det et mangfold av løsninger på systemer med variabel pitch. Det er svært få (om noen) standarder for disse systemene. Da multikoptere finnes i svært mange forskjellige design og størrelser kan det sies at det er like mange forskjellige løsninger for variabel pitch. Dette representerer en utfordring ved å lage en målerigg som skal utføre måling av rotorer med variabel pitch. Vi har derfor forsøkt å lage vår mekanisme så generell som mulig for å tillate et større spekter av løsninger uten omfattende ombygginger. Erfaring og undersøkelse viser at mange variabel pitch mekanismer generelt sett har de samme komponentene. Det er en servomotor som styrer en aksling gjennom motoren som skyver og trekker i et leddsystem koblet til rotoren. Det finnes andre mekanismer, men etter det vi har observert er systemet med servo/aksling mest utbredt og vi har designet vår rigg til en variant av dette.



### 5.9.1 Utvikling av konsepter

Dette avsnittet tar for seg prosessen av design-utviklingen. Under konseptforbedringsfasen ble det utviklet 7-8 forskjellige design, hvor endringene mellom designene varierte i omfang. De kan kortes ned til tre hovedkonsepter, hvor disse tre blir tatt for seg i dette avsnittet.

#### Konsept 1



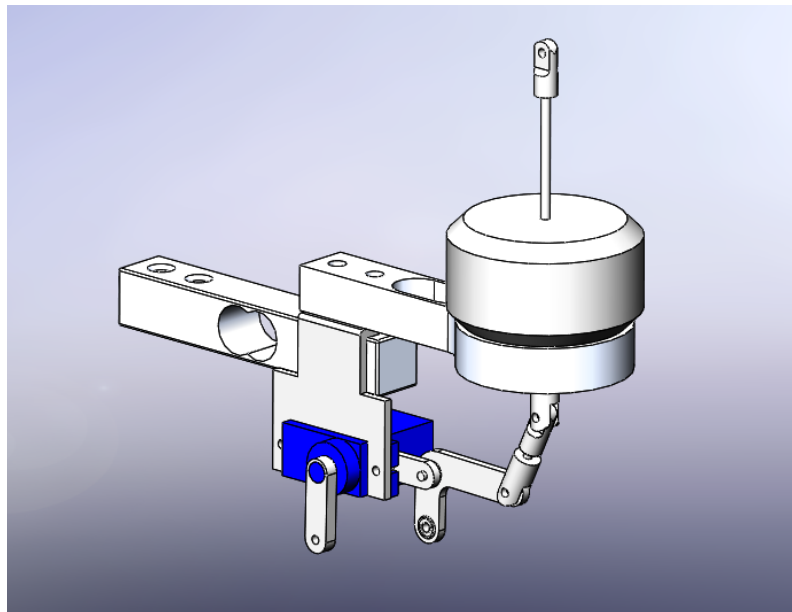
Figur 5.44: Konsept 1, MERA 2017

Figur 5.44 viser det første designet av variabel pitch mekanisme fra konseptforbedringsfasen. Det må noteres at både sopp og lastcelle er utdatert (byttet ut etter prototype) og motoren er kraftig forenklet. Mekanismen bygger på et system av akslinger, ledd og hjul, som kobler sammen rotorbladene og en servo. Servoen er plassert under braketten på tuppen av sensormodulen. Når servoen mottar signal fra styringsenheten vil den vri på hjulene og derav bevege akslingene opp og ned. Hjulene muliggjør overgangen fra rotasjonsbevegelse til translatorisk bevegelse i ønsket retning.

Det fremste hjulet (til høyre) er fiksert av to braketter som er festet til tuppen av sensormodulen. Disse brakettene viser seg å være problematisk med dette

designet av flere grunner. En grunn er at de kommer svært nær lastcellen. En mer vesentlig grunn til problematikk er at de vil stive av motor og sopp til sensormodulen. Det medfører at måling fra lastcellen ikke er pålitelig da det blir et meget mer komplisert spenningsbilde fra skyvekraften. Det blir ikke mulig å anslå hvor mye kraft som tas opp i lastcellen og hvor mye som tas opp i variabel pitch-mekanismen. Denne kilden til målefeil utgjorde hovedgrunnen til forkastelse av dette designet.

### Konsept 2



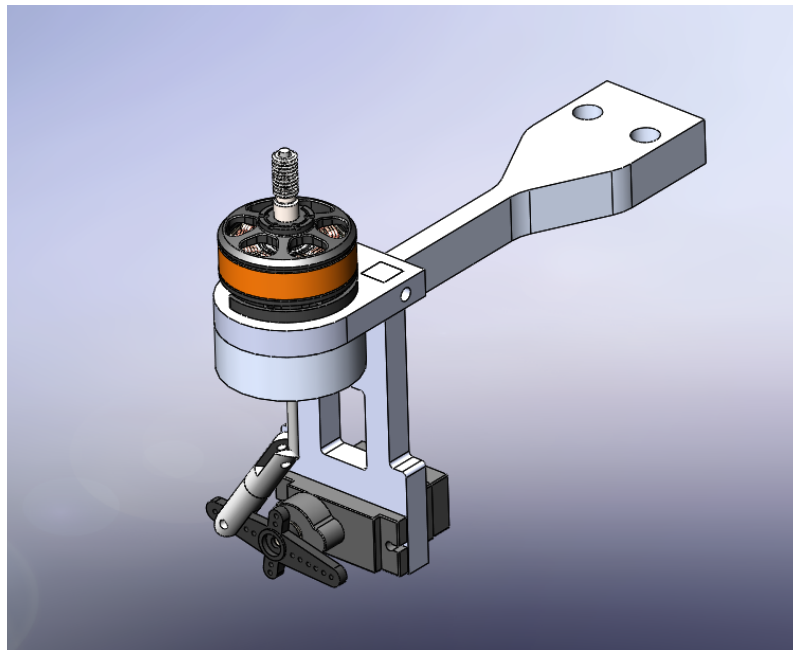
Figur 5.45: Konsept 2, MERA 2017

Figur 5.45 viser en iterasjon av variabel pitch mekanismen. Dette designet har flere likhetstrekk med konsept 5.44, hvor mekanismen i hovedtrekk fortsatt er et system av ledd og akslinger som styres av en servo. Endringen kommer ut fra hvor mekanismen er innspent. Fra figuren kommer det tydelig frem at servoen (blå farge) er festet i en brakett som er oppspent mellom lastcelle og sopp. Ved å posisjonere mekanismen her elimineres den avstivende effekten som var problemet i konsept 5.44.

Derimot hadde dette designet et par nye problemer. Generelt krever dette designet fler små komponenter. To ekstra hjullager og endeledd på akslingene

gjør designet mer komplekst og mindre brukervennlig. Bytte av motor vil ta vesentlig lengre tid. Parallelt med utviklingen av dette konseptet ble også ny sopp med YAW-funksjon utviklet. Som beskrevet i kapittelet om moment i innfesting har den nye soppen svært små toleranser for korrekt måling av YAW. Konsept 2 for variabel pitch vil ha en relativ avstiving mellom sopp og lastcelle. Denne avstivingen, selv om den er liten, vil forstyrre disse målingene. Av dette kunne det konkluderes med at konsept 2 også måtte forkastes.

### Konsept 3



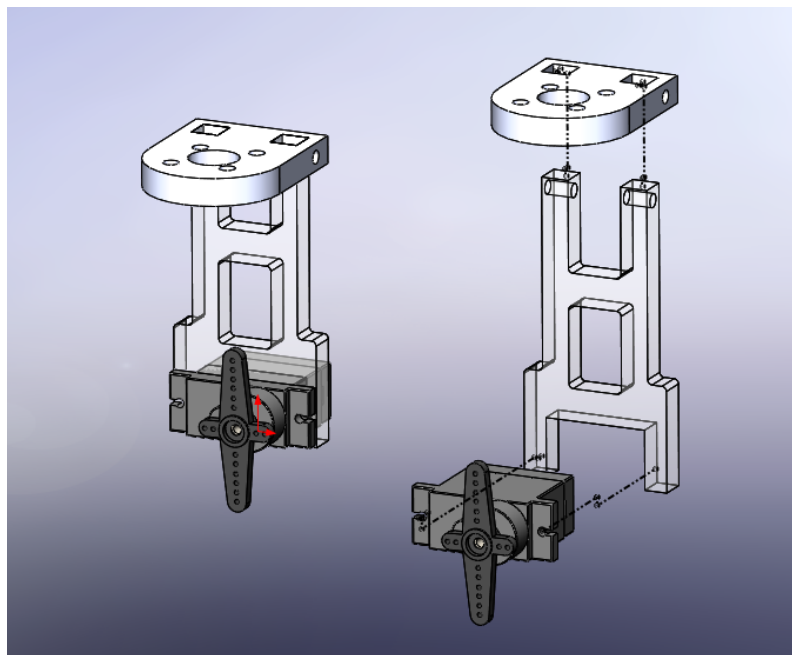
Figur 5.46: Konsept 3, MERA 2017

Figur 5.46 viser det endelige designet for variabel pitch mekanismen. Her kan figuren vise at konsept 3 er designet i henhold til den nye og endelige konfigurasjonen av sopp. Mekanismen er også forenklet vesentlig fra konsept 2. Fortsatt er det bygget på et system av aksling og ledd styrt av en servo, men hele mekanismen er flyttet frem til tuppen av soppen. På denne måten vil den ikke stive av og forstyrre for måling av løftekraft eller YAW. Vekten er også redusert. Med tanke på brukervennlighet har konsept 3 store forbedringer relativt til konsept 2. Dette kommer fra færre komponenter og et generelt enklere design. Dette konseptet ble valgt for videreutvikling, konstruksjon og

implementering.

## 5.9.2 Tilvirkning og konstruksjon

Designmessig var den største utfordringen å fikse servoen under motorinnfestingen på en måte som gjør bytte av motorer relativt brukervennlig. Det er ikke stort fokus på brukervennlighet generelt, men det tilstrebes der det lar seg gjøre. Krav K4.2 sier at bytte av motor skal kunne gjøres på under fem minutter. Dette er relativt god tid, men enklere design er fordelaktig generelt. Da soppen gjøres til en mer permanent komponent av måleriggen som følge av YAW-måling, måtte den standardiseres for alle motorene måleriggen er spesifisert for. Dette krevde at det ble designet innlegg mellom motor og sopp som fungerer som adapter mellom forskjellige innfestingskonfigurasjoner. Disse ble designet slik at de kan bære fiksturet til servoen.



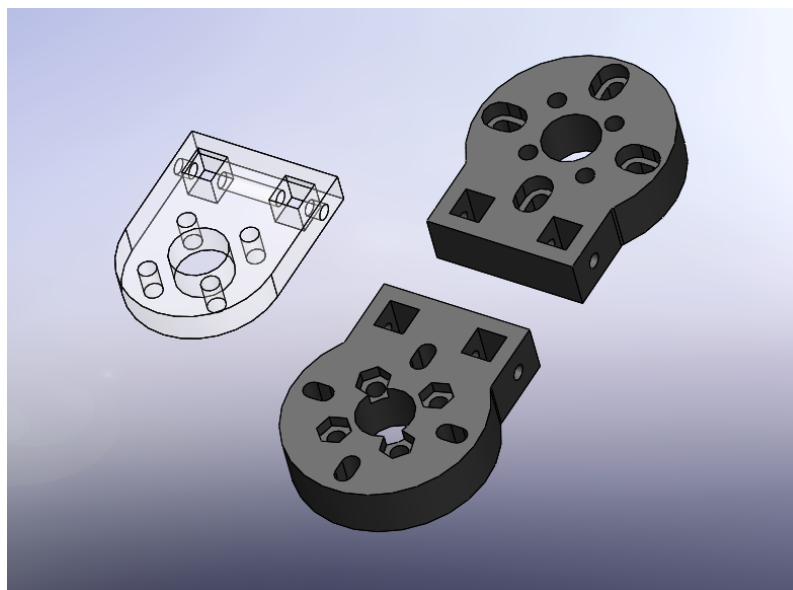
Figur 5.47: Servo fiksert til adapter, *MERA 2017*

Figur 5.47 viser hvordan servoen fikses til innlegget. På denne måten er servoen og dens fikstur uavhengig soppen og kan byttes relativt enkelt. For måling av konfigurasjoner uten variabel pitch kan fiksturet fjernes helt.

Innlegget på figur 5.47 (hvit) er for motorer med  $16 \times 19\text{mm}$  innfesting. Både innlegget og selve servofiksturet er laget av akryl og tilvirket ved laserkutting. For fiksturet er det forsøkt å gjøre det så lett som mulig for å ikke gi soppen for mye ekstra svingende masse. Servoen festes til fiksturet ved to M2 skruer med tilhørende muttere. Fiksturet festes til innlegget gjennom egnede firkantede hull og en gjennomgående M3 skrue på tvers. De firkantede hullene er designet med samme dimensjon som fiksturet for å unngå slakk og bevegelse. Det viste seg i ettertid at noe slakk oppstod. Testing av komponentene vil indikere om ekstra avstiving behøves.

### Innleggene

I forbindelse med at soppen utvikles til å bli en mer permanent del av måleriggen og ikke skal byttes ut for forskjellige motorer måtte det designes innlegg for å kunne støtte alle motorene som skal måles. Innleggene kommer i to varianter. En variant fungerer hovedsaklig som varmeskjold og har samme dimensjon på innfestingshullene som soppen. Den andre varianten fungerer både som varmeskjold og adapter fra soppens innfestingshull og innfestingshullene til motorer med  $25 \times 25\text{mm}$  og  $30 \times 30\text{mm}$ -hull.



Figur 5.48: Innlegg/adapter, MERA 2017

Ved måling av motorer med  $16 \times 19\text{mm}$  innfestingshull brukes akryl-innlegget til

venstre i figur 5.48. Med en godstykkelse på  $6\text{mm}$  og samme dimensjonering på hullene som soppen støtter den majoriteten av motorene som skal måles. Innlegget til høyre i figuren er adapteret for motorer med større dimensjoner på innfestingen. Dette designet er betraktelig mer komplisert. Undersiden (øverst høyre) festes til soppen via standard  $16 \times 19\text{mm}$ . Disse fire skruene går i permanent fiskerte muttere innfelt på innleggets overside. Videre festes motoren via de fire avlange hullene (slots) mot periferien av innlegget. Disse hullene er  $5\text{mm}$  lange og muliggjør montering av større motorer. Slotene er innfelt fra undersiden av innlegget for at skruehodene skal gå kant i kant med innleggets underside. Innfesting av servofiksturet er likt for begge innleggene. Denne komponenten er av ABS-plast og tilvirket via 3D-printer. Som følge av at 3D-printede komponenter har større geometriske unøyaktigheter måtte noe bearbeiding til for å få delene til å passe. Dette ble gjort manuelt med håndfil. På grunn av denne tilpasningen er det mindre slakk i innfestingene.

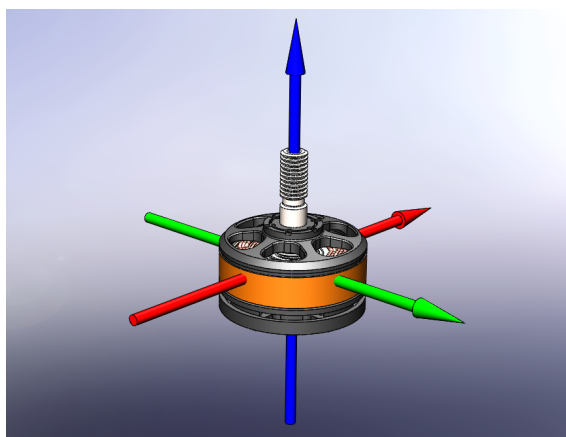
### 5.9.3 Konklusjon

Ved å implementere variabel pitch-mekanismen på måten som beskrevet i dette dokumentet mener vi at vi møter kravet om riggens mulighet for måling av konfigurasjoner med variabel pitch. Det er tilstrevet å gjøre systemet så generelt som mulig for å tillate forskjellige varianter av variabel pitch-systemer uten behov for omfattende ombygginger eller andre komponenter. Det har heller ikke vært noe behov for å inngå kompromisser med andre krav ved realiseringen av denne funksjonen.

## 5.10 Moment i innfestning

Etter et veiledermøte i starten av mars 2017 ble det diskutert et ønske fra kunden om å kunne måle YAW i måleriggen. Som følge av dette ble det formulert og lagt til to krav med tilhørende V&V-tester. Begge kravene ble prioritert som C-krav, det vil si den laveste prioriteringen. (For ytterligere informasjon om kravet: se K7.1 og K7.2 i kravspesifikasjonen, samt T7.1 og T7.2 i testspesifikasjonen.) Et krav var å måle *steady-state*-moment og det andre var måling av *tregghetsmoment*. For videre diskusjon er det fornuftig med en generell beskrivelse av YAW i multikoptere.

### 5.10.1 Generelt om YAW



Figur 5.49: Eksempelmotor i et koordinatsystem

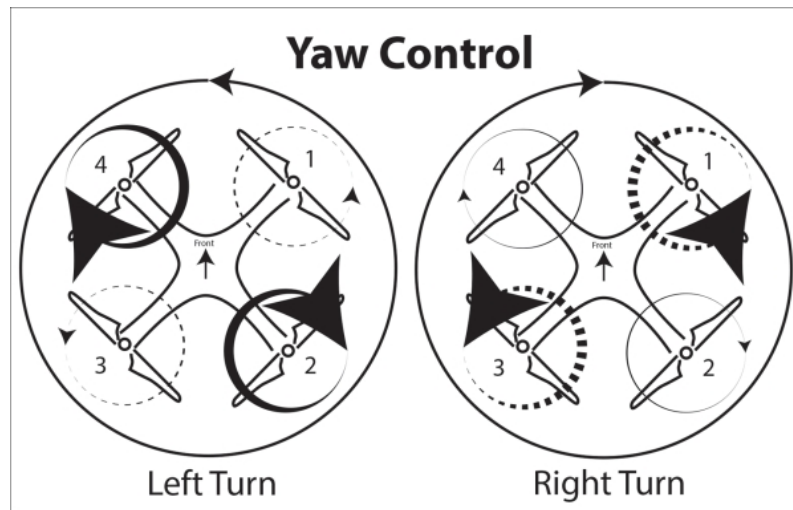
Figur 5.49 viser et eksempel på en multikoptermotor med et koordinatsystem. La grønn og rød akse representere basis for XY-plan og blå akse representere Z-retning. Når motorer som denne monteres med en rotor som roterer induseres det moment i systemet. Så lenge rotoren har en rotasjonshastighet relativ til resten av systemet som ikke er null vil det oppstå moment i systemet. Dette momentet kan klassifiseres i to kategorier: *Steady-state* og *inertia*. *Steady-state* moment er det momentet som induseres ved konstant rotasjonshastighet. Det vil si at for hver rotor finnes det et konstant moment for konstant rotasjonshastighet. *Inertia*, eller *tregghetsmoment* er derimot momentet som induseres ved *endring* av rotasjonshastigheten. Dette momentet kan potensielt bli mye større i forhold til *steady-state* momentet, og særlig ved

plutselig retardasjon av rotorene. Inertia kan beskrives som

$$M = I \frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2}$$

Hvor  $M$  er momentet,  $I$  er legemets motstand mot rotasjon og  $\theta$  er rotasjonsvinkelen. Med andre ord så er treghetsmomentet proporsjonalt med vinkelakselerasjonen.

Felles for begge er imidlertid at de har omdreining rundt Z-aksen, og det er dette momentet som menes med YAW. For multikoptere kan YAW brukes til å rotere systemet i manøvrerings-sammenheng. Dette er kontrollert anvendelse av YAW.



Figur 5.50: Skjematisk fremstilling av YAW ved manøvrering [7]

Et typisk multikopter med fire rotorer benytter YAW til å rotere om sin egen akse slik figur 5.50 viser. Rotorene er orientert slik at de parvis roterer motsatt vei og slik eliminerer hverandres YAW. Det er tilfellet når rotor-parene har samme dimensjon, pitch og rotasjonshastighet. For å få systemet til å rotere rundt sin egen akse må et moment induseres. Dette gjøres ved å manipulere den relative rotasjonshastigheten til det rotorparet som har samme rotasjonsretning mot rotorparet som har motsatt rotasjonsretning. For at systemet på figur 5.50 skal roteres mot klokka må rotor 2 og 4 ha en høyere rotasjonshastighet enn rotor 1 og 3. Legg merke til at rotasjonsretningen på rotor 2 og 4 da er i motsatt rettet rotasjonsretningen til systemet. Dette er fordi ved steady-state rotasjon er YAW motmomentet indusert av rotoren, som følge av Newtons 3. lov om bevegelse. Dette er forøvrig det samme for



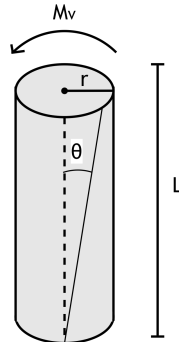
treghetsmomentet så lenge  $\frac{\delta^2}{\delta\theta^2}$  har positivt fortegn, altså vinkelhastigheten øker. Ved reduksjon av vinkelhastigheten vil rotasjonen av systemet ha samme retning som rotoren.

Problematikk som kan oppstå i forbindelse med YAW er når det forekommer ukontrollert. For multikoptere med et asymmetrisk design (f.eks. 3 rotorer), forskjellig dimensjon på rotorene, variabel pitch og flyging i turbulente forhold. YAW-indusert moment som følge av stadig endring av rotasjons hastighet og/eller pitch på rotor kan være årsak til redusert stabilitet for systemet og i verste fall havari.

Av dette kommer det frem nytten av å kunne måle YAW i multikopter-systemer. Videre i dokumentet drøftes det rundt vår løsning for å kunne foreta disse målingene og de tekniske utfordringene som oppstod som følge av dette.

### 5.10.2 Måling av YAW med sirkulær aksel

Etter god erfaring med bruk av strekkklapper for måling av krefter ble det avgjort at YAW skal måles på samme måte. Strekkklappene monteres på en komponent som utsatt for kraft vil ha en defleksjon. Denne defleksjonen gir strekkklappen en endret lengde, som direkte påvirker den elektriske motstanden i strekkklappen (ref. beskrivelse av strekkklapp i kapittel om *Load cell*). Dette kan gjøres på mange forskjellige måter. En måte som ble vurdert var å montere strekkklapp på en sirkulær aksel og måle forlengelse som følge av det induserte momentet.



Figur 5.51: Vridning i en sirkulær aksel

Figuren (5.51) viser en aksel som er utsatt for et vrimoment  $M_v$ . Dette momentet representerer YAW. Fasthetslæren sier at for en innspent aksling utsatt for moment kan vridningen uttrykkes slik:

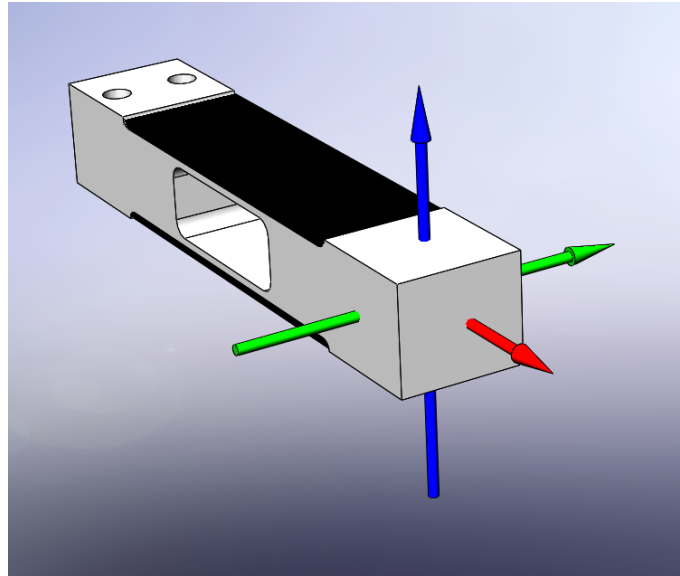
$$\theta = \frac{M_v r l}{G I_p}$$

Hvor  $G$  er materialets skjærmodul og  $I_p$  er det polare arealmomentet. En strekkklapp montert i akselens lengderetning vil da oppleve en forlengelse når akselen utsettes for vridning. Denne løsningen hadde derimot et par vesentlige problemer. Et problem er at forlengelsen av strekkklappen skjer både ved vridning med og mot klokka. Dermed ville det gitt samme signal uavhengig hvilken rotasjonsretning vridningen hadde og selv om måling av YAW hadde vært mulig ville det ikke vært spesifisert hvilken vei momentet virket. Et annet problem er dimensjonering og materialvalg. Generelt finnes det lite og/eller upålitelig data om måling av YAW for multikopter-motorer i den aktuelle størrelsesorden. Det ble observert noe spesifikasjoner angående moment fra noen multikopter-motor produsenter, men ikke for rotorer med diameter på 17" eller mindre. I tillegg var verdiene oppgitt av en lav størrelsesorden, ( $M_v \leq 1Nm$ ) hvilket setter svært strenge krav til dimensjoneringen av akselen. Ideelt skulle akselen vært hul med svært tynt gods og stor ytre radius. I tillegg måtte akselen vært av et materiale med en lavest mulig skjærmodul for å kunne gi en vridning av ikke-neglisjerbar verdi. Strekkklappen måtte også vært så lang som mulig og ha en svært høy sensitivitet, eventuelt ha en forsterker implementert. Alt dette er isolert sett mulig å gjennomføre, men problemet er at den samme akselen må tåle løftkraften fra motoren i tillegg. Denne kraften er såpass mye større og opptrer som dimensjonerende kraft. En komponent som skal tåle denne kraften i lengderetning med en god sikkerhetsmargin vil ha neglisjerbar vridning når utsatt for så lave verdier av moment YAW

representerer. Komponenten vil også da ha en flerakset spenningstilstand hvor det vil også være problematisk å avgjøre hvilke kraft-komponenter som gir utslag på strekkappen. Av dette ble det konkludert med at kompleksiteten en slik løsning medfører var for stor og dermed forkastet.

### 5.10.3 Måling av YAW med egen lastcelle

En hovedutfordring med måling av to forskjellige krefter er å kunne skille mellom hvilke som virker på måleutstyret. Et hovedfokus med måleriggen er å måle skyvekraft produsert av multikoptermotoren. Det gjøres ved hjelp av en lastcelle (beskrevet i kapittel om *Load cell*). Lastcellens konfigurasjon er slik at den er kun følsom for krefter i en viss retning. Det vil si at når loadcellen påføres kraft i den følsomme retningen gir det utslag på strekkappen, mens krefter i andre retninger gir neglisjerbart utslag.



Figur 5.52: Lastcelle med koordinatsystem

Figur 5.52 er en gjenskapning av lastcellen som brukes for måling av skyvekraft. Strekkklappene er festet under det svarte området på lastcellen og er kun følsomme for krefter som virker i Z-retning (blå akse). Krefter som virker i X og Y-retning (henholdsvis rød og grønn akse) vil i denne konfigurasjonen ha et neglisjerbart utslag på strekkklappene. Under følger en sammenlikning av forlengelsen av strekkklappene for hver retning.

Generelt beregnes forlengelse i et metall etter følgende forhold mellom spenning og forlengelse:

$$\sigma = E\epsilon \quad (5.1)$$

hvor  $E$  er materialets elastisitetsmodul og

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (5.2)$$

er relativ forlengelse.

Kraft i X-retning (rød akse) kan anses som en aksiell kraft og har definitivt den letteste utregningen:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

substituert for  $\sigma$  og løst for  $\Delta l$  i likning 5.1:

$$\Delta l = \frac{Fl}{AE} \quad (5.3)$$

Kraft i Y-retning (grønn akse) vil ikke gi noe utslag ettersom strekkklappen er festet symmetrisk om lastcellens nøytralakse. Det vil si at forlengelsen i delen av strekkklappen som utsettes for strekk er lik sammentrykningen strekkklappen utsettes for i delen av lastcellen som opplever trykkspenninger.

Kraft i Z-retning (blå akse) er den kraften som gir særlig utslag. For strekkklappen vil denne kraften gi et bøyemoment som gir forlengelse. Bøyepeningene beskrives slik:

$$\sigma = \frac{M_b y_t}{I_{x0}} \quad (5.4)$$

Hvor  $y_t$  er avstanden fra strekkklappen til lastcellens nøytralakse. Her er  $M_b$  produktet av kraften  $F$  og avstanden  $l$  fra referansesnippet til kraftens virkningsakse. Det vil si at spenningen  $\sigma$  ikke er konstant over lengden av strekkklappen, men en funksjon av avstanden  $l$ . Substituert inn i 5.1 og løst for  $\Delta l$  kan forlengelsen løses som et integral:

$$\Delta l = \int_{l_0}^{l_s} \frac{F l y_t}{I_{x0} E} dl$$

Hvor grensene  $l_0$  og  $l_s$  tilsvarer lengden av strekkklappen. For sammenlikningens skyld kan vi sette  $l_0 = 0$ . Det gir denne likningen for forlengelse:

$$\Delta l = \frac{F y_t}{I_{x0} E} l_s^2 \quad (5.5)$$

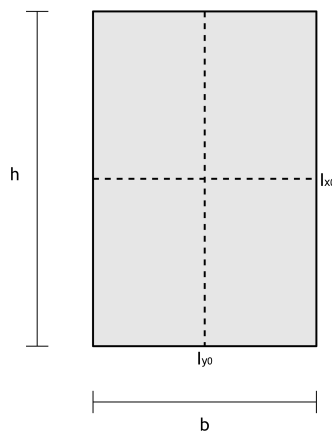
Sammenlikning av likning 5.3 og likning 5.4 viser at ved samme kraft er forlengelsen proporsjonal med kvadratet av lengden til strekkklappen når kraften virker i Z-retning, og proporsjonal med lengden når kraften virker i X-retning.

For begge tilfellene er  $F$ ,  $A$  og  $E$  like. Løsningen blir å dimensjonere komponenten som bøyes slik at arealmomentet  $I_{x0}$  får lav verdi i ønsket retning for forlengelse og høy verdi i uønsket retning for forlengelse. Dette lar seg gjøre ettersom arealmomentet opptrer etter følgende forhold:

$$I_{x0} = \frac{bh^3}{12}$$

og

$$I_{y0} = \frac{b^3h}{12}$$

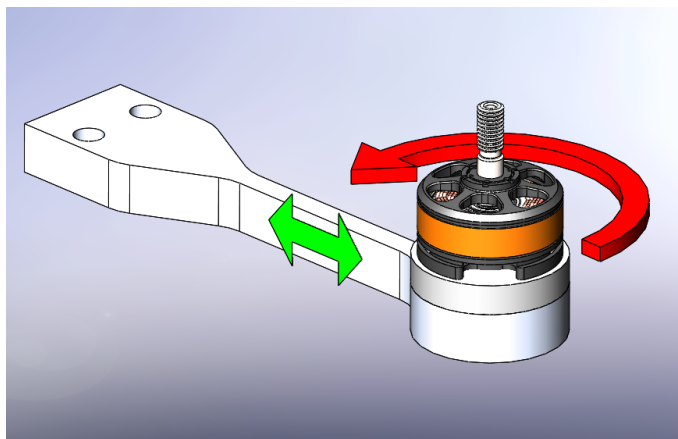


Figur 5.53: Arealmoment om ei flate

Det er prinsippet som er vist i figur 5.53 vi har brukt for måling av YAW i vår målerigg. Det neste avsnittet tar for seg hvordan vi har dimensjonert den nye innfestingen med tanke på arealmoment for å oppnå forlengelse i ønsket retning.

#### 5.10.4 Kombinert sopp og lastcelle

Ved å benytte prinsippet om variasjon i arealmoment for bøyning av en komponent i forskjellige retninger har vi redesignet innfestingen (også kjent som sopp) mellom motor og målerigg. Soppen vil nå representere en vesentlig mer kostbar og kompleks komponent, spesielt med tanke på design, materiale og tilvirkning. Ettersom den også vil opptre som en egen sensor i måleriggen vil montering/demontering av komponenten være en mer omstendelig jobb, hovedsaklig fordi den trenger elektrisk kontakt for streklappene. På grunn av dette har vi konkludert med at det ikke er fornuftig å ha to forskjellige sopper for innspenning av motorer. Den er derfor redesignet slik at den støtter alle utvalgte motorer (spesifisert i kapittel *utvalg motorer*). Det er derimot designet en ekstra innleggskive som monteres mellom motor og sopp. Denne tjener to funksjoner: en adapter for montering av store motorer (motorer som ikke har standard  $16 \times 19\text{mm}$  skruehull) og som varmeisolasjon mellom motor og sopp. Varmeisolasjon er nødvendig ettersom lastcellene er svært følsomme for temperatur og en multikoptermotor genererer en god del varme under drift.



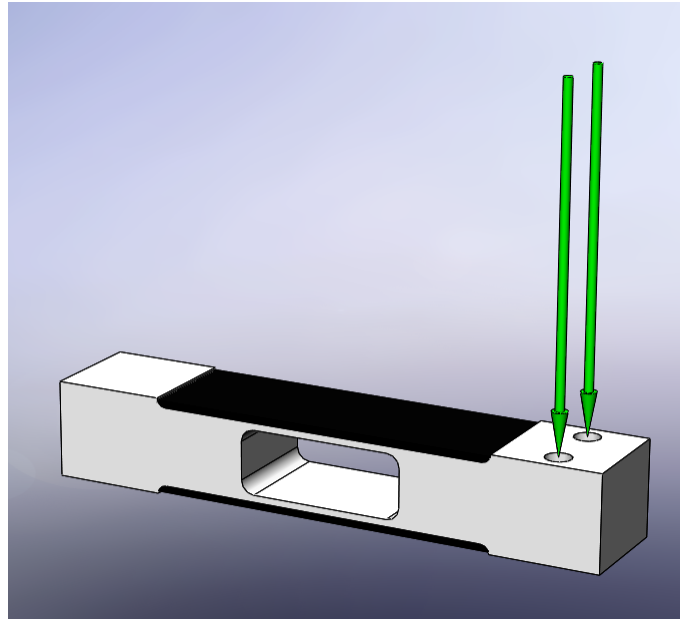
Figur 5.54: Virkningsmekanismen for kombinert sopp og lastcelle

Figur 5.54 viser design og virkemåte til den nye soppen. Strekkklapper er montert langs den smale delen av skaftet på begge sider, ved den grønne pilen. Det er to på hver side som er koblet sammen i en målebro for økt sensitivitet (ref. kapittel om Load cell). Motoren festes (slik som vist på figuren) på innleggskiven med M3 skruer. Når motoren nå roterer vil vrimomentet, som illustreres med rød pil, tas opp i soppen og medføre defleksjon. Legg merke til at den røde pila representerer resultantmomentet fra motoren og vil ha motsatt retning i forhold til rotoren under normal drift. Med tanke på at det er et rent vrimoment og ikke produktet av en kraft over en avstand (5.4) så er spenningene, dermed også forlengelsen, konstant så lenge tverrsnittsarealet er konstant.

### 5.10.5 Design og beregning

Utfordringen ved dimensjoneringen av soppen fremkommer av spenningssituasjonen den utsettes for. Den må tåle maksimal skyvekraft samtidig som den skal kunne bøyes av svært lite vrimoment. Som diskutert i foregående avsnitt så representerer soppen en vesentlig mer kostbar komponent. Dette faktumet tatt i betraktning i tillegg til sikkerhetsrisikoen et brudd i denne komponenten representerer, så må den ha en tilstrekkelig sikkerhetsfaktor. Den må også være dimensjonert slik at den ikke gir for mye *ground-effect* for rotor i de lave dimensjonsklassene (ref. kapittel om Ground effect). Dette løses ved å gjøre den lang med et smalt tverrsnitt. Hvor lang soppen kan gjøres avhenger av hvor mye moment lastcellen kan utsettes for før den svikter. Lastcellen er hyllevare og relativt rimelig i forhold til soppen. Derfor dimensjoneres det slik at om brudd inntreffer så vil det skje i lastcellen for å spare soppen.





Figur 5.55: Lastcelle PC22

Figur 5.55 viser lastcellen som måler skyvekraft. I følge spesifikasjonene i databladet [8], tåler den en samlet kraft gjennom hullene på høyre ende tilsvarende  $73,575N$ , illustrert med pilene. Innspenning til måleriggen foregår i motsatt ende, med en lineær avstand på  $106mm$ . Det er oppgitt at lastcellen er dimensjonert for dette med en sikkerhetsfaktor på 1,5. Momentet om venstre innfesting kan beregnes:

$$\begin{aligned} M_{pc22} &= F \times l \\ &= 73,575N \times 106mm \\ &= 7798,95Nmm \end{aligned} \tag{5.6}$$

Største skyvekraft som riggen er designet for å måle tilsvarer  $38,259N$ , noe som representerer dimensjonerende kraft. For å beregne hvor lang soppen kan gjøres får vi denne momentlikningen:

$$\begin{aligned}
 \Sigma M &= 0 \\
 M_{pc22} - F_{max} \times (106mm + l_s) &= 0 \\
 \frac{M_{pc22}}{F_{max}} - 106mm &= l_s \\
 \frac{7798,95Nmm}{38,259N} - 106mm &= l_s \\
 l_s &= 97,85mm
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

Hvor  $l_s$  er lengden fra soppens innspenning i lastcellen og skyvekraftens virkningsakse.  $l_s$  ble satt til 100 mm.

### Materialvalg

For å optimalisere soppens evne til å motstå skyvekraften med en passende sikkerhetsfaktor samtidig med å tillate maksimal bøyning for YAW ble det stilt meget spesifikke krav til materialvalget. Likning 5.1 forteller om forholdet mellom spenning og forlengelse. Forlengelse som følge av skyvekraft vil ha minimalt (om noe) utslag på strekkklappene i soppen ettersom de monteres symmetrisk om soppens nøytralakse. Likning 5.4 viser sammenhengen mellom spenning og moment over et tverrsnitt. Ettersom det er ønskelig med stor forlengelse  $\Delta l$  over strekkklappene, kan likning 5.1 løst for  $\Delta l$  gi en antydning om hvilke mekaniske egenskaper materialet skal ha:

Forholdet  $\frac{\sigma_y}{E}$  bør være størst mulig ( $\sigma_y$  er materialets flytgrense og sikkerhetsfaktor beregnes ut ifra denne verdien). En lav elastisitetsmodul tilsier at materialet kan deflektere selv under lave spenninger, hvilket er ønskelig med tanke på YAW. I tillegg må materialet være maskinerbart med tanke på utstyret tilgjengelig. Budsjet og tilgjengelighet var også faktorer som påvirket materialvalg.

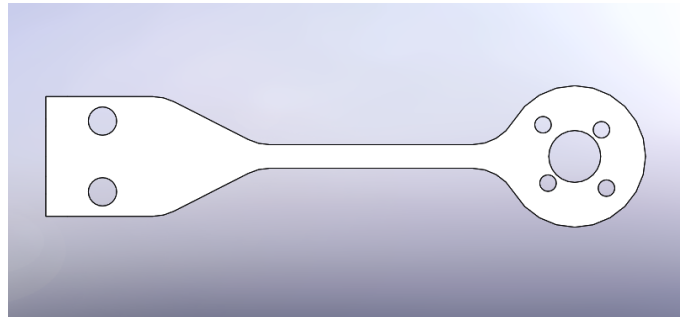
Konklusjonen ble aluminiumlegeringen 6063 T-6. Denne legeringen har en komposisjon med 97% aluminium hvor jern, magnesium og silikon hovedsaklig er legerende elementer, men inneholder også kobber, mangan, titan, sink og krom. Mer relevant er legeringens mekaniske egenskaper. Generelt kan det sies at det er lite variasjon i elastisitetsmodulen for alle de forskjellige aluminiumslegeringene ( $69000MPa - 72000MPa$ ), i motsetning til flytgrensene

$\sigma_y$ .

Der er det store variasjoner og særlig for legeringer som er varmebehandlet. 6063 T-6 har en elastisitetsmodul på  $69000\text{MPa}$  og en flytgrense på  $215\text{MPa}$ . Til soppens egenskaper er dette gode verdier, og med tanke på tilgjengelighet var 6063 T-6 et naturlig valg.

### Arealmoment og FEM-analyse

Dimensjonering av soppens godstykkelse er påvirket av råmaterialets godstykkelse. En skinne med godstykkelse på  $10\text{mm}$  ble levert.



Figur 5.56: Sopp profil

Soppens profil er et resultat av flere faktorer. Den brede delen til venstre skrues fast til lastcellen og har derfor samme bredde. Mot høyre smalner profilen inn, men uten for brå overganger for å unngå unødige spenningskonsentrasjoner. Skaftet har konstant tverrsnitt frem til motorinnfestingen til høyre. Dette tverrsnittet representerer delen av komponenten hvor arealmomentet er optimalisert.

Dimensjonerende kraft  $F_{max}$  virker gjennom sirkelsentrum til den store sirkulære profilen til høyre. Største bøyespenning blir derfor i overgangen der skaftets tverrsnitt øker mot skruehullene til lastcellen. Det er en avstand på  $65\text{mm}$ . Likning 5.4 hvor  $\sigma$  er redusert med en sikkerhetsfaktor på 6 gir en minimumsbredde på:

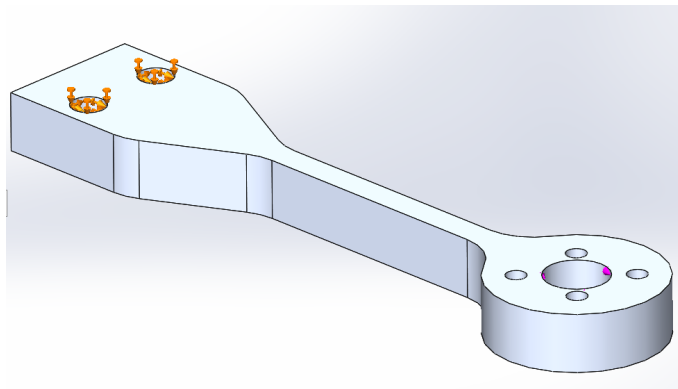
$$b = \frac{F_{max} l y_t 12}{\sigma h^3}$$

$$b = \frac{35,83 N 65 mm 5 mm 12}{10^3 mm^3 35,83 N/mm^2} \quad (5.8)$$

$$b = 4,16 mm$$

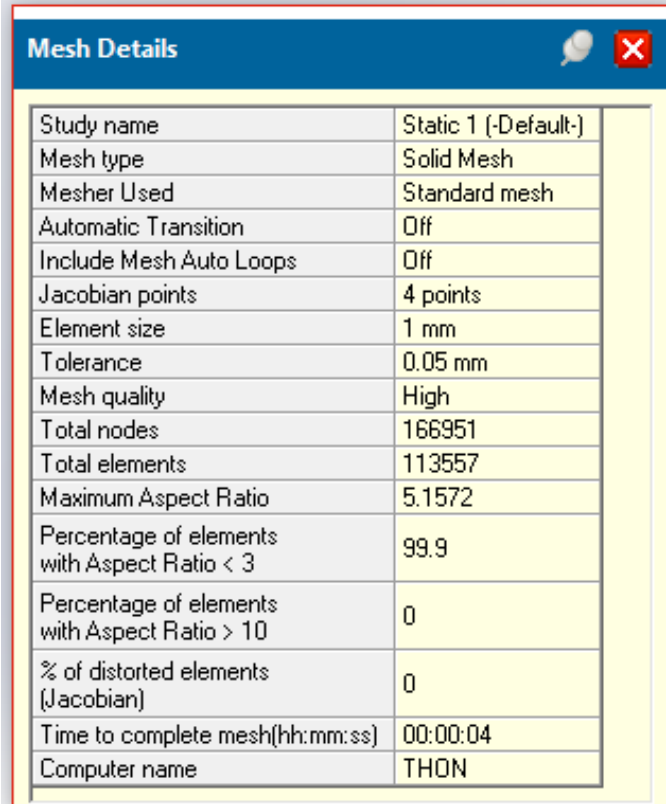
som settes til 5mm for å kompensere for kjervvirkning, ettersom det ikke er tatt med i beregningene. Resterende analyse for å se hvilke verdier av forlengelse ble gjort med FEM i solidworks.

### FEM-analysen



Figur 5.57: Fiksering og last

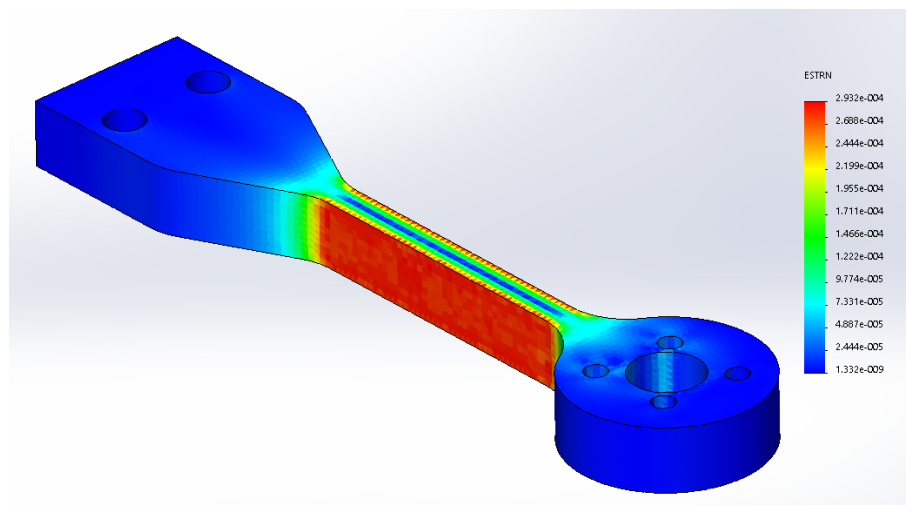
Figur 5.57 viser soppens fiksering og last. For å gjøre analysen så reell som mulig er soppen fiksert i skruerhullene som skal monteres i lastcellen. Det er satt på et vrimoment på  $1 Nm$  i senterhullet ved motorinnfestingen til høyre. Denne verdien er valgt ettersom det antas å være den største verdien av moment soppen vil utsettes for som følge av YAW. Likning 5.4 sier at det er et lineært forhold mellom spenning og moment, så forlengelse ved lavere verdier kan enkelt estimeres ved behov.



Mesh Details	
Study name	Static 1 (-Default-)
Mesh type	Solid Mesh
Mesher Used	Standard mesh
Automatic Transition	Off
Include Mesh Auto Loops	Off
Jacobian points	4 points
Element size	1 mm
Tolerance	0.05 mm
Mesh quality	High
Total nodes	166951
Total elements	113557
Maximum Aspect Ratio	5.1572
Percentage of elements with Aspect Ratio < 3	99.9
Percentage of elements with Aspect Ratio > 10	0
% of distorted elements (Jacobian)	0
Time to complete mesh(hh:mm:ss)	00:00:04
Computer name	THON

Figur 5.58: Meshets spesifikasjoner

Meshet anvendt i FEM-analysen var et solid-mesh med relativt fin elementstørrelse. Analysen tillot et høyt antall elementer ettersom den kun inneholdt én komponent. Dette bidrar til økt tillit for analysens resultater. En av spesifikasjonene som er verdt å notere er at 99.9% av elementene har en *Aspect-ratio* på under 3. Det vil si at nesten alle elementene har en homogen geometri uten lange og tynne konfigurasjoner. I tillegg er det ingen elementer med en *Aspect-ratio* over 10. Dette gir meshet en god kvalitet og er fordelaktig for eliminering av feilverdier i analysen.



Figur 5.59: Soppens relative forlengelse

Som forventet viser figur 5.59 at de største verdiene av relativ forlengelse inntreffer i den smale delen av skaftet. Som nevnt i avsnitt 5 vil forlengelsen være konstant så lenge tverrsnittet er konstant, hvilket stemmer godt med FEM-analysen. Gjennomsnittsverdien over denne flaten er i følge analyseresultatene  $\epsilon = 2,8242 \times 10^{-4}$ .

Spenningene som følge av skyvekraft hadde lite avvik fra teoretiske beregninger. Noe kjervvirkning ble observert, men av så små verdier at det kan neglisjeres. Ingen ytterligere endringer på designet ble foretatt. En presis sikkerhetsfaktor kalkuleres til 6,5.

### Bremsing og tregghet

Det må også vurderes hvor mye moment som induseres i innfesting ved bremsing. Noen leverandører leverer motorer med aktiv bremsing. Aktiv bremsing kan potensielt gi svært hurtig reduksjon av rotasjonshastigheten og derav store momenter i innfesting. Enda verre ved bråstopp av rotasjon som følge av for eksempel forkiling av motor. Dette medfører større vrimomenter enn observert ved akselerasjon av propellen. Det er derfor viktig at måleriggen er dimensjonert for disse verdiene av vrimoment.

Som nevnt over er momentet gitt ved tregghetsmomentet til den roterende massen multiplisert med vinkelakselerasjonen:

$$M_v = I\alpha = I \frac{\delta\omega}{\delta t} = I \frac{\delta^2\theta}{\delta t^2}$$

Utfordringen er å beregne treghetsmomentet  $I$  til den roterende massen. Treghetsmomentet til et legeme kan beskrives som:

$$I = \int_0^m r^2 dm$$

hvilket kan løses så lenge det finnes en funksjon som beskriver legemets radius fra rotasjonspunkt som funksjon av legemets masse. Dette viser seg å være komplisert for multikopterrotorer grunnet rotorens form. Det finnes lite data på treghetsmomentet til diverse rotorer og enda mindre om rotorer som har store treghetsmomenter. Dette kunne forventes ettersom leverandører tilstreber produksjon av rotorer med lavest masse og dermed lavest mulig treghet. For å anslå at måleriggen tåler vrilmoment i *verste fall*-scenarier er det nødvendig å beregne relevante rotorer som potensielt skal måles.

Vår løsning på dette er en empirisk tilnærming av problemet. Ved å beregne tregheten som en sum av massesegmenter multiplisert med kvadratet av massesegmentenes avstand til rotasjonspunktet kan vi oppnå tilstrekkelig nøyaktige overslag. Med andre ord vil vi beregne:

$$I = \sum_{n=1}^N m_n r_n^2$$

Og la massesegmentene  $m_n$  være så små som praktisk mulig. Måten dette gjøres på er å klippe en propell opp i små segmenter og veie hver bit. Middelradiusen til segmentet noteres. Denne metoden krever en vekt som kan måle relativt lave masseverdier. En 13" propell av plast veier mellom 9 og 10 gram. Om denne deles i segmenter på 3mm resulterer det i rundt 57 segmenter. Det vil si at hvert segment i gjennomsnitt veier mellom 0,15 – 0,17g. Dette er en noe tidkrevende prosess men gir en god tilnærming.

Å bestemme hvor hurtig en propell bremses ned ved enten aktiv bremsing eller ved forkiling av motor er mulig å gjøre i selve måleriggen. Med tanke på sikkerhet burde en provisorisk innfesting av motorene brukes for å forsikre at det ikke inntreffer brudd. Per dags dato har ikke måleriggen en fungerende RPM-sensor og måling av bremsing kan foreløpig ikke gjennomføres. Det kan derimot beregnes

teoretisk hvor mye moment innfestingen tåler, både for elastisk deformasjon og deretter brudd, og løse for vinkelakselerasjon. Dette vil gi en tillat maksimal vinkelakselerasjon for systemet. Spenning i aluminiumlegeringen 6063 -T6 er  $214MPa$  for elastisk deformasjon og  $240MPa$  for brudd. Fra likning 5.4 finner vi at:

$$M = \frac{\sigma \times I_x}{y_t} \Leftrightarrow M = \frac{\sigma \times 104,17mm^4}{2,5mm}$$

for elastisk deformasjon:

$$M \approx 8917Nmm$$

og

$$M \approx 10042Nmm$$

for brudd.

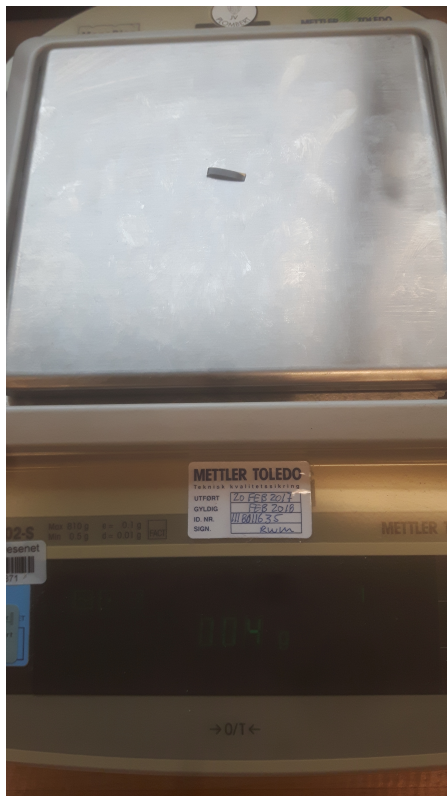
For denne empiriske målingen ble det valgt ut en DJI 1345-s propell. Grunnen for dette valget var at denne er en veldig representabel propell i form av størrelse og vekt.



Figur 5.60: DJI 1345-s propell, klippet opp. MERA 2017



Figur 5.60 viser propellen i segmenter. Segmentlengden er gjort så lik som mulig, men det er registrert avvik. Dette må tas med i vurderingen som en kilde til usikkerhet for verdiene. Likevel vil det gi grunnlag for greie estimeringer av reell verdi. Hver bit ble veid på godkjent utstyr hos Det Norske Myntverket [9]



Figur 5.61: Mettler Toledo vekt. *MERA 2017*

Vekten som ble anvendt var en Mettler Toledo Monobloc PG802-s. Denne var både kontrollert av leverandøren den 20. Februar 2017 og Justervesenet i 2016. Den kunne måle ned til 100-dels gram med en usikkerhet på 0,01 g. For våre formål var dette tilstrekkelig.

(Dataene ble ført inn og beregnet i Excel. Se eget vedlegg for dataene.)

Dataene resulterte i et treghetsmoment på ca  $4,8711 \times 10^{-5} \text{kgm}^2$ . Ved å bruke denne verdien kan vi regne ut maksimal bremsing før innfestingen enten går over i permanent deformasjon eller brudd.

$$\alpha = \frac{M_v}{I} \Leftrightarrow \alpha = \frac{8,917 \text{Nm}}{4,8711 \cdot 10^{-5} \text{kgm}^2} \Leftrightarrow \alpha = 1,83100 \times 10^5 \text{rad/s}^2$$

Dette tilsvarer å bremse en e800-motor fra maksimal RPM,  $9100rpm$ , til 0 på  $5,2ms$ . Dette er svært hurtig nedbremsing og kan anses som en bråstopp.

### 5.10.6 Strekkklapper

Ettersom det er svært små verdier av relativ forlengelse i soppen stiller det store krav til strekkklappenes følsomhet for tøyning. Om man ser på forholdet mellom motstand og forlengelse i en strekkklapp

$$R = G\epsilon \quad (5.9)$$

så er det mer presist å si at for å få pålitelige verdier må *gauge-faktoren*  $G$  være størst mulig. Dette fordi måleriggens evne til å måle spenningsforskjeller i en målebro av størrelsesorden  $< mV$  er usikker og kan gi utslag som støy eller lesefeil. Strekkklapper med tilstrekkelig høy gauge-faktor er av et halvledene materiale og tilgjengelig, men til en vesentlig høyere prisklasse enn metalliske strekkklapper. Merk også at som nevnt i kapittel om Load-cell så behøves det minst fire separate strekkklapper for å lage en pålitelig lastcelle.

### 5.10.7 Konklusjon

Tatt i betraktning at krav K7.1 og K7.2 har C-prioritering ble det avgjort at implementering av dette målesystemet avsluttes for ubestemt tid. Kostnaden viser seg å være for høy for å kunne innfri kravene på en tilfredstillende måte. Soppens design vil derimot ikke endres. Dette gjøres for å tillate forsøk på YAW-måling med strekkklapper tilgjengelig og for fremtidig utvikling og implementering.

Angående soppens evne til å motstå bråbremsing så kan det konkluderes med at dimensjoneringen er tilstrekkelig. Om det skulle forekomme en forkiling av en motor under testing så må innfestingen inspiseres for deformasjon før videre testing.

## 5.11 CNC Tilvirkning

Avgjørelsen om å tilvirke motorfestene i aluminium ble tatt på bakgrunn av konklusjonen i kapitlet om materialvalg. Til prototype testing ble det benyttet motorfester i akryl. Dette viste seg, etter destruktiv testing og *FEM* analyse å være sikkerhetsmessig forsvarlig. Men akrylfestene var kun en midlertidig løsning, prosjektgruppen begynte derfor å se etter et stivere og mer holdbart materiale. Aluminium ble valgt grunnet dets tilstrekkelige stivhet og styrke men også på grunn dets gode formbarhet.

For tilvirke aluminium til ønsket design med de fasiliteter tilgjengelig var CNC fresing det naturlige valget.

### 5.11.1 CNC fresing

*Computer Numerical Control* er automatisering av maskiner ved hjelp av datamaskin. Før i tiden ble maskiner styrt for hånd ved å rotere på hjul og bevege spaker. Dette var tidkrevende og lite effektiv. Fordelen med CNC er at man kan på forhånd lage et program som maskinen leser, maskinen utfører deretter alle operasjonene programmet inneholder med svært høy nøyaktighet og hurtighet. Bak programmet ligger en kode kalt *G-kode* som igjen stammer fra 3D-modellen designet på forhånd. G-koden er et språk som baserer seg på forskjellige bevegelser i x, y og z planet samt kommandoer for maskinspesifikke handlinger som for eksempel start/stopp og kjølevann av/på. G-kode er et universelt språk som mange produsenter benytter i sine CNC fresemaskiner.

#### Maskinen

Tilvirkningen av motorfestene ble gjort i skolens prototypeverksted av en HAAZ Mini Mill 2.5 akset fresemaskin. Dette er en relativt liten maskin med et automatisk verktøymagasin som rommer opptil 10 verktøy av gangen. Spindelen har en hastighet på maks 6000 rpm (runder per minutt) og drives av en motor på 7.5 hestekrefter [10].



Figur 5.62: HAAS Mini Mill, Super Mini Mill 2017 [11]

### Verktøyliste

Figur 5.63 viser verktøy brukt til produksjon av motorfestene. Alle verktøy er fremstilt i *HSS* (High Speed Steel) som er et vanlig og mye brukt materiale for slike borr og freser.



Figur 5.63: Verktøy

Diameter mm	Materiale	Lengde mm	Type
Ø11.0	HSS	144.0	Bor
Ø6.0	HSS	93.0	Bor
Ø3.5	HSS	70.0	Bor
Ø10.0	HSS	95.0	Pinnefres 4 skjær

## 5.11.2 Utførelse

### Kort om materialet

Kapittelet *Materialvalg* konkluderer med at aluminium egner seg best til fremstillingen av motorfester. Legeringen 6063-T6 ble valgt da den har høy flytgrense ( $\sigma_y = 215$  MPa) og tilstrekkelig elastisitetsmodul ( $E = 69$  MPa).

Materialet er varmebehandlet fra produsent, koden T6 forteller oss hvilken metode som er brukt. T6 betyr at legeringen først varmes opp til løslighetslinjen men under soliduslinjen, deretter bråkjøles den i vann eller væske. Deretter herdes den ved *kunstig aldring*. Aldring er utfelling av persipitater som legger seg i den atomiske struktur og bidrar til herding. Kunstig aldring er en variant der man varmer opp aluminiumet for å fremskynde utfellingen. Varmebehandling av materialer legger visse føringer for parameter under tilvirkning. Man ønsker å unngå høye temperaturer i emnet for å hindre *normalisering*. Dette vil si at når materialet varmes opp til en viss temperatur frigjøres de indre spenningene i gitterstrukturen. Og det er disse indre spenningene som gir materialet dets styrke.

### Kjølevæske

På bakgrunn av temperaturen som oppstår under fresing er nedkjøling av materialet særdeles viktig. Under maskinering brukte vi en kjølevæske basert på mineralolje blandet med vann for å kjøle ned emnet og verktøy. Kjølevæsken smører og bidrar derfor til økt verktøylevetid og økt motstand mot korrosjon (se fig 5.64a).

### Oppspenning

Emnet som skal maskineres må spennes fast til bordet i maskinen. Det er store krefter i sving i en fresemaskin og det vil være en betydelig fare for

personskade om emnet skulle løsne under fresing. Ved oppspenning må man ta hensyn til spindelen og bordets bevegelser under fresing. Klemmene må plasseres slik at verktøyholderen med verktøy og klemmene ikke kolliderer. Hensyn til oppspenningen av en del må tas av konstruktøren allerede i designfasen av en del. Hvis delen ikke lar spenne fast, kan man ikke maskinere den slik man ønsker. I dette tilfellet var oppspenningen relativt enkel, emnet kom levert som en hel skinne som vi spente fast med 4 klemmer med en underlagsplate under (se fig 5.64b).

### Maskineringen

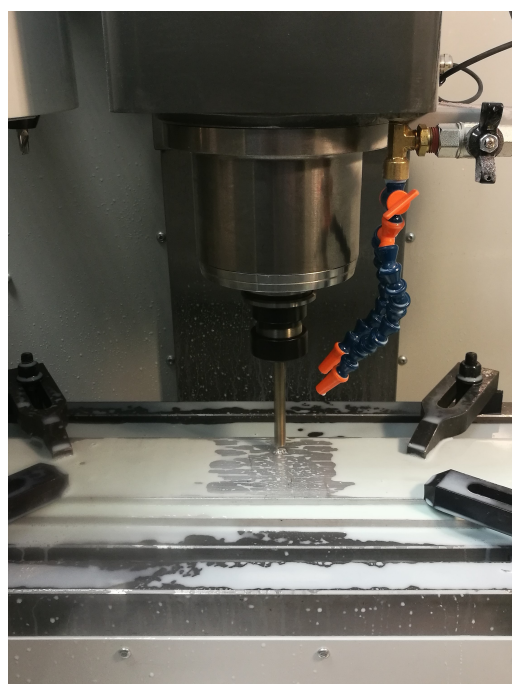
Motorfestet designes i *SolidWorks*, tilleggsprogrammet *HSMWORKS* gjør så 3D geometrien om til koder og kommandoer som fresemaskinen forstår. I dette programmet defineres alt fra verktøy spesifikasjoner, hvor fresing skal starte og avslutte, hvor fort spindelen roterer etc.

Under følger operasjonsbeskrivelsen for tilvirkningen av motorfestene. Det vil si steg for steg hvordan prosessen foregår.

1. Monter følgende verktøy i passende holdere;
  - Bor: Ø11mm, Ø6mm, Ø3mm
  - Fres: Ø8mm pinnefres (4 skjær)
2. Spenn fast emnet med 4 klemmer, et i hvert hjørne
3. Ta ut nullpunkt i nedre venstre hjørnet (se figur 5.65 )
4. Mål verktøylenger på samtlige verktøy og legg inn på minnet til maskin
5. Maskinen starter spindel og kjølevæskpumpe og beveger seg til start posisjon.
6. Maskin starter en drillsyklus og borrar samtlige hull i begge deler fortløpende.
7. Maskinen starter å frese konturen rundt delen, verktøyet fjerner 2mm gods per pass og fortsetter på del nr 2 automatisk.
8. Maskinen stopper spindel og kjølevæskpumpe
9. Delene blåses rene for spon og klemmene fjernes
10. Delene grades med håndfil

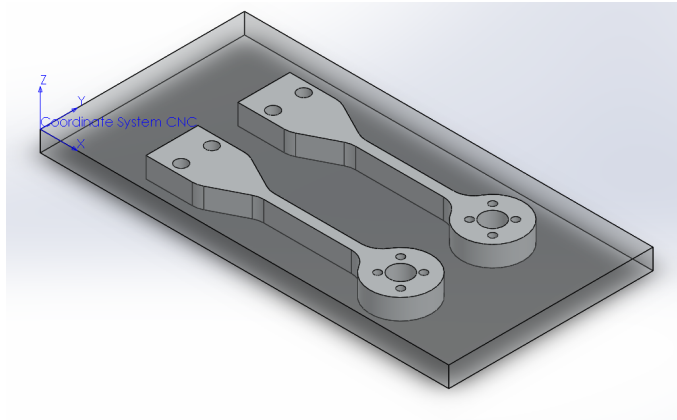


(a) Kjølevæske



(b) Oppspenning

Figur 5.64: CNC-tilvirkning.



Figur 5.65: Vi freser ut 2 deler for å utnytte emnet best mulig.



Figur 5.66: Motorfeste ferdig maskinert.

### Konklusjon

Ved å benytte seg av datastyrt fresemaskiner kan man tillate seg friheter når det gjelder design og kompleksitet kontra 3D-printing. Den største forskjellen



mellom disse to metodene er materialene man kan tilvirke deler i. Designet av motorfestet ville blitt betraktelig endret hvis vi måtte benyttet plast istedenfor aluminium som materiale. Fresing er en krevende prosess når man tar i betraktning planlegging, programmering og utførelsen. 3D-printing er en prosess som er mindre tidkrevende, men styrken og holdbarheten til det ferdige produktet vil ikke være tilstrekkelig ved denne tilvirkningsmetoden.

## 5.12 Ledningsnett

Kabelkanalen er en installasjon som har som oppgave å skjule ledninger og kretskort. Den skal også huse batteriet og sensorer som ikke er avhengige av plassering nær motoren. Den vil også ha en beskyttende funksjon for koblinger og andre elektriske komponenter som brukeren av riggen ikke trenger å endre ved testaktiviteter. Ledningsnettet består av to hoveddeler. Den ene siden av ledningsnettet leser av og gir signaler til og fra arduinokretskortet og til datamaskinen, mens den andre siden opererer på høyere spenning og leverer strøm fra batteriet via ESC-en og videre til motoren.

### 5.12.1 Kabelkanal

#### Design

Vi har valgt en enkel, men god løsning på kabelkanalen. Vi har valgt å benytte oss av et eksisterende standardisert produkt som er mye brukt innenfor elektrikerfaget. Ved å velge et ferdig system sparer vi mye tid på design og tilvirkning, og får i tillegg et system som passer relativt bra til måleriggen.



(a) Åpen for kobling.



(b) Lukket for måling.

Figur 5.67: Kabelkanalen

### Konstruksjon

Tilpasninger for måleriggen har vært nødvendig selv om vi har valgt et ferdig system. Kabelkanalen blir produsert i standardlengder på 2 meter, og vi har derfor kappet den ned til en lengde på 66 cm for at den skulle få lik høyde som den vertikale stolpen som armene til motoren er montert på. Vi har boret hull for gjennomføring av ledninger til sensorarmen og motoren.

### Laserkutting

For å montere tilkoblingen til nødstop-panelet og usb-kontakten har vi laserkuttet to monteringshull i siden på kabelkanalen. Vi designet en 3D-modell av hullene i SolidWorks, som vi programmerte laserkutteren til. Deretter la vi kabelkanalen i laserkutteren og programerte høyden slik at laserkutteren fikk riktig fokus. Vi la også inn en metallbit i kabelkanalen slik at ikke laserkutteren kuttet igjennom begge sidene av kabelkanalen.



Figur 5.68: Tilkoblingspunkt for nødstop-panelet.

### Montering

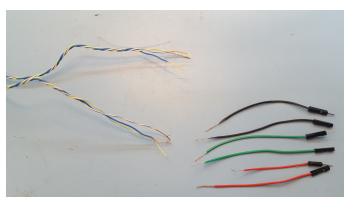
Vi har festet kabelkanalen på baksiden av den vertikale stolpen med fire treskruer. Dette er godt nok feste da kabelkanalen ikke blir utsatt for andre

krefter en gravitasjonen. Usb-tilkoblingen er festet med medfølgende gjennomgående skruer som sentrerer usb-tilkoblingen i monteringshullet. Tilkoblingen til nødstop-panelet er en gjennomføring som blir montert i et sirkulært hull med 3 medfølgende skruer. I gjennomføringen blir det montert en XT60 hannkobling som låses fast med settskruer. Det er, som vist på figur 5.68, gjennomføringen til nødstop-panelet blir tilkoblet.

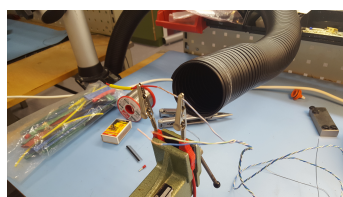
## 5.12.2 Ledningsnett

### Lodding

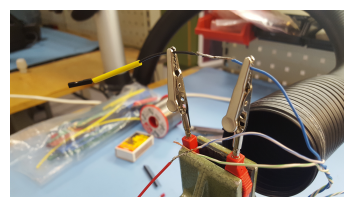
Vi har loddet overganger, komponenter, strømledninger og sensorer. Når vi har loddet komponenter som hurtigkoblinger har vi valgt parallel-lodding. Det vil si at man avisolerer to ledninger og legger de parallelt mot hverandre før man varmer opp og smelter loddetinn over. Til slutt dekket vi til skjøten med en krympestrømpe som vi varmet opp, for å få en sikker skjøt. Når vi har loddet strømledninger som for eksempel til nødstop-panelet, er dimensjonene større. Disse ledningene krever høyere varme og mer loddetinn enn ved lodding av signalkablene. De skal også ha en høyere strømføring så kontaktflaten mellom tilkoblingspluggene og ledningene må også være større.



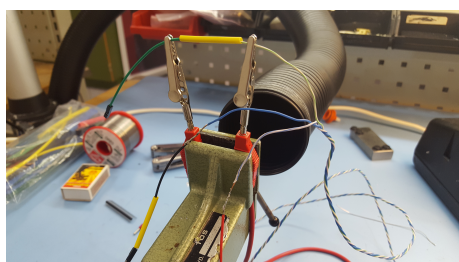
(a) Kabler før lodding.



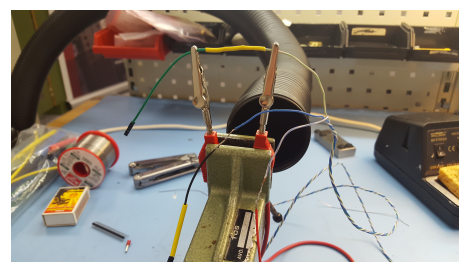
(b) I klemmene.



(c) Ferdig loddet.



(d) Før krymping



(e) Etter krymping

Figur 5.69: Lodding av sensorkabler

Vi har brukt en loddebolt fra ERSA med trinnløs justering av temperatur. For små

komponenter har vi hatt en loddetemperatur på rundt 325 grader celsius, mens på større koblinger har temperaturen vært opp mot 450 grader for å oppnå god flyt på tinned, noe som gir god kontakt.



Figur 5.70: ERSA loddebolt

### Montering

De fleste ledningene har konnektorer som gjør at de enkelt kan kobles på de sensorer og sammen med de ledningene de er tiltenkt. Noen sensorer har signalkabler loddet direkte på koblingspunktene med en konnektor i motsatt ende for tilkobling til arduino eller koblingsbrett. Det er lagt opp kabelkanaler for de forskjellige sensorene på sensorarmen, til lastcellen og til motoren.

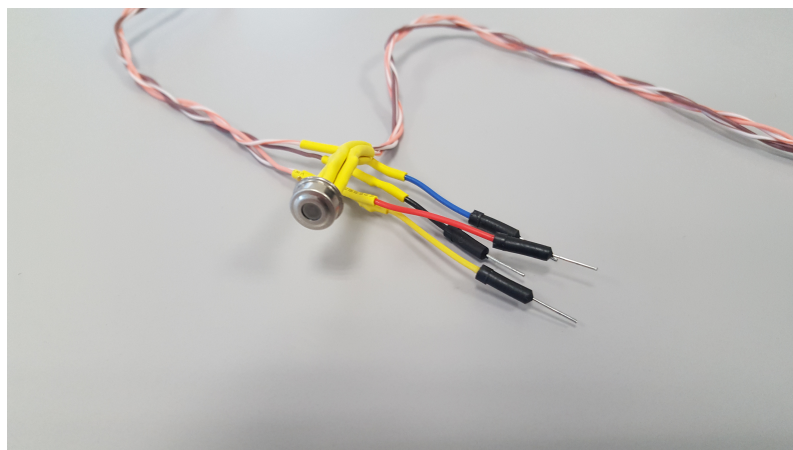
## 5.13 Sikkerhet

Som beskrevet i krav 5.1 skal måleriggen ha en innretning som beskytter propellen under måling. For å oppfylle dette kravet har vi valgt å implementere en beskyttelsesring som omfavner propellens arbeidsområde uten å forstyrre luft-gjennomstrømningen. Hovedoppgaven til propellbeskyttelsen er å hindre personskade som følge av at man kommer borti propellen under måling. Propellbeskyttelsen har ikke som oppgave å gjøre det umulig å berøre propellen, men hindre skader som følge av uforsiktig opptreden rundt måleriggen. Hvis man fortsatt skulle være uheldig under bruk har vi, som beskrevet i krav 5.2 i kravspesifikasjonen, implementert et nødstoppsystem. Dette systemet er bygd opp av en nødstoppbryter som kutter strømtilførselen fra batteriet til ESC-en, slik at propellen stopper. Det er i tillegg en USB-tilkobling på nødstopppanelet, slik at det kan plasseres i umiddelbar nærhet til operatøren.

### 5.13.1 Propellbeskyttelse

#### Design

Propellbeskyttelsen er designet som en beskyttelsesring som kan senkes ned rundt propellen før måleprosessen starter. Diameteren på ringen er tilpasset slik at den beskytter mot alle propellstørrelser som måleriggen er designet for.



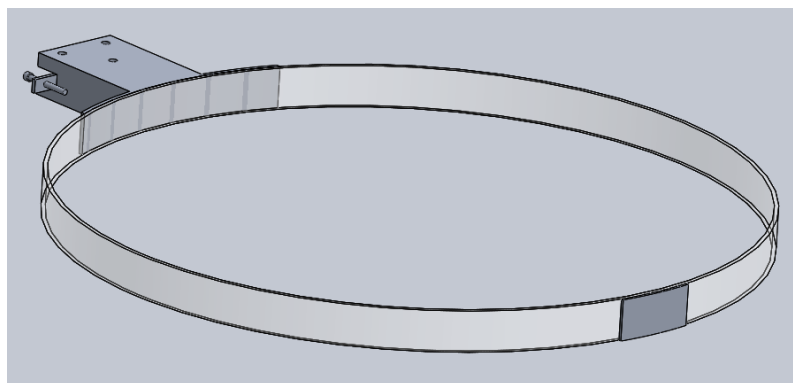
Figur 5.71: Temperatursensor med konnektorer.

Ringen er laget av 6mm akryl som bygger 60mm i høyden slik som figur 5.72 viser. Dette vil gi tilfredstillende beskyttelse mot påvirkninger fra siden. Beskyttelsesringen er montert til en egenprodusert brakett som er festet med hengsler mot stammen på måleriggen. Festebraketten har justeringsmuligheter for å justere høyden og vinkelen på beskyttelsesringen slik at den kan tilpasses motorer med varierende høyde.

### Konstruksjon

Propellbeskyttelsen er laget av 3 forskjellige deler som er egenprodusert. Dette er festebraketten, beskyttelsesringen og en sammenkobling til den todelt beskyttelsesringen. Deler som hengsler, skruer og muttere er innkjøpt.

Beskyttelsesring Beskyttelsesringen er laget av 6mm akryl som er kuttet med laserkutter. Den er todelt og koblet sammen i front. For å oppnå en diameter på 500mm er hver av halvsirklene 785mm lange, med hull til sammenkobling i front og hull til innfestning mot festebraketten i bakkant. For å lage sirkelen av akrylplatene varmet vi akrylen med varmepistol og bøyde deretter delene til ved hjelp av en mal. Etter avkjøling beholder akrylen ønsket form.

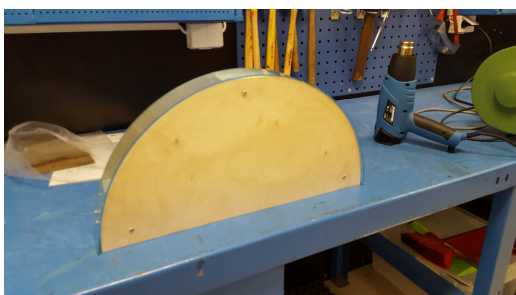


Figur 5.72: 3D-modell av propellbeskyttelsen.

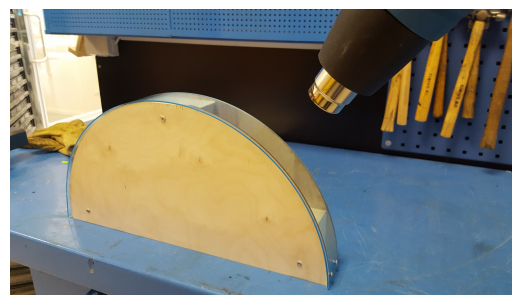




Figur 5.73: En halvdel av beskyttelsesringen.



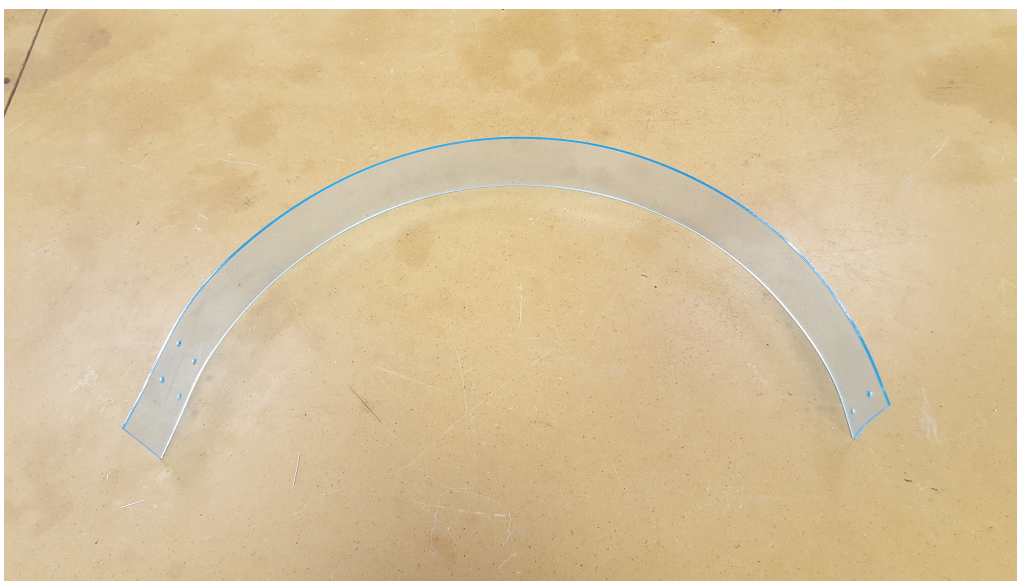
(a) Bøyemalen.



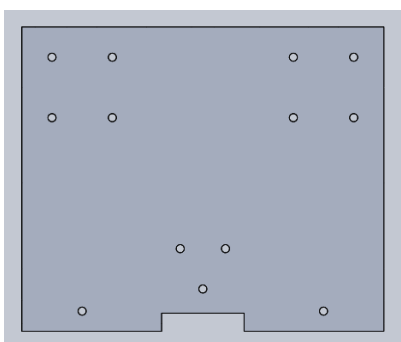
(b) Bøyemal med akrylen.

Figur 5.74: Festebrakett

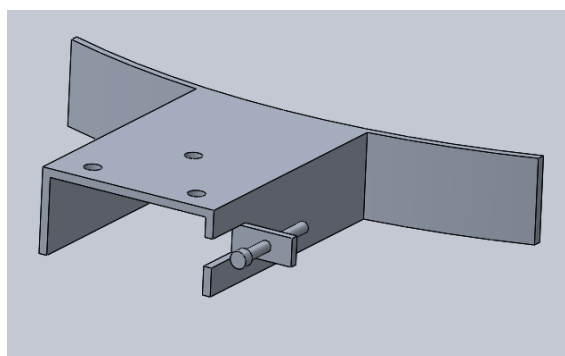
Festebrakett Festebraketten er laget av en 2mm aluminiumsplate som først er kuttet til riktig størrelse. Deretter er det boret hull til hengsle, beskyttelsesring og justeringsskrue. Til slutt bøydde vi aluminiumsplatene langs de markerte linjene og monterte den med 4 mm skruer til beskyttelsesringen.



Figur 5.75: Beskyttelsesringen etter bøying.



(a) Festebrakett før bøying.



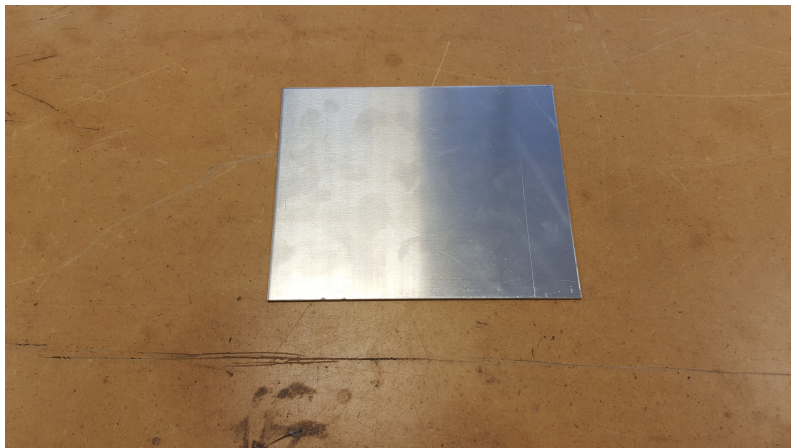
(b) Festebrakett etter bøying.

Figur 5.76: Festebrakett

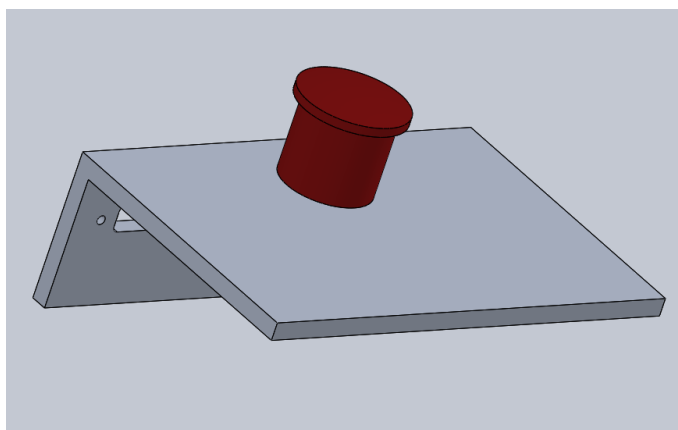
### 5.13.2 Nødstoppsystem

#### Design

Når vi designet nødstopppanelet som bryteren skal monteres på skisserte vi tre forskjellige design og gikk for det vi mente var enklest. Vi lagde en 3D-modell av skissen, og forenklet tegninger av deler som ble kjøpt inn. Vi ønsker at tilkoblingen fra PC til målerigg skal foregå mellom nødstopppanelet slik at panelet naturlig plasseres i nærhet av operatøren. Vi passer også på å bruke materialer vi har tilgjengelig i verkstedet for å oppnå lavere kost og kortere produksjonstid. Ledninger, nødstoppbryter og USB-kontakt er kjøpt inn av ekstern produsent og implementert i systemet.



Figur 5.77: Festebrakett før boring.



Figur 5.78: 3D-modell av nødstopppanelet.

### Konstruksjon

Vinkeljern av aluminium med rett størrelse er kuttet til rett lengde for nødstopppanelet. Deretter er det boret hull for montering av nødstoppbryter og USB-tilkobling. USB-tilkoblingen er utstyrt med en 2 meter lang tilkoblings-ledning fra produsenten, mens nødstoppbryteren har ledningstilkoblinger. Her har vi terminert ledningene i den ene enden slik at de oppnår god kontakt med nødstoppbryteren, i den andre enden av ledningene har vi loddet på en XT60 kontakt for tilkobling til strømsystemet på måleriggen. Til slutt har vi montert gummilister på undersiden av nødstopppanelet for å sikre en stødig plassering, og unngå oppskraping av underlaget.



# MERA



Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Maskinvare

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Dette kapittelet omhandler maskinvaren i måleriggen. Dette inkluderer sensorene som brukes til å hente måleverdier, kretskortet gruppen har designet for å måle strøm og spenning i kretsen, mikrokontrolleren som styrer riggen og oppløsningen dette systemet kan oppnå.

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	11.05.17	Dokument opprettet	Cecilie Dokken
0.1	13.05.17	Innledning skrevet, oppsett satt opp og kap. 3 påbegynt	Cecilie Dokken
0.2	15.05.17	Avsnitt om <i>double-bending beam</i> lagt til under seksjon PC22-lastcelle	Halvard Thon
1.0	23.05.17	Sammendrag og innledning lagt til	Eivind Foss-Pedersen

## Innholdsfortegnelse

<b>6.1</b>	<b>Innledning</b>	200
<b>6.2</b>	<b>Mikrokontroller</b>	201
6.2.1	Arduino M0 PRO	201
6.2.2	Arduino DUE	202
6.2.3	Sammenlikning og konklusjon	204
<b>6.3</b>	<b>Sensorer</b>	205
6.3.1	Løftekraft	205
6.3.2	Streklapp	205
6.3.3	Wheatstone bro	206
6.3.4	PC22 - Lastcelle	207
6.3.5	Rotasjonshastighet	211
6.3.6	US1881 - Hall effect sensor	212
6.3.7	TCRT5000 - Optisk sensor	213
6.3.8	Temperatur og lufttrykk	215
6.3.9	TMP36	215
6.3.10	MLX90614	216
6.3.11	BMP180	216
6.3.12	Effekt	218
6.3.13	Motstand	218
6.3.14	AttoPilot	219
<b>6.4</b>	<b>Kretskortdesign</b>	221
6.4.1	Kretsdesign	221
6.4.2	Filter	224
6.4.3	Kretskortdesign	224
<b>6.5</b>	<b>Måleriggens oppløsning</b>	227
6.5.1	Sammenlikningsprosedyrer	227
6.5.2	Mikrokontrollerens oppløsning	228
6.5.3	Lastcellens usikkerhet	229
6.5.4	Konklusjon	231



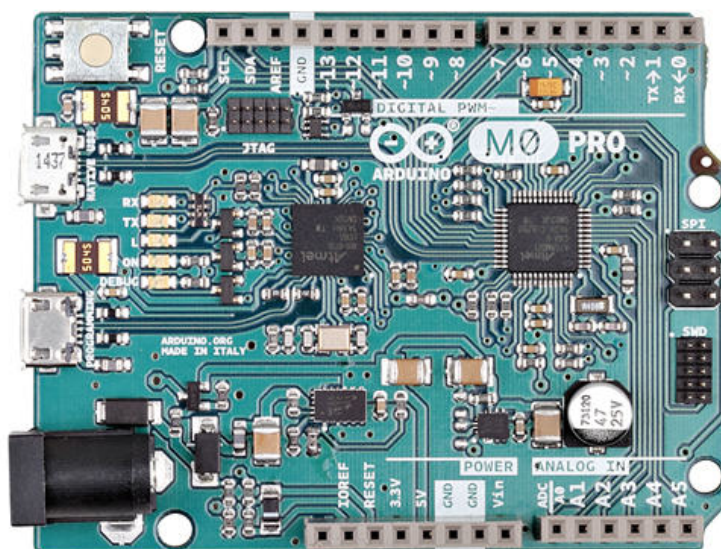
## 6.1 Innledning

Måleriggen skal utføre diverse tester for å kunne generere måldata som sier noe om egenskapene til motor, rotor og ESC konfigurasjonen som testes. For at den skal kunne gjøre det må flere sensorer og et system som kan lese av dataene disse sensorene gir implementeres. Det diskuteres rundt hvilke sensorer som burde brukes for å best mulig lese av måldata. Gruppen har utviklet et kretskort som kan brukes for å måle strøm og spenning som går til ESC, det utredes for utviklingen og beregningene bak dette kretskortet. Til slutt diskuteres og beregnes det hvor høy oppløsning måleriggen kan oppnå, basert på komponentene som blir brukt i systemet.

## 6.2 Mikrokontroller

Arduino er en open-source plattform basert på hardware og software som er enkel å bruke og enkelt å implementere. Arduino produserer egne brett med integrerte mikrokontrollere. Arduino har et eget programmeringsspråk som er basert på Wiring og programmeringssoftware (Arduino IDE) basert på Processing.

### 6.2.1 Arduino M0 PRO



Figur 6.1: Arduino M0 PRO

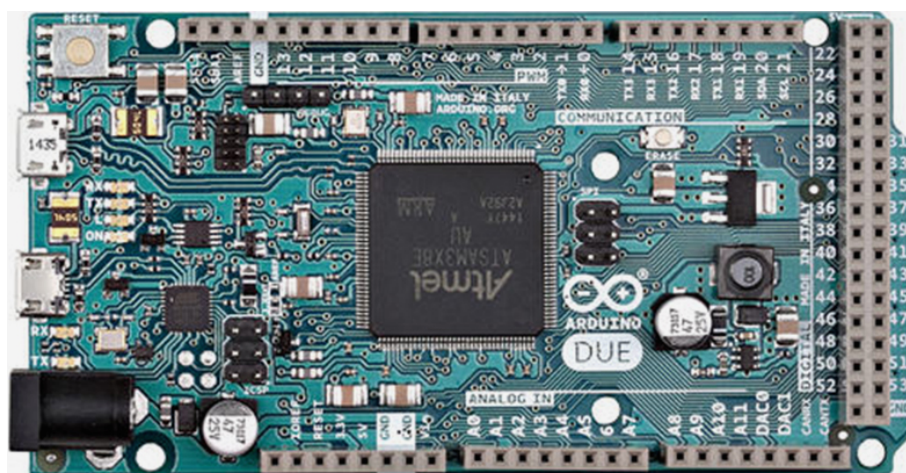
Arduino M0 PRO er drevet av Atmel's SAMD21G18 mikrokontroller. Atmel SAMD21 mikrokontroller er en SMART ARM-basert mikrokontroller [12]. SMART ARM mikrokontrollere har et integrert flash minne, og er utstyrt med prosessor som benytter seg av et eksternt minne. SMART ARM åpner også for muligheten for trådløs tilkobling til integrerte systemer. SAMD21 har 256 kB programmerbart flash minne, hvor 4 kB av disse blir brukt til bootloader. Tekniske spesifikasjoner for mikrokontrolleren er listet opp i tabellen under [13].

Tabell 6.1: Sepsifikasjoner for Arduino M0 PRO

Arduino M0 PRO (Atmel SAMD21G18)	
CPU frekvens	48 MHz
Flash-minne	256 kB
SRAM	32 kB
DAC	10 bit
ADC	12 bit
Driftsspenning	3.3 V
Digital input/output pins	20 (12 PWM output)
Analoge input pins	6
Analoge output pins	1
Inngangsspenning	5-15 V

Arduino M0 PRO kan drives via en mikro USB eller en ekstern strømtilførsel. M0 PRO er utstyrt med to mikro USB innganger hvor begge kan benyttes til programmering og strømforsyning. En av fordelene med M0 PRO er at den er utstyrt med Atmel's embeded debugger som gjør arbeidet med feilsøking lettere.

## 6.2.2 Arduino DUE



Figur 6.2: Arduino DUE

Arduino DUE er drevet av Atmel's SAM3X8E mikrokontroller. Atmel SAM3X8E

mikrokontroller er i likhet med Atmel's SAMD21G18 også en SMART ARM-basert mikrokontroller [14]. SAM3X8E har 512 kB programmerbart flash-minne. Selve brettet er utstyrt med nødvendige komponenter for å støtte mikrokontrolleren. Det vil si at brettet kan kobles rett i datamaskinen og programmeres via Arduino IDE. Driftsspenningen til Arduino DUE er på 3.3V og det er veldig viktig å ikke tilføre høyere spenning i I/O pinnene på brettet da dette kan skade brettet og mikrokontrolleren. Det blir nødvendig å implementere spenningsregulatorer da flere av de nødvendige sensorene sender signaler på 5V. Spesifikasjoner for Arduino DUE er listet opp i tabellen nedenfor [15].

Tabell 6.2: Spesifikasjoner for Arduino DUE

Arduino DUE (Atmel SAM3X8E)	
CPU frekvens	84 MHz
Flash-minne	512 kB
SRAM	96 kB
DAC	12 bit
ADC	12 bit
Driftsspenning	3.3 V
Digital input/output pins	54 (12 PWM output)
Analoge input pins	12
Analoge output pins	2
Inngangsspenning	6-16 V

Arduino DUE kan drives via en mikro USB eller en ekstern strømtilførsel. DUE er utstyrt med to mikro USB innganger hvor begge kan benyttes til programmering og strømforsyning. En fordel med Arduino DUE er at den er utstyrt med resetbar polyfuse som beskytter datamaskinens USB mot kortslutning. Selv om de fleste datamaskiner i dag har egen innebygget beskyttelse kan dette være nyttig og fungerer som ekstra beskyttelse.

### 6.2.3 Sammenlikning og konklusjon

De to forskjellige Arduino brettene er på mange måter veldig like, samtidig som DUE er hakket bedre på nesten samtlige egenskaper som er listet opp i tabellene for spesifikasjoner. Vurderingen av hvilken Arduino som var best egnet for vårt prosjekt ble gjort i samråd med intern veileder. Det var en enighet om at frekvens og både ADC og DAC var veldig viktig når det kom til valg av mikrokontroller.

Det er viktig at konverteringen av informasjon fra analoge til digitale signaler, og omvendt, har høy nok oppløsning. Dette er for å sikre så nøyaktige tall som mulig i forhold til bl.a. løftekraft. De minste motor/rotor-konfigurasjonene som skal kunne monteres til måleriggen produserer langt mindre løftekraft enn de største og da er det gunstig å få så nøyaktige tall på målingene som mulig, også for lave verdier.

Frekvensen er viktig i forhold til at det er mye informasjon som skal leses av og prosesseres under en måling. Det er viktig for oss å kunne lese av målingene så mange ganger i sekundet som mulig, og at informasjonen fra de ulike sensorene blir lest av med minst mulig tidsforsinkelser. Dette går også på nøyaktigheten til målingene som hele tiden står i hovedfokus.

Det er viktig for oss at brukeren av måleriggen får et reelt måleresultat med lavest mulig måleusikkerhet for å kunne optimalisere sine multikopter og få en oversikt over multikopterets egenskaper og evner. Det ble vurdert andre mikrokontrollere fra andre produsenter, men etter samtale med veileder ble det besluttet å gå for Arduino DUE med Atmel SAM3X8E. Fordelen med dette Arduino brettet er at det kan programmeres i Arduino IDE som er et brukervennlig verktøy for programmering som vi er kjent med fra tidligere. Det er også enkelt og rimelig å få tak i nødvendige sensorer til måleriggen som er Arduino compatible. Det konkluderes med at Arduino DUE er godt egnet til å oppfylle måleriggens krav på en tifredsstillende måte.

## 6.3 Sensorer

Måleriggen skal utføre ulike målinger på motor/rotor/ESC kombinasjoner, og trenger derfor en rekke sensorer for å kunne samle inn nødvendige data. Sensorene sørger for opplysninger og måldata brukeren har behov for. Noen av sensorene genererer data som beskriver dronens yteevner, mens andre genererer data som beskriver omgivelsene ved måling. Sensorene er koblet opp til Arduino DUE som vist i vedlegg 11, med følgende komponenter:

- HX711 ADC
- MBP 180 Barometer
- KY-033 (inneholder TCRT5000)
- Waveshare Micro SD Storage Board
- Egendesignet kretskort for måling av strøm og spenning

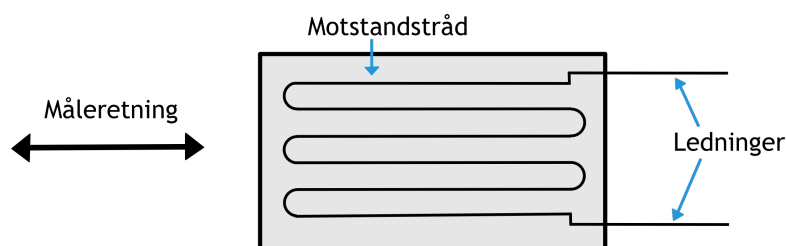
### 6.3.1 Løftekraft

Når motoren til en drone får tilført et pådrag vil propellen på dronen begynne å rotere. Dersom pådraget øker vil hastigheten på propellen øke. Når propellen roterer genererer den et løft. Løftet øker når hastigheten på propellen øker. Måleriggen skal kunne måle dette løftet for å avgjøre hvor mange gram propellen kan løfte ved et gitt pådrag. For å måle løftekraften til en motor/rotorkonfigurasjon må vi bruke et måleinstrument som er nøyaktig og har et stort virkningsområde. En vanlig metode for å måle trykk eller løft er bruk av lastcelle. Det er undersøkt oppbyggingen til lastcellen, hvordan den fungerer og om den er egnet for å måle løftekraft i dette prosjektet.

### 6.3.2 Streklapp

I en lastcelle brukes streklapper, dette er en lapp med en motstandstråd. Motstanden blir kontinuerlig målt i tråden og motstanden vil endre seg ved deformasjoner. Denne tråden er lagt i avlange slynger som gjør at den er følsom for deformasjon i lengderetningen med slyngene("måleretning" på fig. 6.3), men ikke i retning som ligger vinkelrett på. Streklappen er koblet til ledere med

vesentlig større tverrsnitt og svært lav motstand. Dette gjør at strekkappen er bare 1 - 2% følsomhet for deformasjon i denne retningen som i lengderetningen.



Figur 6.3: Strekkapp

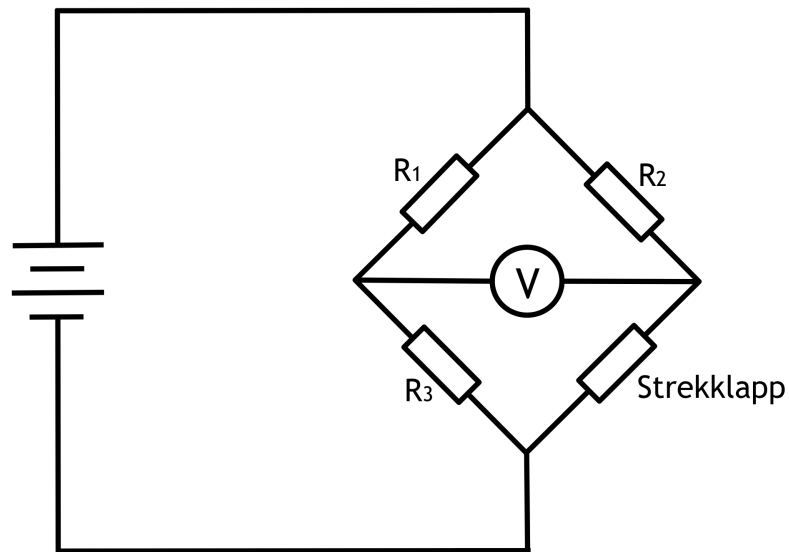
Endringen i motstand vil være av veldig lav verdi, ofte til verdier under én hundredels-ohm. Derfor må signalene man ender opp med forsterkes før man kan lese av fornuftige verdier. Siden formelen for motstand i en leder er  $R = \frac{\rho L}{A}$  vil motstanden i strekkappen øke om den strekkes i lengderetning slik at tverrsnittet av lederen blir mindre, og bli større om strekkappen komprimeres i lengderetning.

Man vil kunne merke en endring i motstand som et resultat av dimensjonsendringer som kommer fra temperaturendringer i omgivelsene. Derfor er det normalt å bruke en såkalt "dummy gauge", denne monteres enten et annet sted, eller vinkelrett på strekkappen som måler last slik at man er sikre på at temperaturendringene er medregnet. Dette gjøres ved at dummy gauge ikke settes i samme arm i broen som den originale strekkappen.

### 6.3.3 Wheatstone bro

Strekkappen blir lagt i en bro med tre andre motstander, denne broen har to armer. Én arm bestående av strekkappen og en annen konstant motstand, den andre armen består av to konstante motstander, (se fig. 6.4). Det er også mulig å ha en bro-konfigurasjon med flere strekkapper, enten én strekkapp, to strekkapper eller fire strekkapper. I konfigurasjonen som vises i denne figuren vil strekkappen bli plassert som  $R_4$ . Motstandene  $R_1$ ,  $R_2$  og  $R_3$  settes med samme motstand som strekkappen har i upåvirket tilstand, vanligvis  $350\Omega$ .

I punktet  $V$  måles spenningsforskjellen mellom disse to armene. Når strekkappen ikke er belastet får man ut en spenningsforskjell lik 0. Ved deformasjon av strekkappen vil det gjøre utslag i avlesning av spenningsforskjellen slik at denne blir enten under eller over 0, avhengig av hvilken vei deformasjonen skjer [16].

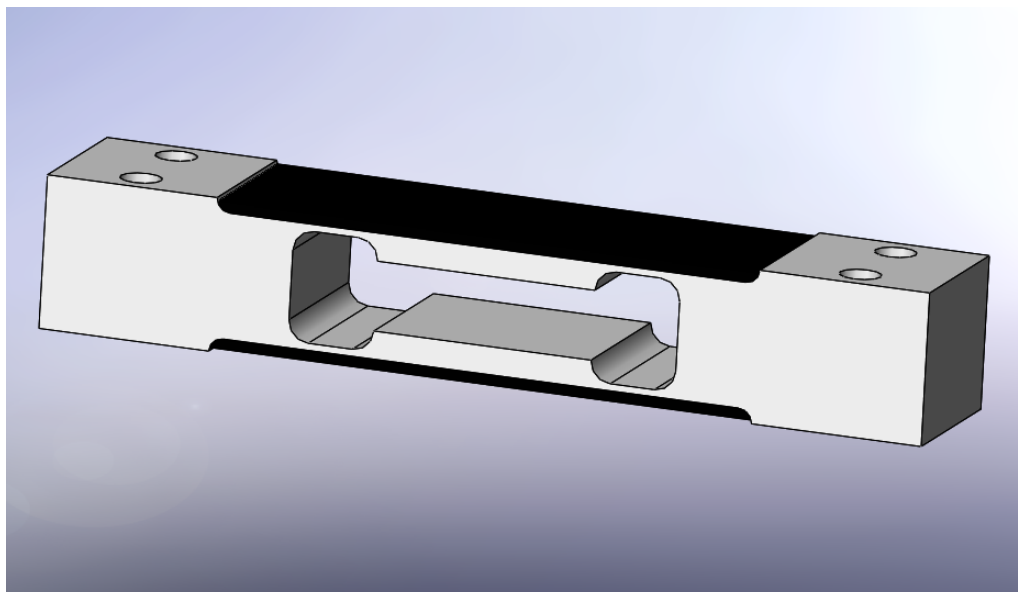


Figur 6.4: Wheatstone bro

### 6.3.4 PC22 - Lastcelle

Wheatstone broen blir brukt på en såkalt lastcelle. Lastceller kommer i mange forskjellige konfigurasjoner, vi har valgt å bruke en type laget i aluminium med pålimt strekklapper og med utfrest spor i senter. Lastcellen kommer ferdig maskinert med M6 gjenger for enkel innfestning. Lastcellen vi kommer til å bruke i vårt prosjekt er et rektangulært, avlangt metallstykke med hull som er maskinert inn for å lett kunne deformeres (se fig. 6.5).





Figur 6.5: Lastcelle

I figuren som vises her vil strekkklappene sitte under det svarte belegget midt på cellen, både på over- og undersiden. Strekkklappene vil følge deformasjonen til lastcellen, dersom man setter en last ytterst på lastcellen vil oversiden av cellen forlenges og undersiden vil komprimeres. Dermed blir strekkklappen på oversiden forlenget og motstanden øker, strekkklappen på undersiden komprimeres og motstanden minker.

Alle lastceller er klassifisert opp til en viss last. Det vil si at den tåler laster opp til dette punktet med en viss sikkerhetsfaktor. Det åttetallsformede hullet i midten av lastcellen sørger for denne klassifiseringen. Grunnen til dette er at når en last festes på cellen vil den bøyes. Størrelsen på dette hullet vil ha noe å si for lasten cellen blir godkjent for. For at lastcellen skal kunne måle små laster nøyaktig må dette hullet være relativt stort og tillate små laster å deformere cellen. Dette gjør at lastcellen ikke vil være egnet for både veldig små og veldig store laster, da en stor last på for eksempel 50 kg vil knekke en celle som er klassifisert opp til 5 kg.

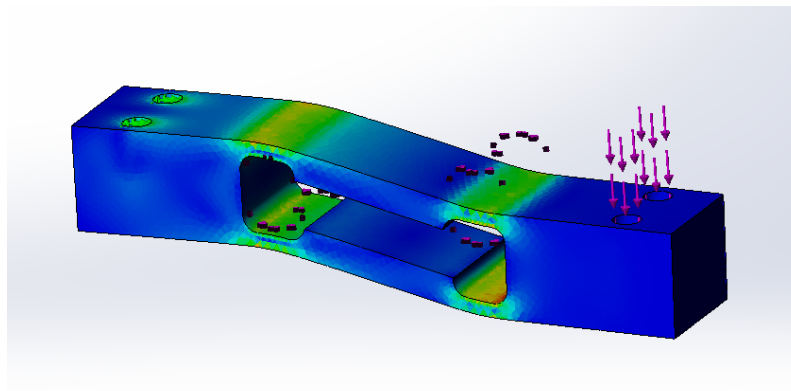
Bakgrunnen for vårt valg av lastcelle er et behov for å kunne måle laster av både positiv og negativ verdi. Det vil si at motor/rotor/esc konfigurasjonen skal kunne generere løftkraft både opp og ned, dette for å akkommodere for variabel pitch.

Vi valgte å gå for en lastcelle som er klassifisert opp til 5 kg, dette valget ble

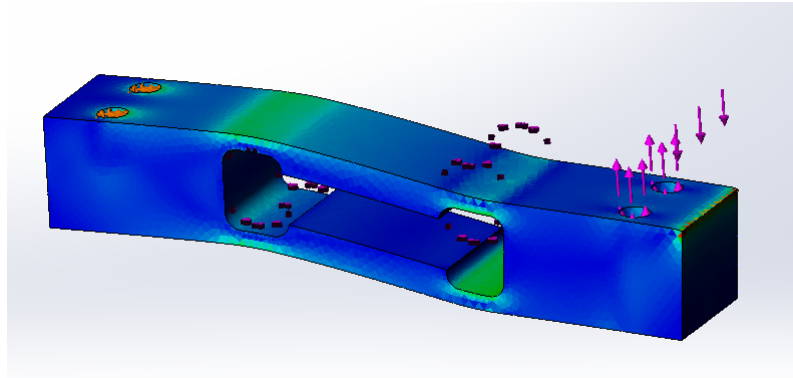
tatt på bakgrunn av begrensingene i oppgaven. Ifølge kravspesifikasjonen skal vi ikke måle løftekraft på mer enn 3,9 kg. Den lastcellen vi kunne få tak i som var klassifisert for denne vekten var en laget for å måle opptil 5kg. Denne klassifiseringen vil også være nøyaktig nok for veldig små endringer i løftekraft.

Valg av lastcelle falt på *PC22 Single Point Load Cell* fra Flintec som er klassifisert opp til 5 kg [8].

Denne lastcellen har en egenskap som gjør den lite sensitiv for hvor kraften virker. Med andre ord vil forskjellig momentarm gi samme verdi for målt motstandsending i strekkappene. Denne egenskapen kommer fra designet på hullet i lastcellen. "Brille"-formen gir lastcellen en variert spenningstilstand langs lengderetningen når den blir utsatt for en last. Prinsippet kalles *Double/multiple bending beam* og er utbredt ved utvikling av lastceller.



Figur 6.6: Punktlast gjennom skruerhull

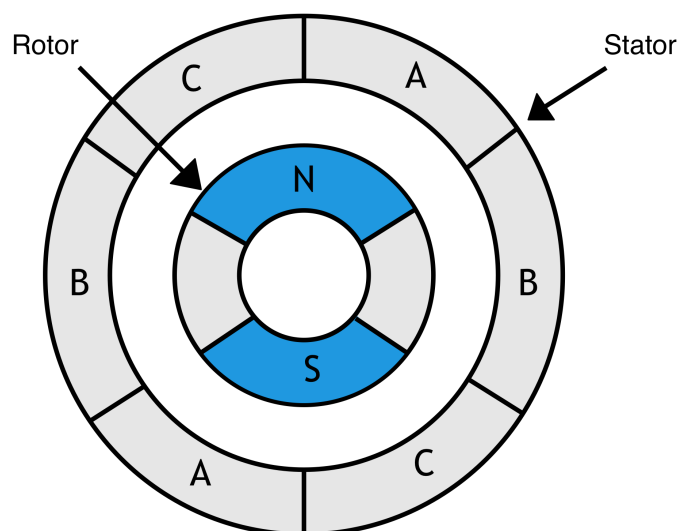


Figur 6.7: Tilsvarende punktlast med en 100mm arm

En FEM-analyse av lastcellene viser hvordan en double-bending beam oppfører seg når den blir utsatt for en last. På figur 6.6 er lastcellen utsatt for en  $50N$  last gjennom skruhellene. På figur 6.7 er den samme lastcellen utsatt for resultanterkrefter tilsvarende samme last med en momentarm på  $100mm$ . Til sammenlikning er det forskjell i spenning mellom de to, men gjennomsnittet av forlengelse der strekkklappene sitter er det samme.

Tatt i betraktning at innfestingen av motorer i måleriggen gjør slik at momentarmen for skyvekraften vil være lik for alle testobjekter er det ikke så vesentlig. Det vil likevel eliminere en kilde til målefeil dersom motorer ikke innspennes etter design.

### 6.3.5 Rotasjons hastighet



Figur 6.8: Stator og rotor i børsteløs DC motor

En børsteløs DC motor består av en sekvens av stator spoler og en permanentmagnet rotor. Ved å tilføre et DC-signal vil to spoler tvers ovenfor hverandre tilføres energi og fungere som en elektromagnet. Elektromagneten vil danne et magnetfelt med to poler. Rotorens to poler vil tiltrekkes statorens to motsatte poler. Dette fører til at motoren roterer. Oftest blir det benyttet en hall effect sensor som registrerer rotorens posisjon. Transistorer benyttes for å skifte strømretning, noe som igjen fører til et skifte av polaritet på elektromagneten. Når rotoren nærmer seg elektromagnetens motsatte pol vil dette fanges opp av hall effect sensoren som setter i gang prosessen med å tilføre energi til neste par med poler og skifte polaritet. Dette gjør at motoren fortsetter og rotere i samme retning [17]. Ved økt pådrag til motor vil rotasjons hastigheten øke. Denne rotsasjonshastigheten måles i RPM, som står for rotasjon per minutt.

Å kunne måle rotasjons hastigheten til motoren på dronen er satt som et B-klassifisert krav fra kunde. Det har blitt undersøkt to ulike sensorer for avlesning av rotasjons hastighet. Den ene er US1881 fra Melexis som er en hall effect sensor, mens den andre er TCRT5000 fra Vishay som er en reflekterende optisk sensor.

### 6.3.6 US1881 - Hall effect sensor

Hall effect sensor er en form for magnetisk sensor. Denne typen sensor konverterer magnetisk informasjon til elektriske signaler. Hall effect sensorer består hovedsaklig av et tynt lag med et P-type halvledermateriale hvor det passerer strøm. Den blir aktivert av et eksternt magnetfelt, og utgangssignalet er en funksjon av magnetfeltets tetthet og polaritet. Når et magnetfelt nærmer seg sensoren vil magnetfeltets flukslinjer utøve en kraft på halvledermaterialet, og strømbærere vil føres til en av materialets sider. Forflytningen av strømbærere er et resultat av den magnetiske kraften som påføres halvledermaterialet når de passerer gjennom. Når strømbærere forflyttes til den ene siden av materialet vil dette forårsake en potensiell differanse mellom de to sidene av materialet. Dette fører til en målbar utgangsspenning.

Utgangssignalet gir informasjon om polariteten og omfanget av magnetfeltet. Ofte er hall effect sensorer og brytere designet slik at systemet er i en åpen krets tilstand, dermed "av", når det ikke er et magnetfelt i nærheten. Når et magnetfelt nærmer seg sensoren med tilstrekkelig omfang og korrekt polaritet vil systemet gå over til en lukket krets tilstand, og vil dermed være "på" [18].

Et utgangssignal fra hall effect sensoren kan være både analogt og digitalt. Det analoge signalet vil bestå av en utgangsspenning som er proporsjonal med magnetfeltet sensoren fanger opp. Utgangsspenningen er representert ved

$$V_H = R_H \left( \frac{I}{t} \cdot B \right)$$

Hvor:

$V_H$  = Utgangsspenningen (V)

$R_H$  = Hall effect koeffisient

$I$  = Strømmen i sensoren (A)

$t$  = Tykkelsen på sensoren (mm)

$B$  = Magnetisk fluks

Et digitalt utgangssignal vil være høyt eller lavt avhengig av polaritet.

Sensoren vi har undersøkt er Melexis US1881. Dette er en unipolar sensor som benytter seg av CMOS teknologi. På tross av at den er unipolar krever den begge poler for å kunne operere optimalt. Vi benyttet oss av versjonen i UA pakning. Utgangssignalet er høyt ved nord-pol og lavt ved sør-pol [19].

US1881 ble koblet opp til Arduino Due i henhold til datablad. Det ble satt opp

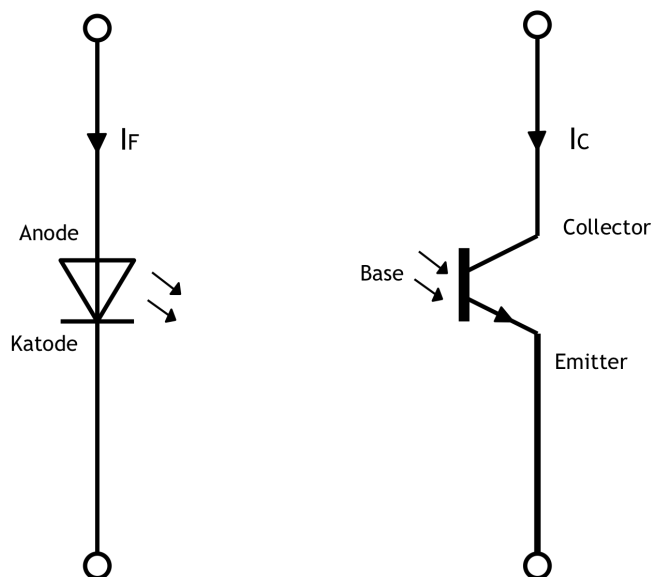
en programkode for å lese av polariteten på magnetfelt. Vi brukte en magnet for å undersøke om sensoren oppfattet bytte av polaritet. Vi snudde magneten 180 grader gjentatte ganger slik at det ble vekslet mellom nord-pol og sør-pol. Sensoren oppfattet bytte av polaritet og vi fikk skrevet ut riktig informasjon på Arduino sin serial monitor. Deretter ble det forsøkt å sette sensoren inntil en 3DR Solo motor som roterte. Sensoren klarte ikke å fange opp endring i polaritet fra magnetfeltet i motoren. En mulig løsning ville være å feste en liten magnet på siden av motoren slik at sensoren kunne fanget opp et signal for hver gang magneten passerte sensoren. Vi valgte å ikke gå videre med denne sensoren og heller se på muligheten for å bruke annen teknologi for å lese rotasjonshastighet.

### 6.3.7 TCRT5000 - Optisk sensor

Vishay TCRT5000 er en lysreflekterende optisk sensor. Den består av en infrarød emitter og en bipolar fototrasistor i en pakning som blokkerer synlig lys [20]. En lysreflekterende sensor konverterer lys til elektriske signaler. Mer spesifikt blir fotoner, som er lysenergi, konvertert til elektroner, som er elektrisitet.

En transistor består av tre dopede halvledere, base, collector og emitter. Disse er separert av to pn-overganger. Det finnes to forskjellige transistorer av denne typen. Den ene typen er pnp, som består av to p-regioner separert av en n-region. Den andre typen er npn, som består av to n-regioner separert av en p-region. TCRT5000 benytter seg av en transistor av typen npn. Uttrykket «bipolar» kommer av at transistoren bruker både hull og elektroner som strømbærere.

En fototransistor er i utgangspunktet en fotodiode med forsterkning. Fototransistoren kan oppfatte både synlig lys og lys i det infrarøde spekteret. Fordi TCRT5000 har en kapsling som blokkerer synlig lys vil denne sensoren oppfatte lys i det infrarøde spekteret. Dette har som hensikt å blokkere ut dagslys slik at dette ikke har noe innvirkning på sensorens målinger.



Figur 6.9: Infrarød diode og fototransistor

Pn-overgangen ved collector-base blir utsatt for lys gjennom en linse i sensorpakningen. Strømmen inn til basen på fototransistoren produseres når lyset treffer det fotosensitive halvledende base-området [21]. Dersom sensoren ikke blir utsatt for lys vil det kun gå en liten strøm gjennom basen på typisk 10 nA. I pakningen er det en infrarød diode og fototrasistor som er koblet inn ved siden av hverandre. På samme måte som transistoren har en pn-overgang mellom collector og base har dioden en pn-overgang mellom anode og katode. Dioden har en transparent åpning som tillater lys å treffe pn-overgangen. Dersom intensiteten til lyset som treffer dioden øker vil også strømmen gjennom dioden øke. Denne intensiteten er uttrykt ved  $mW/cm^2$ . Intensiteten til det infrarøde lyset dioden avgir vil øke når strømmen øker. Det er dette infrarøde lyset som treffer basen til fototransistoren.

Sensoren vil gi et analogt utgangssignal som representerer intensiteten på lyset som treffer den. Fordi pakningen blokkerer dagslys vil dette ikke ha noen innvirkning på utgangssignalet. Oppsettet av denne sensoren er godt egnet for å oppdage reflekterende materiale. Vi har valgt å feste en hvit teipbit på motoren. Når motoren roterer vil sensoren registrere den hvite teipbiten som roterer forbi sensoren. For å kunne bestemme rotasjonshastighet har vi valgt å koble utgangssignal i en digital inngangsport. Dette er mulig fordi strømmen som går gjennom sensoren når den treffer det svarte feltet på motoren er så lav at det analoge signalet tolkes som "0" av mikrokontrolleren. Når sensoren passerer den hvite teipen vil det analoge utgangssignalet øke og tolkes som "1"

av mikrokontrolleren. Disse signalene blir behandlet i programkoden og brukes ut til å regne ut rotasjonshastigheten på motoren.

### 6.3.8 Temperatur og lufttrykk

Når det kommer til temperaturmåling er det to ulike temperaturer som skal måles. Det ene er temperaturen i omgivelsene målingene blir utført og det andre er temperaturen på motoren som blir brukt under måling. For å kunne måle disse temperaturene er det nødvendig med to ulike temperatursensorer. Temperaturmåling av motor er ønskelig for å overvåke at motoren ikke blir for varm og brenner opp. Det gjør det også mulig å legge inn et sikkerhetstiltak i programkoden ved at målingen stoppes dersom motortemperaturen stiger over en satt verdi. Måling av temperatur og lufttrykk i måleomgivelsene er ønskelig for da er det mulig å dokumentere under hvilke forhold motor/rotor/ESC-kombinasjonene ble målt.

### 6.3.9 TMP36

TMP36 er en temperatursensor som laget av Analog Devices. Nøkkelspesifikasjoner er hentet fra datablad [22] og listet opp i tabell 6.3.

Tabell 6.3: Spesifikasjoner for TMP36

TMP36	
Driftsspenning	2.7-5.5V
Måleområde	-40C - 125C
Skaleringsfaktor	10mV/C
Nøyaktighet	±2C
Offset spenning	0.5V

TMP36 produserer et analogt utgangssignal som endres proporsjonalt med temperaturen. Den er allerede kalibrert i forhold til celcius, noe som er fordelaktig da vi ønsker å presentere måleresultatene. Sensoren ligger inne i en lett pakning som gjør den veldig sensitiv for temperaturendringer. I utgangspunktet var tanken å bruke denne sensoren til å måle temperatur på motoren. Den er enkel å bruke og lett å implementere i en programkode. Ulempen med denne sensoren er at den da eventuelt må stå så nær objektet den skal måle som mulig. Dette gjør den bedre egnet til å måle temperatur i omgivelser. Det ble undersøkt en mulighet for å lage plass til denne sensoren i



braketten motoren er festet til på måleriggen. På den måten ville sensoren ligge rett under motor, og det ville være mulig å måle motorens temperatur. Dette viste seg å være vanskelig å implementere i praksis, og på bakgrunn av dette ble det tatt en avgjørelse om å ikke inkludere denne sensoren i måleriggen.

### 6.3.10 MLX90614

MLX90614 er en temperatursensor som laget av Melexis. Nøkkelspesifikasjoner er hentet fra datablad [23] og listet opp i tabell 6.6.

Tabell 6.4: Spesifikasjoner for MLX90614

MLX90614	
Driftsspenning	5V
Måleområde (objekt)	-70C - 380C
PWM oppløsning	10 bit
Nøyaktighet	$\pm 0.5C$
Måleoppløsning	0.02C

MLX90614 er en infrarød temperatursensor. Den produserer et digitalt utgangssignal som forteller temperaturen på objektet den måler. Den har et integrert støyfilter, 17 bit ADC og en kraftig signalbehandlingsenhet som sørger for høy oppløsning og nøyaktighet. Denne sensoren er tiltenkt å måle temperatur på motoren under måling. Fordelen med denne sensoren er at den er infrarød og ikke trenger direkte kontakt med objektet det skal måle. Den kan da plasseres i nærheten av objektet, og dette gjør det mulig å implementere den på måleriggen. På bakgrunn av dette ble sensoren implementert i en sensorarm som kan plasseres ved siden av motoren.

Ulempen med denne sensoren er at den benytter seg av SMBus sin SDA og SCL pin for å sende og motta signaler, noe som har vist seg å kreve mer avansert programmering for at den skal fungere med SA3X8E mikrokontroller. Det er også mulig å benytte PWM i stedet for SDA.

### 6.3.11 BMP180

BMP180 er en kombinert lufttrykk- og temperatursensor som laget av BOSCH. Nøkkelspesifikasjoner er hentet fra datablad [24] og listet opp i tabell 6.5.

Tabell 6.5: Spesifikasjoner for BMP180

BMP180	
Driftsspenning	1.8 - 3.6V
Måleområde (trykk)	-500mb - 9000mb
Måleoppløsning (trykk)	1.1mb
Målenøyaktighet (trykk)	$\pm 1$ mb
Måleområde (temperatur)	-40C - 85C
Måleoppløsning (temperatur)	$\pm 0.1$ C
Målenøyaktighet (temperatur)	$\pm 2$ C

BMP180 produserer et digitalt utgangssignal som inneholder informasjon om lufttrykk og temperatur. Den er basert på piezo-resistent teknologi for å sikre høy målenøyaktighet og stabilitet. Den er fabrikkalibrert med kalibreringskoeffisientene lagret på ROM. Denne sensoren skal brukes til å måle temperatur og lufttrykk under måling. Dette er fordi det skal være mulig å se under hvilke forhold måledatene for motor/rotor/ESC-kombinasjonene ble oppnådd. Sensoren er enkel å koble opp og enkel å bruke, spesielt da det allerede finnes tilhørende biblioteker som kan brukes i programkoden og som letter på programmeringsjobben. Eneste ulempen med sensoren er at den bruker litt tid for å oppnå korrekt måleresultat og sende dette til mikrokontrolleren. Dette blir ansett som et svært lite problem da lufttrykket kun trengs å måles én gang, og ikke overvåkes kontinuerlig. På bakgrunn av dette ble denne sensoren implementert i måleriggen.

### 6.3.12 Effekt

Virkningsgraden til en drone er en viktig faktor for å kunne ta en god beslutning når det kommer til design av dronen. Virkningsgraden forteller hvor mange gram en drone løfter per watt (g/W). Det forteller noe om hvor lang flyvetid dronen har og hvor mye den kan løfte. Informasjonen om virkningsgraden gjør det mulig å finne eventuelle nødvendige endringer i design for å oppnå optimal ytelse i henhold til bruksområde.

For å kunne finne virkningsgraden er det først nødvendig å finne effekten dronen forbruker ved pådrag. Da måles strøm og spenning mellom batteriet og ESC. Dette brukes til å regne ut effekten i watt, som kan beskrives ved

$$P(W) = U(V) \cdot I(A) \quad (6.1)$$

### 6.3.13 Motstand

Første mulighet er å bruke en kjent lav-ohmig motstand. Motstanden kobles mellom batteri og ESC. Deretter kobles det inn en spenningsdeler for å regulere ned spenningen på signalet før det ble koblet videre inn i en av mikrokontrollerens ADC innganger. Spenningsfallet over motstanden beskrives som vist i (6.2).

$$U_R = R \cdot I \quad (6.2)$$

Det vil si at ved å måle spenningen etter motstanden er det mulig å finne både strøm og spenning mellom batteri og ESC. Spenningen etter motstanden vil være lik spenningen ut fra batteriet minus spenningsfallet over motstanden. Med utgangspunkt i dette er det mulig å finne hvor mye strøm ESC'en trekker.

$$U_2 = U_1 - U_R \quad (6.3)$$

$$U_2 = U_1 - (R \cdot I) \quad (6.4)$$

$$I = \frac{U_1 - U_2}{R} \quad (6.5)$$

Hvor:

$U_1$  = Spenningen ut fra batteriet (V)

$U_2$  = Spenningen etter motstanden (V)

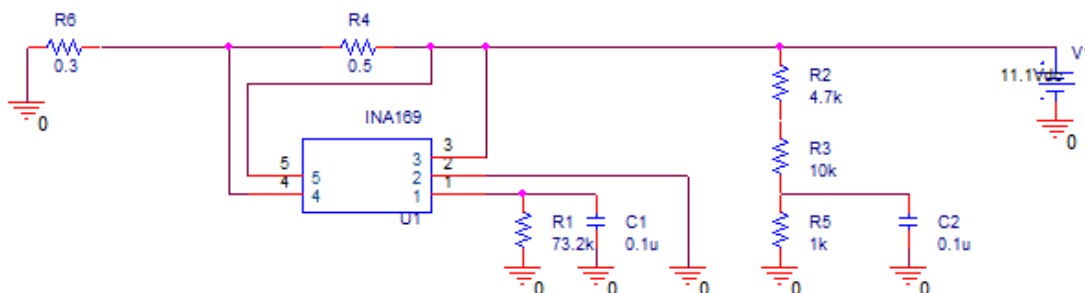
$R$  = Resistansen i motstanden ( $\Omega$ )

$I$  = Strømmen ECS'en trekker (A)

Måleriggen skal kunne måle strøm og spenning opp til henholdsvis 40A og 30V. Det vil si at dersom motstanden som velges er for høy, vil spenningsfallet over motstanden bli veldig stor. Dette medfører urealistiske måleresultater da det ikke vil være et like stort spenningsfall under reel flyvning. På den andre siden vil en veldig liten motstand gi veldig liten spenningsforskjell mellom  $U_1$  og  $U_2$ , og det kan bli vanskelig for mikrokontrolleren å finne nøyaktig verdi for strøm. Dessuten kan det være en utfordring å finne en motstand med så liten resistens som er nøyaktig nok. På bakgrunn av dette er denne løsningen ikke implementert i måleriggen.

### 6.3.14 AttoPilot

AttoPilot er en strøm og spenningsmåler levert av ArduPilot. Denne sensoren baserer seg på Texas Instruments sin INA169 som er en current shunt monitor. Kretsen er satt opp som vist i fig. 6.10 [25], hvor  $R_6$  representerer ESC'en og  $V_1$  representerer batteriet.



Figur 6.10: AttoPilot skjemategning

INA169 konverterer spenningsforskjell til strøm. Deretter blir strømmen konvertert tilbake til spenning med en forsterkning som avhenger av lastmotstanden ( $R_1$  på fig. 6.10). Med en lastmotstand på  $73.2k\Omega$  vil forsterkningen være ca. 73.2. Det er lagt til et filter for å filtrere bort de høyeste frekvensene som skaper støy i utgangssignalet. Spenningen som blir lest av fra batterier går gjennom en spenningsdeler for å skalere ned spenningen slik at den kan måles av mikrokontrolleren.

Dette så i utgangspunktet ut som en god løsning, og vi implementerte denne i måleriggen da vi mottok produktet fra SparkFun Electronics. Databladet spesifiserte at den var kompatibel med mikrokontrollere som hadde en driftsspenning på 3.3V så lenge tilført spenning ikke overgikk 51.8V. Allerede etter første test med AttoPilot brant mikrokontrolleren opp. Batteriet som da var koblet til systemet hadde en spenning på 11.1V, altså godt innenfor kravet. Etter en simulering av kretsen i OrCad PSpice kommer det frem at utgangssignalet som representerer strømmen i kretsen leverer langt mer en 3.3V. Simuleringen tar utgangspunkt i batteriet som leverer en spenning på 11.1V og at ESC'en trekker 13.9A, noe som er realistisk i forhold til testen som ble utført. Simuleringen viste at mikrokontrolleren da må ha mottatt hele 10.3V, altså over 3 ganger mer enn maks tillatte spenning på inngangspinne. Resultatet av simuleringen er vist i vedlegg 5.

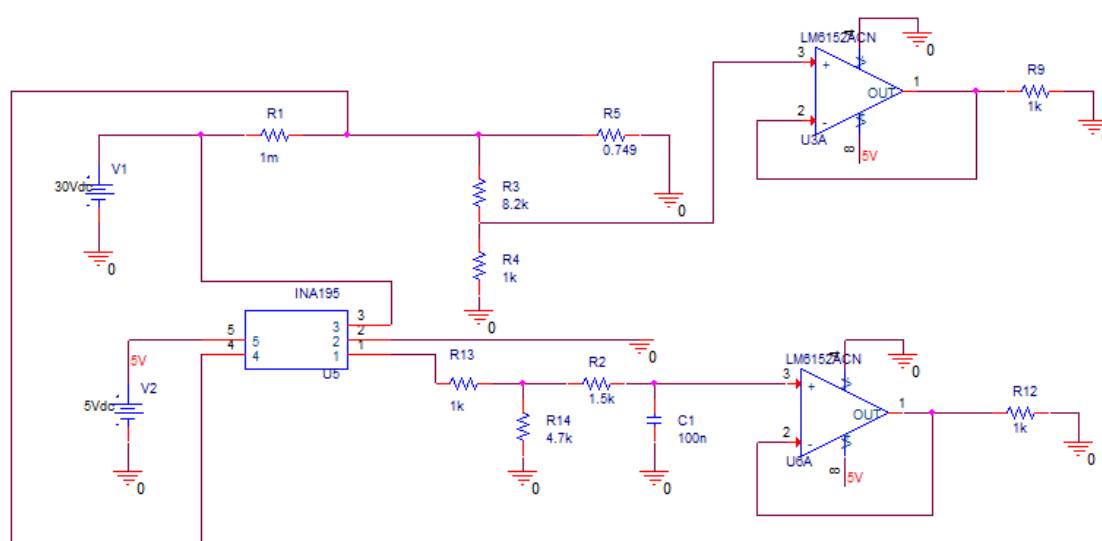
På bakgrunn av dette ble vi nødt til å finne en ny løsning for måling av strøm og spenning.

## 6.4 Kretskortdesign

Å kunne måle virkningsgrad er et A-krav i dette prosjektet. For å kunne oppnå dette er det nødvendig å sette opp en krets som muliggjør strøm- og spenningsmåling. Det er på forhånd undersøkt ulike måter for å måle strøm og spenning, men den beste løsningen for dette prosjektet vil være å sette opp et kretskort.

### 6.4.1 Kretsdesign

Måleriggen skal kunne måle virkningsgrad for systemer som krever opp til 30V og 40A. Dette er høy strøm og spenning, og det krever at designet er tilpasset dette. En annen viktig faktor i kretsen er at den ikke kan skape store spenningsfall som hindrer systemet i å få tilstrekkelig med spenning tilført under måling. Skjemategning til kretsen er vist i fig. 6.11. Det er gjort en simulering av kretsen som er lagt ved i vedlegg 7.

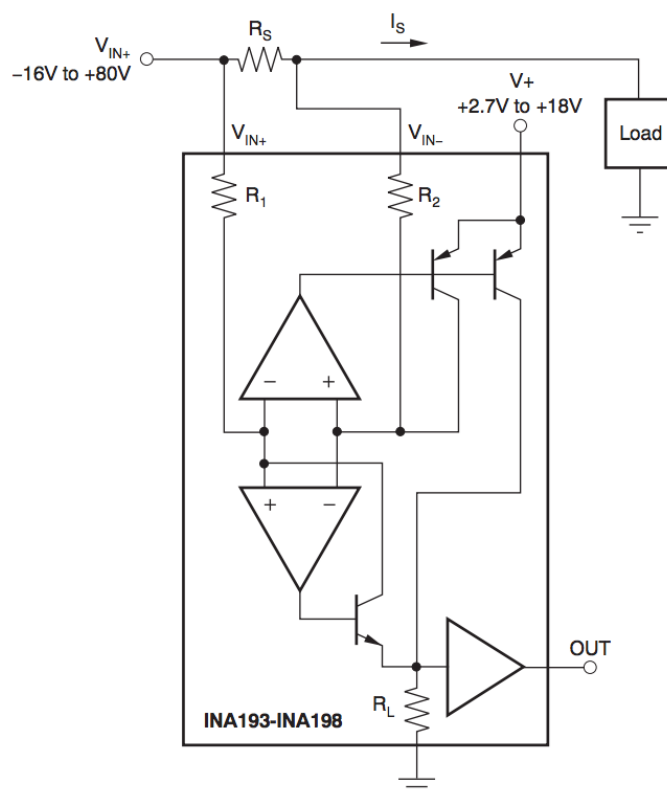


Figur 6.11: Skjemategning for kretsen

Hovedkomponenten i kretsen er INA195. Det er også lagt til nødvendige tilleggskomponenter for at kretsen skal måle strøm og spenning, og skalere ned utgangssignalet slik at den kan kobles til mikrokontrolleren som skal behandle

signalet. Det er lagt til en last ( $R_5$  i fig. 6.11) som representerer ESC'en. Dette er gjort for å kunne simulere kretsen.

### INA195



Figur 6.12: INA193-INA198 [26]

INA195 er en current shunt monitor som brukes for å måle strømmen som går gjennom en shunt resistor [27]. Den måler spenningen ved  $V_{IN+}$  og  $V_{IN-}$ , og bruker spenningsforskjellen til å bestemme strømmen gjennom resistoren. Spenningsforskjellen blir først konvertert til strøm. Deretter blir signalet konvertert tilbake til spenning før det blir forsterket og kan måles ved utgangen som er plassert på pin 1.

Valg av shunt resistor påvirker nøyaktigheten på målingen, samt utgangssignal. En motstand med høyere resistans vil føre til mer nøyaktig målinger ved lav strøm, mens en motstand med lavere resistans vil føre til lavere spenningstap over motstanden.

I kretsen er  $R_S$  valgt til  $1m\Omega$ . Dette gir et spenningsfall på maksimalt  $0.04V$ , noe som er akseptabelt.  $R_L$  har en resistans på  $500k\Omega$ . Utgangssignalet beskrives ved likning (6.6), og høyeste utgangssignal i henhold til bestemt måleområde er beregnet i likning (6.7).

$$V_{OUT} = \frac{I_S R_S R_L}{5k\Omega} \quad (6.6)$$

$$V_{OUT} = \frac{40A \cdot 1m\Omega \cdot 500k\Omega}{5k\Omega} = 4V \quad (6.7)$$

### Spenningsdeler

Det er benyttet to spenningsdelere i kretsen. Disse er satt inn for å regulere ned utgangs-signale for strøm og spenning sånn at de kan kobles inn i mikrokontrolleren og leses av i ADC inngangene. Spenningen ut fra spenningsdeleren er beskrevet i likning (6.8).

$$V_{OUT} = V_S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6.8)$$

Når spenningen skal måles blir signalet lest av foran inngangen til ESC'en. Her vil det være en spenning på opp til  $30V$  som må reguleres ned til  $3.3V$ . Ved å velge to motstander med verdi på henholdsvis  $1k\Omega$  og  $8.2k\Omega$  vil utgangsspenningen reguleres til  $3.260V$  som vist i likning (6.9).

$$V_{OUT} = 30V \cdot \frac{1k\Omega}{8.2k\Omega + 1k\Omega} = 3.260V \quad (6.9)$$

Signalet ut fra INA195 brukes til å bestemme strømmen gjennom shunt motstanden. Maksimal spenning på dette signalet vil være  $4V$  i henhold til likning (6.7). Denne spenningen må også reguleres ned til  $3.3V$ . Ved å velge to motstander med verdi på henholdsvis  $1k\Omega$  og  $4.7k\Omega$  vil utgangsspenningen reguleres til  $3.298V$  som vist i likning (6.10).

$$V_{OUT} = 4V \cdot \frac{4.7k\Omega}{1k\Omega + 4.7k\Omega} = 3.298V \quad (6.10)$$



### 6.4.2 Filter

For å unngå støy fra ESC på utgangssignalet er det satt inn et lavpass filter etter utgangen på INA195. Filteret er satt sammen av en kondensator og en motstand. Knekkfrekvensen på filteret bør ligge på rundt 1kHz. Filterets knekkfrekvens er beskrevet i likning (6.11).

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (6.11)$$

Ved å velge en kondensator på 100nF og en motstand med en resistans på 1.5k $\Omega$  vil gi en knekkfrekvens på 1.061kHz som vist i likning (6.12).

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 1.5k\Omega \cdot 100nF} = 1.061kHz \quad (6.12)$$

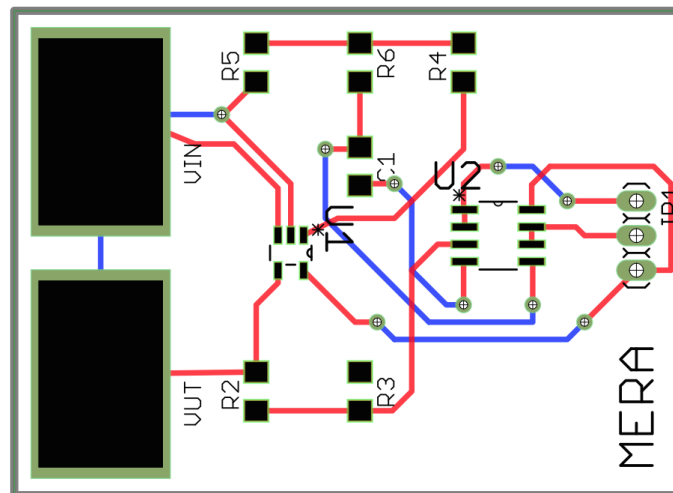
### Operasjonsforsterker

Det er brukt to operasjonsforsterkere i kretsen. Det er brukt LM6152. LM6152 har rail-to-rail utgangssignal slik at det ikke trengs å tilføre negativ spenning, men kobles til +5V og jord [28]. Operasjonsforsterkerene er koblet opp opp som ikke-inverterende spenningsfølger. De er koblet til utgangssignalene slik at signalene går gjennom operasjonsforsterkerene før de går videre inn i de analoge inngangene. Dette er fordi mikrokontrolleren kun behandler et analogt signal om gangen som er koblet inn i de analoge inngangene. En multiplekser bytter mellom signalene. En kondensator mellom multiplekseren og ADC'en sørger for at signalet holdes slik at den blir korrekt avlest. Deretter må kondensatoren utlades. Operasjonsforsterkeren er med på å holde signalene for å redusere måleusikkerhet.

### 6.4.3 Kretskortdesign

For å kunne bruke kretsen som strøm- og spenningsmåler mellom batteri og ESC ble det designet et kretskort. Kretskortet har to åpne loddeflater hvor det skal loddes på ledninger med Deans pluggen som skal kobles mellom batteri og ESC. Utfordringen med dette kretskortet er at det skal gå så mye som 40A gjennom det. Dersom all denne strømmen skulle gått gjennom baner i kretskortet ville det ha krevd et veldig tykt kobberlag og veldig brede baner. Dette var ikke en realistisk løsning. Løsningen på problemet ble å koble shuntresistoren direkte på

loddeflatene. Loddeflatene har et større areal og er på eksternt lag, noe som gjør denne løsningen egnet i forhold til strømmen som skal gjennom. Designet til kretskortet er vist i fig. 6.13.



Figur 6.13: PCB design

De rødt banene går på oversiden til kretskortet, mens de blå går på undersiden. Shunt motstanden er ikke lagt inn i PCB designet, men den skal kobles inn mellom  $V_{IN}$  og  $V_{UT}$ . Avstanden er målt opp for å passe størrelsen på motstanden. Det er valgt en shunt motstand som tåler opptil 3W, da simuleringer av kretsen viser en effekt på hele 1.6W over motstanden (se vedlegg 7).

Tabell 6.6: Spesifikasjoner for kretskort

Kretskortdesign	
Antall lag	2
Kobberlag	35m
Maks tillatte spenning	30V
Maks tillatte strøm	40A
Forhold mellom målt spenning og utgangssignal	0.11V/V
Forhold mellom målt ampere og utgangssignal	0.0825V/A

## 6.5 Måleriggens oppløsning

Målerutstyr som måler absolutte verdier finnes ikke. Det er tilnærmet umulig å gjengi teoretiske verdier ved repeterte praktiske målinger uten et visst avvik. For alt industrielt måleutstyr er det oppgitt et intervall over måleverdien hvor det er en viss sannsynlighet at reell verdi befinner seg. I følge justervesenet er det standard at måleutstyr oppgir et intervall over måleverdien hvor det er 95% sannsynlighet at reell verdi befinner seg [29]. Justervesenet har også flere andre retningslinjer for standard beregning og dokumentasjon av måleusikkerhet. Denne standarden krever derimot en del utstyr som ikke er tilgjengelig for dette prosjektet. Vi vil derfor ha en mer statistisk tilnærming for beregning av usikkerhet i måleriggen.

Selv om det ikke er spesifisert noe kvantifisert krav på hvor presis måleriggen MERA skal være, siktes det til å gjøre riggen så presis som mulig. Det er derfor utviklet en plan om hvordan riggen skal kalibreres og testes for å fastslå dens nøyaktighet. Planen inneholder en oversikt over prosedyrene som er fulgt og drøfting av disse.

I tillegg til prosedyrene rundt kalibrering er det også definert en tabell over kildene til måleusikkerhet. Hver kilde drøftes og vurderes i henhold til hvilken innvirkning de har på målingene.

### 6.5.1 Sammenlikningsprosedyrer

Som nevnt tidligere er det ikke spesifisert noe krav angående akseptabel måleusikkerhet for måleriggen. Det vil derfor være naturlig å anslå hvilken skala av usikkerhet som er passende for måling av multikoptermotorer. Det er ikke fornuftig å investere for mye tid eller penger i å oppnå en måleusikkerhet i skalaen *mikro* eller *nano* når det er tilstrekkelig med *milli*-inkremitter (relativt til SI-enhetene sekund, kilogram, newton, watt etc.). Så av dette er det mulig å benytte seg av tilnærminger ved hjelp av offisielt kalibrert utstyr.

### Last

Ettersom det ikke finnes (nylig) offentlig kalibrert utstyr tilgjengelig på skolen må andre kilder kontaktes. Bedrifter som nærer seg hovedsaklig på salg av edelt metall har strenge lover og forskrifter angående målenøyaktighet for sitt måleutstyr. Justervesenet har etter forskrift om edelt metall meget strenge krav til måleusikkerheten ved måleutstyr til slike bedrifter [30]. De opererer med en nøyaktighet ned mot  $0.001g$ . Ved bruk av dette utstyret kan vi fastslå en referanse-last. Usikkerheten rundt denne lasten vil være neglisjerbar for alle våre praktiske formål.

Når lasten er verifisert på denne måten kan den måles i måleriggen hvor resultatene sammenliknes og passende kalibrering blir gjort. Dataene som blir produsert brukes til å beregne et gjennomsnitt  $X$  og deretter et standardavvik  $s$ :

$$X = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_i$$
$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (X_i - X)^2}$$

hvor  $n$  er antall målinger og  $X_i$  er hver enkelt måleverdi [31].

For å få gode representative verdier ved empirisk beregning av spredningsmål må man utføre et stort antall målinger. Dette vil bli uproblematisk ettersom måleriggen kan utføre mange avlesninger av en verdi på relativt kort tid. Beregning av dataene gjøres elektronisk. Dette betyr at et målesett på 1000 målinger eller fler lar seg gjøre.

### 6.5.2 Mikrokontrollerens oppløsning

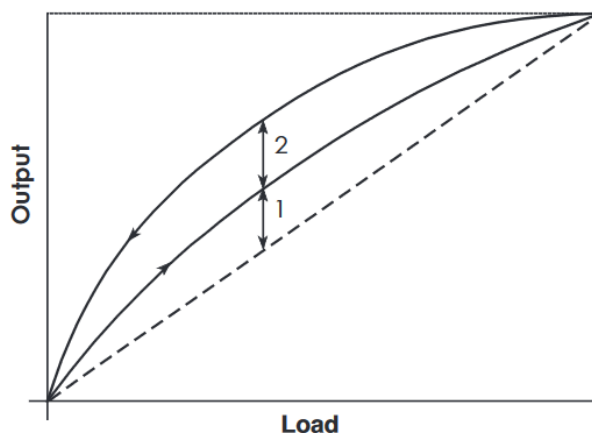
Ved måling av skyvekraft vil mikrokontrolleren sette begrensning på hvor nøyaktig dette kan gjøres. Signalet fra lastcellen er analogt og kobles til en av de analoge input-pinnene på mikrokontrolleren. Mikrokontrolleren som brukes i måleriggen har en maksimal kapasitet på 12 bits konvertering fra analoge til digitale signaler, noe som tilsvarer  $2^{12} = 4096$  forskjellige verdier. Spektrumet på signalstyrken går fra  $0V$  til  $3,3V$ , og mikrokontrolleren registrerer forskjellige verdier for spenningsforskjeller med inkremerer på  $8,06 \times 10^{-4}V$ . Ettersom

lastcellen i måleriggen sender forskjellige signaler i et intervall 0 – 5000g vil det minste inkrementet av last som kan gi to forskjellige verdier være lik 1, 22g.

### 6.5.3 Lastcellens usikkerhet

Lastcellen ble levert med et kalibreringssertifikat fra leverandøren. Sertifikatet er verifisert av og i henhold til OIML (International Organization for Legal Metrology, [32]). Her er det oppgitt de forskjellige kildene til målefeil i lastcellen.

- Lineæritet	0,010%
- Hysterese	0,008%
- Siging	0,008%
- Temperatursensitivitet	< 0,0011%/C
- Temperatureffekt ved min. last	< 0,0014%



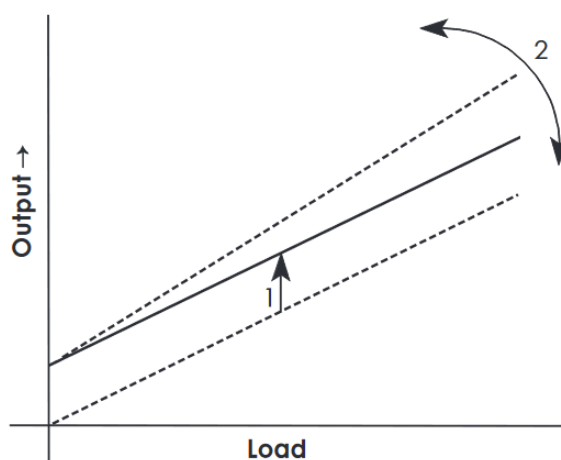
Figur 6.14: Grafisk fremvisning av lineæritetsfeil (1) og hysterese (2), VPG Transducers 2015 [33]

For lineæritet har lastcellen et avvik på opp til 0,010%. I teorien skal økning i signalet som blir avlest være proporsjonalt med økningen i last påført lastcellen. En lineæritetsfeil betyr at det er et avvik mellom relativ endring i last og relativ endring i signalet.

Hysterese er en annen kilde til målefeil i lastcellen. Elastisk hysterese er når deformasjonen i et materiale under økende last avviker fra deformasjonen under avtagende last. For deformasjon i materialets elastiske region er indre

friksjon årsaken for hysteres. Det vil si at noe av energien fra deformasjonen vil lagres som varme i lastcellen. Denne varmen vil etterhvert gå over til omgivelsene og lastcellen går tilbake til normal tilstand. Ved repetert testing over et mindre tidsintervall vil varmen akkumulere seg og bidra til målefeil. En grafisk representasjon av denne energien vil være arealet mellom kraft/strekk-kurven ved økende last og kraft/strekk-kurven ved avtagende last. For lastcellen er dette avviket på 0,008%.

Siging (*Engelsk: creep*) er et materialteknisk fenomen som kan bidra til målefeil. Siging er forsinket elastisk deformasjon i et materiale utsatt for belastning. Dette betyr at den totale deformasjonen ikke inntreffer samtidig som lasten påføres. Sertifikatet spesifiserer at etter 5 minutter er det et avvik på 0,008%. Siging er ikke problematisk for statiske målinger som ikke er avhengig av tid. Dette er derimot ikke tilfellet for måleriggen og avviket må tas med i vurderingen.



Figur 6.15: Temperatureffekt ved minimumslast (1) og temperaturfølsomhet (2), VPG Transducers 2015 [34]

Temperatur har innvirkning på lastcellen ved endring av strekkklappenes elektriske motstand. Lastcellen i vårt system er kompensert for dette, men vil likevel ha noe målefeil som følge av temperaturendringer. Det skiller mellom lastcellens følsomhet for temperatur og temperaturens effekt ved en gitt last (ofte målt ved minimumslast). Avlest signal som funksjon av påført last kan representeres ved en rett linje som figur 6.15 antyder. Matematisk kan denne linjen gjengis ved den generelle likningen  $y = ax + b$ . Temperatureffekten ved en gitt last vil da være en endring av konstanten  $b$ . Lastcellens temperaturfølsomhet vil da være påvirkning av konstanten  $a$ . Lastcellen er spesifisert for bruk i et temperaturintervall fra  $-10^{\circ}\text{C}$  til  $40^{\circ}\text{C}$

Samlet målefeil for lastcellen er en kombinasjon av disse feilkildene. I følge kalibreringssertifikatet er den kombinerte målefeilen i lastcellen beregnet til  $< 0,02\%$ .

### Metode for kalibrering av lastcellen

For å forsikre at lastcellens avlesninger er i samsvar med reell last måtte en separat måling av lasten gjennomføres. Dette ble gjort ved å måle fire forskjellige masser med kalibrert måleutstyr. Etter avtale med Det Norske Myntverket fikk vi tilgang på måleutstyr som nylig har vært igjennom kalibreringsprosedyrer. De var både verifisert av Justervesenet i 2016 og produsenten selv i 2017. Disse vektene kunne måle med stor sikkerhet ned til et hundredels gram. Massene som ble veid bestod av tre lodd og en vilkårlig stålsylinder. Loddene var innkjøpt for dette formålet og hadde en oppgitt masse på 50, 100 og 200g fra leverandøren. Disse loddene ble veid 10 ganger hver og vekten viste enn verdi på henholdsvis 50,00g, 100,00g og 200,00g uten avvik. Stålsylinderen ble målt til 1779,7g. Målingen ble repetert 10 ganger uten avvik. Stålsylinderen ble tatt med for å ha en referanseverdi på et lodd med høyere masse.

Ved å kunne disponere fire forskjellige kjente referanselaster kunne lastcellen kalibreres med stor nøyaktighet. Hvert lodd ble plassert i måleriggen etter design slik at de representerer løftekraft fra en motor/rotor-konfigurasjon. Lastcellen ble nullstilt og avlest kontinuerlig i en periode på ca. 10 sekunder for hver måling. Dette tilsvarer over 100 avlesninger for hver måling. Denne prosessen ble repetert 10 ganger for hvert lodd. Måleverdiene var konstante for alle lodd uten avvik. Stålsylinderen ble målt til 1780g. For en måling som dette er det hovedsaklig lineæritetsfeil som spiller inn. Med oppgitt lineæritetsfeil på 0,010% tilsvarer dette et avvik på  $\pm 0,17797g$ . Ettersom lastcellen er såpass nøyaktig er det mikrokontrollerens oppløsning som er den avgjørende faktoren.

### 6.5.4 Konklusjon

I forbindelse med måleusikkerheten for måling av skyvekraft er det ikke lastcellen som er avgjørende faktor. Flaskehalsen er mikrokontrollerens oppløsning for konvertering fra analoge til digitale signaler.

Med tanke på test T2.3 i testspesifikasjonen vil et standardavvik ifra disse målingene være 0. Vi kan derfor si at ved måling av skyvekraft har måleriggen en usikkerhet på  $\pm 0.61g$ .



Det kan sies at for måling av skyvekraft produsert av multikoptermotorer er dette en akseptabel usikkerhet. Vi har observert at det er vanskelig å holde skyvekraften konstant innenfor et område på et par gram. Ved konstant pådrag svinger skyvekraften voldsomt mellom  $\pm 5 - 10$  gram eller mer. Vi har konkludert med at tilstrebing av mindre usikkerhet ikke er fornuftig bruk av tid.



# MERA



Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Programvare

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017

# Sammendrag

Dette kapittelet omhandler programvaren som er skrevet i forbindelse med måleriggen. Det er utviklet flere måleprogrammer i Arduino i tillegg til en Graphical User Interface (GUI).

Versjon	Dato	Tilført	Forfatter	Godkjent av
0.0	23.05.17	Programvare Arduino	CD	EFP
0.1	23.05.17	GUI	EFP	CD
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	HT	

## Innholdsfortegnelse

<b>7.1</b>	<b>Introduksjon</b>	237
<b>7.2</b>	<b>Arduino programvare</b>	238
7.2.1	Programvare	239
7.2.2	Utfordringer og gjenstående arbeid	241
<b>7.3</b>	<b>GUI</b>	243
7.3.1	Funksjon	243
7.3.2	Status	245
7.3.3	Utfordringer	247
<b>Konklusjon</b>		248

# 7.1 Introduksjon

Gjennom hele prosjektet har gruppen planlagt å ha en mikrokontroller laget av Arduino som skal drive måleprogrammene som måleriggen skal utføre. Det er her blitt utviklet noen forhåndsinnstilte måleprogrammer som kjører på egenhånd i tillegg til et program som gjør at bruker kan styre målingene selv, ved å stille på pådraget til motoren. Ved siden av programmene i Arduino ble det bestemt at prosjektgruppen skulle utvikle en GUI som kommuniserer med Arduino over serial port. Denne ble utviklet i Visual Studio med C. Denne skal gi bruker muligheten til å starte programmene brukeren ønsker i tillegg til å vise måledata i sanntid.

## 7.2 Arduino programvare

Programmet som skal lages i Arduino skal kunne kjøre to forhåndsinnstilte måleprogrammer, og i tillegg kunne styre en frimåling om ønskelig. Dette skal kunne styres fra et GUI. Mikrokontrolleren skal lese av hvilke knapper som er trykket inn i GUI og deretter kjøre riktig måleprogram. De forhåndsinnstilte programmene er maks løftekraft og loop800. Maks løftekraft går ut på at pådraget til motoren gradvis øker samtidig som skyvekraften blir målt av en sensor. Loop800 går ut på at pådraget til motoren skal stilles opp og ned slik at dronen går fra å produsere en skyvekraft på 100g, opp til 800g og deretter ned til 400g. Ved loop 800 er responstid det essensielle, altså tiden fra 100g løft, opp til 800g løft, og ned til 400g løft. Frimåling går ut på at bruker styrer pådraget til motoren samtidig som mikrokontrolleren logger måledata som skyvekraft, rpm, tid, virkningsgrad, temperatur på omgivelser, temperatur på motor og lufttrykk.

Programmet per nå er todelt, og ikke koblet opp mot GUI. Det er skrevet et program for maks skyvekraft og et for frimåling. Programmet for maks skyvekraft øker pådraget til motoren opp til maks (2000s) og ned igjen samtidig som den henter de nødvendige måledataene. Det utfører altså oppgavene den skal. Programmet for frimåling leser pådraget brukeren taster inn i serial monitor og skriver det til ESC. Samtidig logger det måledata om skyvekraft, rpm, tid, temperatur på omgivelser og lufttrykk. Det logger derimot ikke virkningsgrad og temperatur på motor da sensorene som produserer disse måledataene ikke enda er implementert i koden.

## 7.2.1 Programvare

### Biblioteker

Tabell 7.1: Biblioteker brukt i Arduino programkode

Biblioteker	
SFE_BMP180.h	Biblioteket inneholder funksjoner for å lese av temperatur- og trykksensoren BMP180, [35]
SPI.h	Biblioteket inneholder funksjoner som gjør det mulig å kommunisere med enheter som benytter seg av SPI, [36]
SD.h	Biblioteket inneholder funksjoner for å kunne skrive til en SD-brikke i et lagringsbrett, [37]
HX711.h	Biblioteket inneholder funksjoner som leser av signalene fra en lastcelle etter de har vært gjennom HX711(ADC), [38]
Servo.h	Biblioteket inneholder funksjoner som gjør det mulig å styre servo og ESC, [39]



## Funksjoner

Tabell 7.2: Funksjoner brukt i Arduino programkode

Funksjoner	
createFile()	Prøver å opprette en .CSV fil med navn "LOGG00" på SD-kort. Dersom dette navnet allerede er i bruk prøver den å opprette "LOGG01" osv. Den kan lage filer med navn opp til "LOGG99". Går videre når den har opprettet en fil som ikke eksisterer på SD-kort fra før av.
airPressure()	Måler temperatur og lufttrykk rundt BMP180. Skriver dette til gitt .CSV fil på SD-kort.
createHeader()	Lager overskrifter for måleresultatene i gitt .CSV fil på SD-kort.
rpmSensor()	Avkobler interrupt på digital pinne som mottar signaler fra sensoren TCRT5000. Beregner rpm ut ifra loggede måledata. Nullstiller informasjonen om antall rotasjoner. Oppdaterer tidspunkt for måling. Kobler til slutt på interrupt igjen.
rpm_motor()	Teller antall ganger motoren roterer. Den er koblet opp mot interrupt.
maksSkyvekraft()	Ved hjelp av for-løkke øker pådraget til motoren gradvis opp mot 2000s, mens den samtidig leser av og logger verdier for skyvekraft hentet fra lastcelle. Etter pådraget når 2000s vil pådraget gradvis minke ned til 0s. Etter den har nådd 0s igjen går den tilbake til loopen.

## Datastruktur

Tabell 7.3: Datastruktur brukt i Arduino programkode

Datastruktur	
const int chipSelect	Definerer pin-nummer for micro SD adapter modul.
boolean header	Passer på at programmet ikke går videre før det er opprettet en .CSV fil og skrevet en overskrift i fila.
int value	Variabel som inneholder verdien for antall mikrosekunder som sendes til ESC.
int revolutions	Variabel som inneholder antall omdreininger på motor. Denne nullstilles hvert sekund etter den er lest av.
int rpm	Teller antall ganger motoren roterer. Den er koblet opp mot interrupt.
int vekt	Variabel som lagrer antall gram skyvekraft.
unsigned long lastmillis	Variabel som lagrer tidspunkt. Brukes til å holde styr på hvor lenge det er siden rpm ble regnet ut.
boolean tempPressure	Boolean som er false frem til temperatur og lufttrykk er målt og skrevet over på .CSV. Den blir deretter true og programmet går videre.
String csvFile	String som inneholder navnet til .CSV fila som måledata skrives til.
String dataString	String som inneholder måledata som skal skrives til .CSV fil.
long gammelTid	Variabel som lagrer tidspunkt. Brukes til å regne ut antall sekunder siden måling startet.
long timee	Variabel som inneholder millis().
File dataFile	Definerer fil som måleresultater skrives til.

### 7.2.2 utfordringer og gjenstående arbeid

Gjenstående arbeid med programkode består av flere ting. Det første er at det må produseres en programkode som kjører loop800. Det neste er at programmet må kunne kommunisere med og styres fra GUI. Programkoden er også nødt til å settes sammen til én enkel programkode som inneholder både maks skyvekraft, loop800 og frimåling. Programkoden for frimåling er også nødt til å finskrives. Den gjennomfører det den skal, men koden er litt grovt satt opp og det er mye variabler som må plasseres og struktureres bedre.

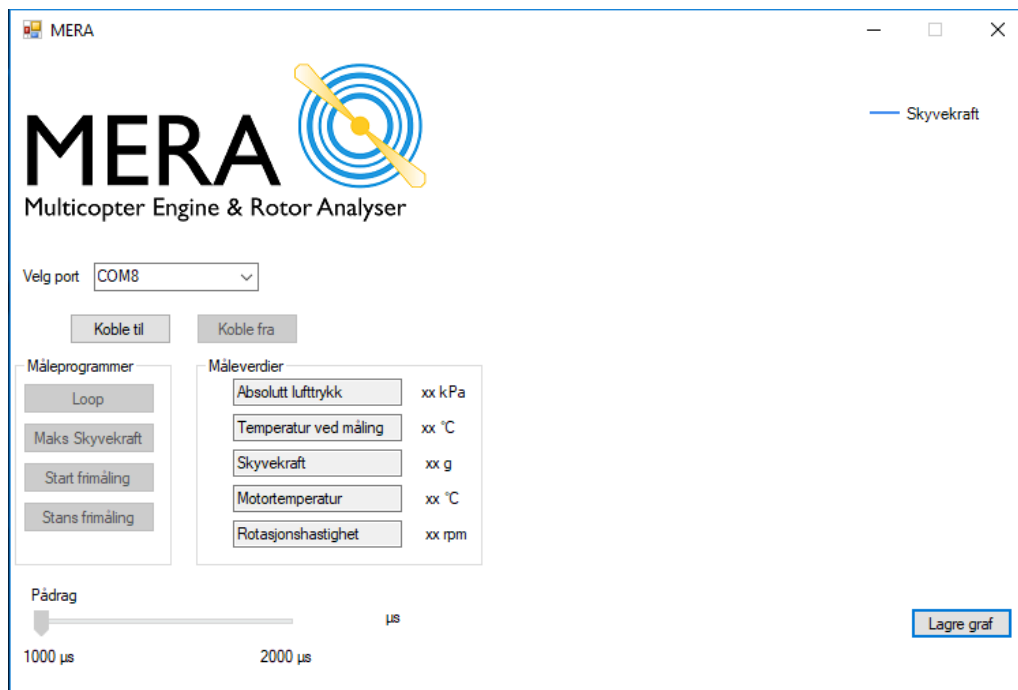
Det har vært flere utfordringer under programmering av mikrokontroller. Når det kommer til loop800 har det vært vanskelig å skrive en kode som rekker å logge de nødvendige måledataene. En av de multikoptrene med kortest responstid som vi skal kunne måle gjennomfører en loop800 på 150ms. Det har derfor vært vanskelig å logge tilstrekkelig med måledata for å kunne utføre en nøyaktig måling. En annen utfordring er at sensoren som skal måle temperatur på motor krever tilkobling til SCL og SDA, noe som har vist seg å kreve mer avansert programmering for å få dette til å fungere med Arduino DUE. Det er skrevet biblioteker for å gjøre denne jobben lettere, men disse er ikke kompatible med Arduino DUE.

## 7.3 GUI

For å kunne styre måleriggen måtte en GUI som kan kommunisere med arduinoen utvikles. Denne ble utviklet i Visual Studio 2017 som en windows forms application skrevet i C#. Denne skal brukes for å kunne lagre og visualisere måleresultatene.

### 7.3.1 Funksjon

GUIen som er blitt utviklet til å styre måleriggen har som formål å gjøre det enkelt for bruker å få de måledataene personen vil ha, uten å måtte bruke mye tid på sette opp egen kode til arduino for hver måling og selv måtte lagre dataene som kommer ut fra sensorene i systemet. Dette løses ved at bruker får et utvalg av måleprogrammer som kan startes fra brukergrensesnittet som igjen da sender en kommando til mikrokontrolleren over serial port. Mikrokontrolleren utfører en forhåndsbestemt målesekvens som ligger kodet inn i arduinoen og sender måledata tilbake over serial port, disse vises i sanntid i grensesnittet samtidig som en graf plottes i sanntid over skyvekraften som måles. Måledataene skal kontinuerlig leses av og det skal lages en graf over skyvekraften i sanntid. Denne skal bruker kunne lagre når målingen er over ved å trykke på knappen *Lagre graf*



Figur 7.1: GUI slik gruppen ser for seg den skal være når den er helt ferdig

Comboboxen hvor man kan velge serial port laster automatisk inn tilgjengelige serial porter hvor bruker må velge porten arduinoen er koblet til. Når bruker trykker på *koble til* knappen aktiveres *måleprogrammer* gruppen. Knappene *Loop* og *Maks skyvekraft* setter i gang de respektive måleprogrammene som automatisk utføres av arduinoen. I tillegg skal det være mulig å drive såkalt frimåling. Knappen *Start frimåling* aktiverer trackbaren. Verdiene i trackbaren tilsvarer pådraget i DC-motoren som monteres i riggen, uttrykt i mikrosekunder ( $\mu s$ ). Her gjøres det en antakelse fra gruppen sin side om at bruker kan såpass om dronemotorer at vi kan uttrykke pådrag på denne måten istedenfor å oppgi i prosent. Når bruker er ferdig med frimålingen skal den trykke på *Stans frimåling*, da vil trackbaren deaktiveres, slik at bruker ikke kan endre pådraget på motoren.

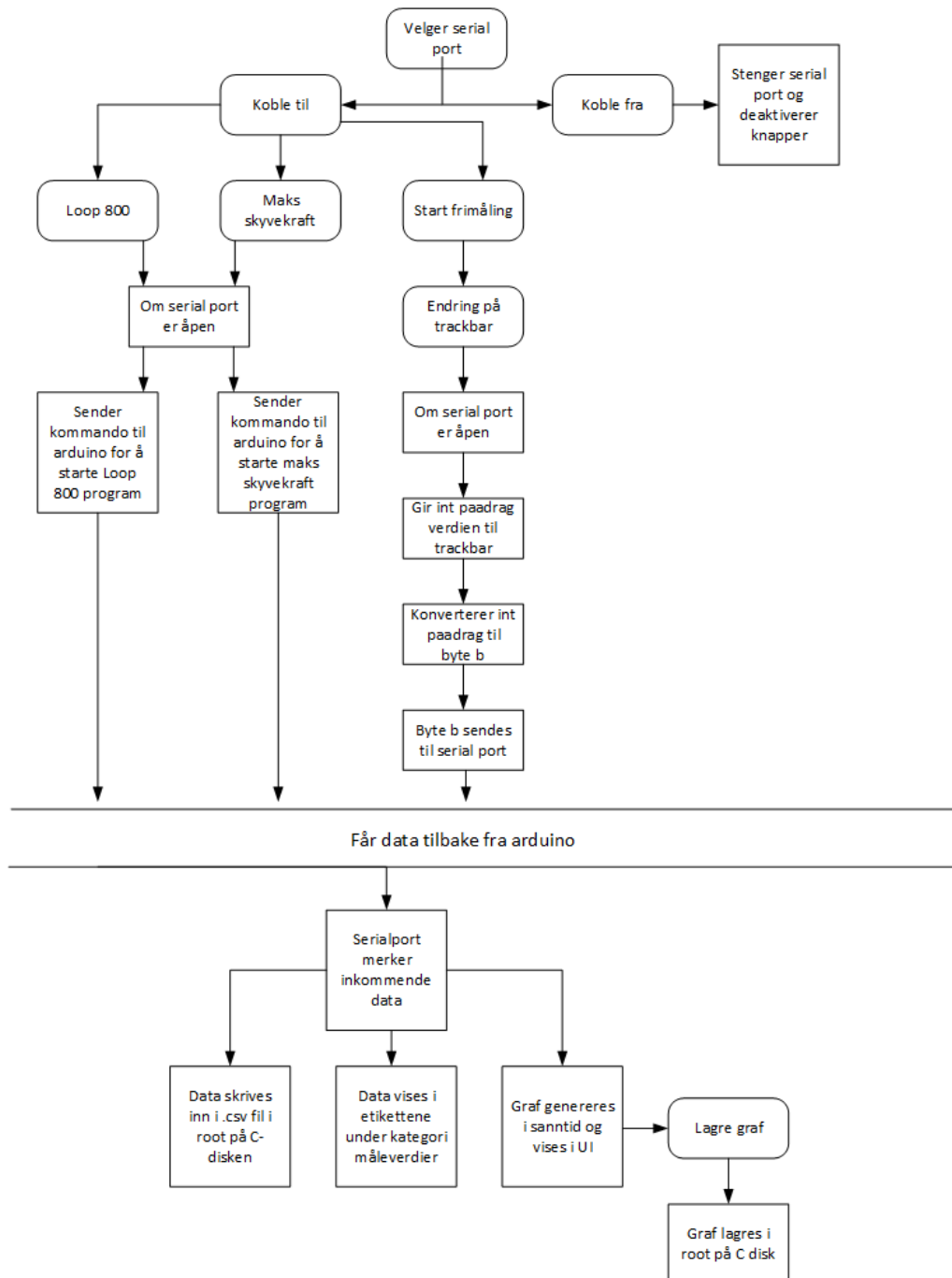
Når en måling startes vil arduinoen sende data tilbake til brukeren sin pc via serial port. Når brukergrensesnittet merker at det kommer data inn til serial port fra arduinoen skal et *event* utløses i programkoden. Måleverdiene skal etter dette kontinuerlig vises i tilhørende etikette i gruppen kalt *Måleverdier* i tillegg til å skrives til en .csv fil. Se flytdiagrammet lenger ned (figur 7.2) for en grafisk fremstilling av funksjonalitet. Koden ligger vedlagt som et vedlegg.

### 7.3.2 Status

Innen prosjektets dokumentasjon skulle leveres var ikke utviklingen av brukergrensesnittet ferdig. Det som mangler er:

- Løsning på hvordan grensesnittet skal tolke innkommende data og lage .csv fil.
- Løsning for å lage en graf i sanntid.
- Løsning for å vise måledata i sanntid i etikettene.

Nødvendig arbeid for at programmet skal fungere som vi ønsker blir å implementere løsningene nevnt ovenfor på en god måte. Det å lage en .csv fil med måledataene blir foreløpig løst på en annen måte ved at arduinoen skriver disse rett inn på et SD-kort, som så kan leses av en pc.



Figur 7.2: Flytdiagram av hvordan GUI fungerer

### 7.3.3 utfordringer

Utviklingen av grensesnittet har vært en tidkrevende prosess, med tanke på at gruppa ikke har hatt noen medlemmer som har erfaring med den slags programmering. Mye av tiden har blitt brukt til å lære og feile for å kunne starte med grensesnittet. Det tok lang tid å lære seg å bruke IDE-en i Visual Studio og samtidig lære C# godt nok til å kunne utvikle et godt grensesnitt. Mye av utfordringene de første ukene lå i bare å lage enkle knapper og få disse til å gjøre noe og sende enkle kommandoer over serial port. En milepæl i utviklingen av dette grensesnittet var å skrive en kode som sender verdier fra trackbaren til arduinoen slik at verdiene faktisk kan brukes. Ting løsnet litt etter dette fram til koden for å tolke måledataene som kommer inn fra arduino skulle skrives. Her stagnerte koden og det var så langt utviklingen kom før dokumentasjonen skulle leveres i slutten av prosjektet. Koden er klar for at bruker skal kunne starte programmene *Loop 800* eller *Maks løftekraft*, men det er noe i kommunikasjonen mellom arduino og grensesnittet som gjør at arduinoen ikke reagerer på riktig måte når den mottar kommandoen.



## Konklusjon

I starten av slike prosjekter vil det alltid gå litt tid før gruppen ser helheten av prosessen og finner den arbeidsmetoden som passer gruppen best. Vårt prosjekt var intet unntak, vi brukte tid på å bli komfortable med prosjektmodellen som var uprøvd for samtlige medlemmer. Prosjektgruppen dro nytte av den godt planlagte fremdriftsplanen kombinert med en fornuftig modifisert prosjektmodell.

Når det kommer til løsningen på arbeidsmodell føler vi at vi kunne valgt en modell som hadde passet dette prosjektet bedre, men samtidig har vi lært mye av den valgte arbeidsmodellen. Grunnen til at denne modellen ikke fungerte like godt som vi håpet var at SCRUM er en iterativ software-modell som baserer seg på å kunne lage et nytt produkt i løpet av hver sprint. Dette er noe som ikke fungerer i samme grad om prosjektgruppen skal lage et fysisk produkt. I løpet av prosjektet har samtlige gruppemedlemmer blitt bedre på estimering av tidsforbruk. Valget om å bruke Latex er vi fornøyde med. Det tar litt tid å lære seg det grunnleggende men når det er gjort blir resultatet svært pent og oversiktlig.

Gruppen har fulgt den valgte arbeidsmodellen og resultatet er en godt konstruert målerigg som innfrir 11 av 18 krav i kravspesifikasjonen. Dette er verifisert gjennom V&V tester utført i løpet av prosjektet. Produktet beviser at konseptet er godt egnet til formålet og at en lastcelle fungerer godt til denne typen målinger. Å bruke en mikrokontroller som Arduino er en god løsning på styring av måleriggen fordi graden av kompleksitet er relativt lav, men samtidig pålitelig.

Resultatet av prosjektet kan oppsummeres med at det meste av det vi har oppnådd i prosjektets tidsperiode er tilfredsstillende i forhold til forventningene. Den eneste delen av prosjektet vi ikke har oppnådd på et tilfredsstillende nivå for gruppen er ferdigstilling av programvare. Denne oppgaven ble undervurdert og det ble ikke tilstrekkelig med tid for en uten kompetanse innen dette området til både å lære seg å bruke Visual Studio sin IDE i tillegg til et nytt programmeringsspråk.

Ved videre utvikling av måleriggen ville prosjektgruppen fokusert på å øke brukervennligheten. Med dette menes en forbedret programvare, gjøre det enklere å koble til ESC og motor, og arbeide for å innfri flere krav.

Utfordringene ved et stort prosjekt som dette er å realisere hvor mye det innebærer. Parallelt med alle oppgavene som skulle utføres skulle det også leveres en fullstendig prosjektrapport. En slik rapport skal skrives i henhold til

visse retningslinjer, hvilket tilsvarer mye arbeid.

Gruppedynamikken har fungert svært godt gjennom hele perioden og på tross av mange diskusjoner og uenigheter har gruppen alltid blitt enige. Dette skyldes i stor grad at gruppemedlemmene kjente hverandre godt på forhånd og fungerer bra sammen.

Prosjektgruppen vil benytte muligheten til å takke følgende nøkkelpersoner:

**Dan Fredrik Stenbek** *for godt utført loding av kretskort*

**Jan Dyre Bjerknes** *for god veiledning*

**Richard Thue** *for assistanse med tilvirkning*

**Dag Samuelsen** *for all veiledning ifb. med design av kretskort*

**Joakim Bjørk** *for råd og veiledning om sensorer*

**Det Norske Myntverket ved Lisa og Mathias** *for lån av måleutstyr*

# Referanser

- [1] D. o. t. A. Headquarters. *FM 3-04.203 - Fundamentals of Flight*. Lastet ned: 1. Mars 2017. URL: <http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/army/fm/3-04-203/fm3-04-203.pdf>.
- [2] P. Cantrell. *Ground Effect*. Lastet ned: 17. Februar 2017. URL: [http://www.copters.com/aero/ground\\_effect.html](http://www.copters.com/aero/ground_effect.html).
- [3] DJI. *DJI e800 brukermanual*. Lastet ned den 23. Januar 2015. URL: [http://dl.djicdn.com/downloads/e800/en/E800\\_User\\_Manual\\_v1.0\\_en.pdf](http://dl.djicdn.com/downloads/e800/en/E800_User_Manual_v1.0_en.pdf).
- [4] L. Instruments. *Strekmaskin*. Lastet ned 17. Mars 2017. URL: <http://www.cscforce.com/xcart/spec/lloyd/lr10kplus.pdf>.
- [5] Ø. Vollen. *Statikk og Fashetslære, Mekanikk for Ingeniører*. 2. Utgave. nki forlaget, 2013.
- [6] *infrarødt temperatursensor*. Lastet ned den 15. Mai 2017. URL: <https://www.sparkfun.com/products/9570>.
- [7] T. Audronis. *Schematic yaw*. Lastet ned 27. April 2017. URL: <https://www.safaribooksonline.com/library/view/building-multicopter-video/9781782175438/>.
- [8] Flintec. *Type PC22 Load Cell*. Lastet ned: 15. Mai 2017. URL: <https://www.flintec.com/wp-content/uploads/2016/09/pc22-single-point-datasheet-en.pdf>.
- [9] *Mathias og Lisa ved Det Norske Myntverket*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: [www.myntverket.no/](http://www.myntverket.no/).
- [10] HAAS. *CNC mini mill*. Lastet ned: 19. Mai 2017. URL: <https://baq.haascnc.com/quote/Vertical-Mills/MiniMill/MINIMILL#gsc.tab=0>.

- [11] HAAS. *Mini mill*. Lastet ned: 19. mai 2017. URL: [https://atyourservice.haascnc.com/sites/default/files/SuperMiniMill\\_LC-copy\\_2.jpg](https://atyourservice.haascnc.com/sites/default/files/SuperMiniMill_LC-copy_2.jpg).
- [12] Atmel. *Atmel SAM D21E / SAM D21G / SAM D21J*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Boards/Atmel-42181-SAM-D21\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Dev/Arduino/Boards/Atmel-42181-SAM-D21_Datasheet.pdf).
- [13] Arduino. *Arduino M0 PRO*. Lastet ned den 20. Mars 2017. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardM0PRO>.
- [14] Atmel. *SAM3X / SAM3A Series*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-11057-32-bit-Cortex-M3-Microcontroller-SAM3X-SAM3A_Datasheet.pdf).
- [15] Arduino. *Arduino DUE*. Lastet ned den 20. Mars 2017. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue>.
- [16] M. Jouaneh. *Fundamentals of Mechatronics*. SI Edition. Pearson, 2013.
- [17] W. Bolton. *Mechatronics: Electronic control systems in mechanical and electrical engineering*. Sixth Edition. Pearson, 2015.
- [18] ElectronicsTutorials. *Hall Effect Sensor*. Lastet ned: 16. Mai 2017. URL: <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>.
- [19] Melexis. *US1881: High latch - high sensitivity*. Lastet ned: 16. Mai 2017. URL: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/Hall-US1881EUA.pdf>.
- [20] Vishay. *TSRT5000, TSRT5000L: Reflective Optical Sensor with Transistor Output*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: <http://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf>.
- [21] T. L. Floyd. *Electronic devices: Conventional current version*. Ninth Edition. Pearson, 2014.
- [22] AnalogDevices. *Low Voltage Temperature Sensors - TMP35/TMP36/TMP37*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: [http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/Content/Activities/TMP35\\_36\\_37.pdf](http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/Content/Activities/TMP35_36_37.pdf).
- [23] Melexis. *MLX90614 family*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: <https://www.melexis.com/en/documents/documentation/datasheets/mlx90614>.
- [24] BOSCH. *BMP180 - Digital pressure sensor*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf>.

- [25] AttoPilot. *Compact DC Voltage and Current Sense PCB with Analog Output*. Lastet ned: 11. Mai 2017. URL: <https://cdn.solarbotics.com/products/schematics/dc.pdf>.
- [26] T. Instruments. *INA193 - INA198*. Lastet ned: 22. mai 2017. URL: [http://www.ti.com/ods/images/SBOS307G/ai\\_basic\\_conx\\_bos307.gif](http://www.ti.com/ods/images/SBOS307G/ai_basic_conx_bos307.gif).
- [27] T. Instruments. *INA19x Current Shunt Monitor –16 V to +80 V Common-Mode Range*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina195.pdf>.
- [28] T. Instruments. *LM6152/LM6154 Dual and Quad 75 MHz GBW Rail-to-Rail I/O Operational Amplifiers*. Lastet ned: 18. Mai 2017. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm6152.pdf>.
- [29] Justervesenet. *Måleteknikk - Måleusikkerhet*. Dato lest: 23. Mai 2017. URL: <http://www.justervesenet.no/maleteknikk/maleusikkerhet/>.
- [30] N. og Fiskeridepartementet. *Forskrift om krav til ikke-automatiske vekter*. Lastet ned: 15. Februar 2017. URL: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2007-12-21-1735>.
- [31] G. G. Løvås. *Statistikk for universiteter og høyskoler*. 3. Utgave. Universitetsforlaget, 2013.
- [32] oiml. *General information*. Lastet ned: 21. Mai 2017. URL: <https://www.oiml.org/en/certificates/general-information>.
- [33] V. Transducers. *Hysteresis and Non-linearity*. Lastet ned: 21. Mai 2017. URL: <http://www.vishaypg.com/docs/11864/11864.pdf>.
- [34] V. Transducers. *Temperature sensitivity and effect on dead load output*. Lastet ned: 21. Mai 2017. URL: <http://www.vishaypg.com/docs/11864/11864.pdf>.
- [35] Lastet ned den 25. April 2017. URL: [https://github.com/LowPowerLab/SFE\\_BMP180](https://github.com/LowPowerLab/SFE_BMP180).
- [36] Integrert i Arduino IDE per 24. April 2017. URL: <https://www.arduino.cc/en/reference/SPI>.
- [37] Integrert i Arduino IDE per 4. Mai 2017. URL: <https://www.arduino.cc/en/reference/SD>.
- [38] Lastet ned den 23. Mars 2017. URL: <https://github.com/bogde/HX711>.
- [39] Integrert i Arduino IDE per 26. April 2017. URL: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Servo>.



# MERA



Multicopter Engine & Rotor Analyser

---

## Vedlegg

---

Cecilie Dokken  
Eivind Foss-Pedersen  
Fredrik Hansen  
Halvard Thon  
Truls Øhrn

Vår 2017



## Innholdsfortegnelse

Vedlegg 1: Måleverdier . . . . .	257
Vedlegg 2: GUI-kode . . . . .	260
Vedlegg 3: Arduino - programkode . . . . .	266
Vedlegg 4: CNC-kode tilvirkning av motorfester . . . . .	276
Vedlegg 5: AttoPilot simulering . . . . .	286
Vedlegg 6: Materialer brukt i materialvalg analyser . . . . .	287
Vedlegg 7: Simulering av kretsdesign . . . . .	290
Vedlegg 8: Versjonskontroller . . . . .	292
Vedlegg 9: DAK 2D tegninger . . . . .	299
Vedlegg 10: Kretstegning for maskinvare . . . . .	304

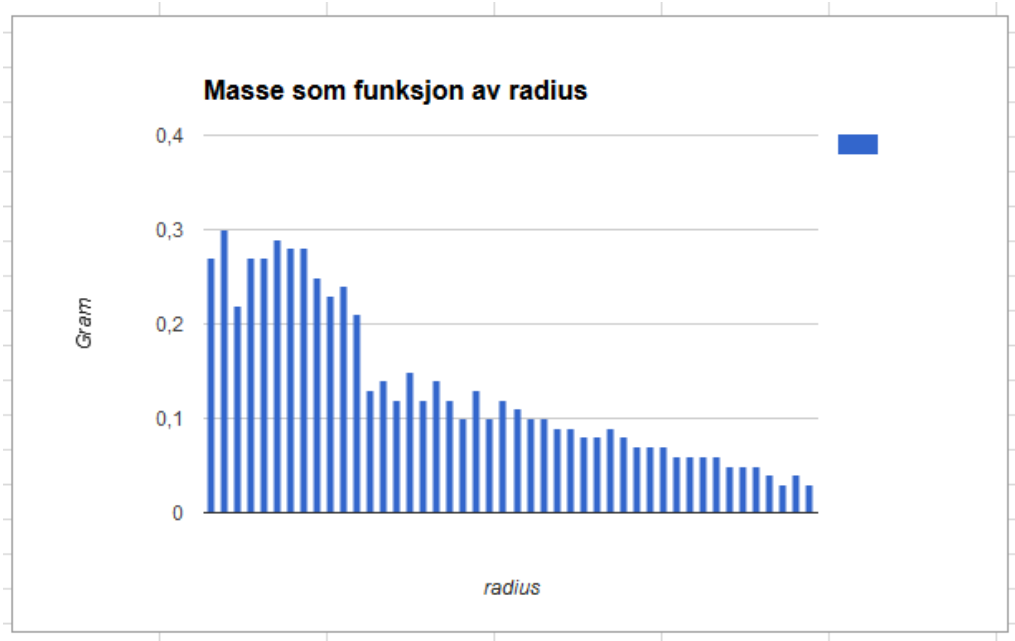
## Vedlegg 1: Måleverdier

n	masse	middelradius	r <sup>2</sup>	dl
1	0,03	142,26	20237,9076	607,137228
2	0,04	139,26	19393,3476	775,733904
3	0,03	136,26	18566,7876	557,003628
4	0,04	133,26	17758,2276	710,329104
5	0,05	130,26	16967,6676	848,38338
6	0,05	127,26	16195,1076	809,75538
7	0,05	124,26	15440,5476	772,02738
8	0,06	121,26	14703,9876	882,239256
9	0,06	118,26	13985,4276	839,125656
10	0,06	115,26	13284,8676	797,092056
11	0,06	112,26	12602,3076	756,138456
12	0,07	109,26	11937,7476	835,642332
13	0,07	106,26	11291,1876	790,383132
14	0,07	103,26	10662,6276	746,383932
15	0,08	100,26	10052,0676	804,165408
16	0,09	97,26	9459,5076	851,355684
17	0,08	94,26	8884,9476	710,795808
18	0,08	91,26	8328,3876	666,271008
19	0,09	88,26	7789,8276	701,084484
20	0,09	85,26	7269,2676	654,234084
21	0,1	82,26	6766,7076	676,67076
22	0,1	79,26	6282,1476	628,21476
23	0,11	76,26	5815,5876	639,714636
24	0,12	73,26	5367,0276	644,043312
25	0,1	70,26	4936,4676	493,64676
26	0,13	67,26	4523,9076	588,107988

Figur 9.1: Måleverdier for segment 1-26

27	0,1	64,26	4129,3476	412,93476	
28	0,12	61,26	3752,7876	450,334512	
29	0,14	58,26	3394,2276	475,191864	
30	0,12	55,26	3053,6676	366,440112	
31	0,15	52,26	2731,1076	409,66614	
32	0,12	49,26	2426,5476	291,185712	
33	0,14	46,26	2139,9876	299,598264	
34	0,13	43,26	1871,4276	243,285588	
35	0,21	40,26	1620,8676	340,382196	
36	0,24	37,26	1388,3076	333,193824	
37	0,23	34,26	1173,7476	269,961948	
38	0,25	31,26	977,1876	244,2969	
39	0,28	28,26	798,6276	223,615728	
40	0,28	25,26	638,0676	178,658928	
41	0,29	22,26	495,5076	143,697204	
42	0,27	19,26	370,9476	100,155852	
43	0,27	16,26	264,3876	71,384652	
44	0,22	13,26	175,8276	38,682072	
45	0,3	10,26	105,2676	31,58028	
46	0,27	7,26	52,7076	14,231052	
SUM				23724,1571	
Rest	3,42	13,59	184,6881	631,633302	
			Inertia:	24355,79041	gmm^2
			For hele:	48711,58081	gmm^2

Figur 9.2: Måleverdier for segment 26-46



Figur 9.3: Massens fordeling over radiusen

## Vedlegg 2: GUI-kode

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.IO.Ports;
using System.IO;

namespace MERA
{
    public partial class MERA : Form
    {
        int paadrag;
        string data;
        string dateTime = DateTime.Now.ToString("yyyy-MM-dd-hh-mm-s");
        //lager string dateAndTime for aa faa med dato
        // i navnet paa tekstfil
        //string dateAndTime;
        //dateAndTime = DateTime.Now.ToShortDateString() + "-" +
        DateTime.Now.ToShortTimeString();
        //dateAndTime = dateAndTime.Replace("/", "-");
        //dateAndTime = dateAndTime.Replace(":", "-");
        //string path = @"C:/MERAtest.csv";
        public MERA()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void trackBar1_Scroll(object sender, EventArgs e)
        {
            if (serialPort1.IsOpen == true){
                //Om serialporten er aapen, skriver trackbar verdier
                //til label, i tillegg til aa konvertere til bytes
                // og skrive til serial port.
            }
        }
    }
}
```

```
        paadrag = trackBar1.Value;
        lblPaadrag.Text = trackBar1.Value.ToString();

        byte [] b = BitConverter.GetBytes(paadrag);
        serialPort1.Write(b, 0, 4);
    }

}

private void textBox5_TextChanged(object sender, EventArgs
{
}

private void textBox4_TextChanged(object sender, EventArgs
{
}

private void textBox1_TextChanged(object sender, EventArgs
{
}

}

private void label4_Click(object sender, EventArgs e)
{
}

private void textBox1_TextChanged_1(object sender, EventArgs
{
}

}

private void pictureBox1_Click(object sender, EventArgs e)
{
```

```
}

private void label1_Click(object sender, EventArgs e)
{
}

private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
{
    /// <summary>
    /// Naar formen laster deaktiveres alle knappene bortsett
    fra knappen som
    /// lar bruker koble til serial port.
    /// Finner mulige serial porter og legger disse i combo
    slik at bruker kan velge den som brukes til arduinoen
    /// </summary>
    btnStansFri.Enabled = false;
    trackBar1.Enabled = false;
    btnKobleFra.Enabled = false;
    btnLoop800.Enabled = false;
    btnMaks.Enabled = false;
    btnStartFri.Enabled = false;
    comboBox1.DataSource = SerialPort.GetPortNames();
    serialPort1.PortName = comboBox1.Text;
    serialPort1.BaudRate = 9600;
}

private void btnLoop800_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true) {
        // sender kommandoen "L" til arduinoen slik
        at den starter programmet Loop800
        serialPort1.Write("L");
    }
}

private void btnMax_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (serialPort1.IsOpen == true){
        // sender kommandoen "M" til arduinoen slik
```

```
        at den starter programmet maks loftekraft
        serialPort1.Write("M#");
    }
}

private void btnStartFri_Click(object sender, EventArgs e)
{
    // naar man starter fri maaling aktiveres trackbar og
    // knappen som stanser fri maaling
    // knappene for loop 800 og maks loftekraft deaktiveres
    btnStartFri.Enabled = false;
    btnStansFri.Enabled = true;
    trackBar1.Enabled = true;
    btnLoop800.Enabled = false;
    btnMaks.Enabled = false;
}

private void btnStansFri_Click(object sender, EventArgs e)
{
    // deaktiverer "stans frimaaling" og trackbaren,
    // aktiverer knappene for aa starte
    // loop 800, maks loftekraft og frimaaling
    btnStartFri.Enabled = true;
    btnStansFri.Enabled = false;
    trackBar1.Enabled = false;
    btnLoop800.Enabled = true;
    btnMaks.Enabled = true;
}

private void lblPaadrag_Click(object sender, EventArgs e)
{
}

private void lblSkyv_Click(object sender, EventArgs e)
{
}

private void chart1_Click(object sender, EventArgs e)
```



```
{  
}  
  
private void comboBox1_SelectedIndexChanged  
(object sender, EventArgs e)  
{  
  
}  
  
private void btnKobleTil_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    //aapner for kommunikasjon gjennom valgte serialport  
    //aktiverer knappene for aa koble fra  
    og for aa starte maaleprogrammer  
  
    serialPort1.Open();  
    btnKobleTil.Enabled = false;  
    btnKobleFra.Enabled = true;  
    btnLoop800.Enabled = true;  
    btnMaks.Enabled = true;  
    btnStartFri.Enabled = true;  
}  
  
private void btnKobleFra_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    // stenger for kommunikasjon gjennom valgte serialport  
    // deaktiverer alle andre knapper enn "koble til"  
    serialPort1.Close();  
    btnKobleFra.Enabled = false;  
    btnKobleTil.Enabled = true;  
    btnLoop800.Enabled = false;  
    btnMaks.Enabled = false;  
    btnStartFri.Enabled = false;  
}  
  
private void label2_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
  
}
```

```
private void serialPort1_DataReceived
(object sender, SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    //her maa koden som tolker mottatt data skrives
    //data = serialPort1.ReadTo("\n") + dateTime;
    //leser fram til ny linje kommando
    og legger til string dateTime
    //if (!File.Exists(path))
    {
        // Om fila MERAtest.csv ikke finnes i path
        lages ny med string data
        //using (StreamWriter sw = File.CreateText(path))
        kommentert ut for at programmet skal fungere
        {
            //sw.WriteLine(data);
        }
    }

    //using (StreamWriter sw = File.AppendText(path)) –
    kommentert ut for at programmet skal fungere
    {
        //legger til data i eksisterende .csv fil
        //sw.WriteLine(data);
    }
}
}
```

## Vedlegg 3: Arduino - programkode

### Program 1: Maks skyvekraft

```
1 #include <SFE_BMP180.h> // Inkluderer bibliotek SFE_BMP.h i programmet
2 #include <SPI.h> // Inkluderer bibliotek SPI.h i programmet
3 #include <SD.h> // Inkluderer bibliotek SD.h i programmet
4 #include "HX711.h" // Inkluderer bibliotek HX711.h i programmet
5 #include <Servo.h> // Inkluderer bibliotek Servo.h i programmet
6
7 #define DOUT 3 // Definerer pin-nummer for utgangssignal til HX711
8 #define CLK 2 // Definerer pin-nummer for klokkesignal til HX711
9
10 HX711 scale(DOUT, CLK);
11 Servo firstESC;
12 SFE_BMP180 pressure;
13
14 // Variabler
15 const int chipSelect = 4;
16 int vekt;
17 int value = 0;
18 String csvFile;
19
20 void setup() {
21     firstESC.attach(7); // Definerer pin-nummer ESC er koblet til
22     Serial.begin(9600); // Start serial monitor
23     scale.set_scale(-867320); // Kalibreringsfaktor for lastcelle
24     scale.tare(); // Nullstill lastcelle
25
26     Serial.print("Kobler til SD-kort..");
27
28     // Sjekk om programmet får kontakt med SD-kort:
29     if (!SD.begin(chipSelect)) {
30         Serial.println("Finner ikke SD-kort");
31         return;
32     }
33     Serial.println("SD-kort tilkoblet");
34 }
35
36 void loop() {
37     long previousMilliSek = 0; // Variabel for tid som har gått
38     boolean next = false; // Hindrer program å starte før kommando er motatt
39
40     while(!Serial.available()){ // Programmet venter på input fra serial monitor
41
```

Figur 9.4: Arduino program 1, del 1.

```
42 long milliSek = millis(); // Nåværende tid
43 int program = Serial.parseInt(); // Skriver inntastet verdi fra serial monitor
44 while (next == false){ // Hindrer programmet i å starte et program før kommando er mottatt
45     if (program == 1){ // Start første serie med programmer
46         createFile(); // Oppretter .CSV fil på SD-kort
47         airPressure(); // Leser av temperatur og lufttrykk
48         createHeader(); // Oppretter overskrift for måleverdiene i .CSV fil
49         firstESC.writeMicroseconds(value); // Skriv mikrosekunder til ESC
50         previousMilliSek = milliSek; // Oppdaterer tid
51         maksSkyvekraft(previousMilliSek); // Starter program for å måle maks skyvekraft
52         next == true; // Går tilbake til loopen
53     }
54 }
55 }
56
57 void maksSkyvekraft(long previousMilliSek){
58
59     String dataString = ""; // Variabel for å lagre måleverdier
60
61     for(int value = 1000; value < 2000; value++){ //For-løkke som øker rotasjonshastighet opptil
62                                     //2000 mikrosekunder
63         float tid = (((millis()-previousMilliSek)/1000.00f)-1); // Regner ut tidspunkt
64         firstESC.writeMicroseconds(value);
65         vekt = scale.get_units()*1000,0; // Les av skyvekraft fra lastcelle
66         dataString += (tid); // Skrive måleverdi
67         dataString += ",";
68         dataString += value;
69         dataString += ",";
70         dataString += vekt*(-1);
71
72         File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE); // Åpne .CSV fil i SD-kort
73         if (dataFile) {
74             dataFile.println(dataString); // Skriv måleverdier til .CSV fil
75             dataFile.close(); // Lukk .CSV fil
76             Serial.println(dataString);
77             dataString = ""; // Nullstill string som inneholder måleverdier
78         }
79     }
80 }
```

Figur 9.5: Arduino program 1, del 2.

```
81 for(int value = 2000; value > 0; value = value - 100){ // For-løkke som reduserer rotasjonshastighet
82                                     // ned til 0 mikrosekunder
83     float tid = (((millis()-previousMilliSek)/1000.00f)-1);
84     firstESC.writeMicroseconds(value);
85     vekt = scale.get_units()*1000,0;
86     dataString += (tid);
87     dataString += ",";
88     dataString += value;
89     dataString += ",";
90     dataString += vekt*(-1);
91
92     File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE);
93     if (dataFile) {
94         dataFile.println(dataString);
95         dataFile.close();
96         // print to the serial port too:
97         Serial.println(dataString);
98         dataString = "";
99     }
100 }
101 loop();
102 }
103
104 void airPressure(){
105     String dataString = "";
106     char status;
107     double T,P,p0,a;
108
109     status = pressure.startTemperature(); // Start temperaturmåling
110     if (status != 0)
111     {
112         delay(status);
113
114         status = pressure.getTemperature(T); // Les av temperatur
115         if (status != 0)
116         {
117             dataString += "Tempereatur: ";
118             dataString += String(T,2);
119             dataString += " C";
```

Figur 9.6: Arduino program 1, del 3.

```
120     File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE);
121   if (dataFile) {
122     dataFile.println(dataString);
123     dataFile.close();
124     // print to the serial port too:
125     Serial.println(dataString);
126     dataString = "";
127   }
128
129   status = pressure.startPressure(3); // Start lufttrykkmåling
130   if (status != 0){
131     delay(status);
132
133     status = pressure.getPressure(P,T); // Les av lufttrykk
134     if (status != 0) {
135       dataString += "Lufttrykk: ";
136       dataString += String(P,2);
137       dataString += "T mb";
138       dataString += ",";
139       File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE);
140     if (dataFile) {
141       dataFile.println(dataString);
142       dataFile.close();
143       // print to the serial port too:
144       Serial.println(dataString);
145       dataString = "";
146     }
147     }
148   }
149 }
150 }
151 }
```

Figur 9.7: Arduino program 1, del 4.

```
153 void createFile(){
154     char filename[] = "LOGG00.CSV"; // Oppretter filnavn
155     for (uint8_t i = 0; i < 100; i++) { // Endrer nummer i filnavn
156         filename[4] = i/10 + '0';
157         filename[5] = i%10 + '0';
158         if (!SD.exists(filename)) { // Undersøker om filnavn allerede eksisterer
159             File datafile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
160             datafile.close();
161             csvFile = filename; // Skriver filnavn til variabel
162             break; // Forlat if
163         }
164     }
165 }
166
167 void createHeader(){
168     File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE); // Åpner SD-brikke
169     dataFile.println("Sekunder, Mikrosekunder, Skyvekraft"); // Skriver til SD-brikke
170     dataFile.close(); // Lukker SD-brikke
171 }
```

Figur 9.8: Arduino program 1, del 5.

## Program 2: Frimåling

```
1 #include <SFE_BMP180.h> // Inkluderer bibliotek SFE_BMP.h i programmet
2 #include <SPI.h> // Inkluderer bibliotek SPI.h i programmet
3 #include <SD.h> // Inkluderer bibliotek SD.h i programmet
4 #include "HX711.h" // Inkluderer bibliotek HX711.h i programmet
5 #include <Servo.h> // Inkluderer bibliotek Servo.h i programmet
6
7 #define DOUT 3 // Definerer pin-nummer for utgangssignal til HX711
8 #define CLK 2 // Definerer pin-nummer for klokkesignal til HX711
9
10 HX711 scale(DOUT, CLK);
11 Servo firstESC;
12 SFE_BMP180 pressure;
13
14 // Variabler
15 const int chipSelect = 4;
16 boolean header = false;
17 int value = 0;
18 int revolutions = 0;
19 int rpm = 0;
20 int vekt;
21 unsigned long lastmillis = 0;
22 boolean tempPressure = false;
23 String csvFile;
24
25 void setup() {
26   firstESC.attach(7); // Definerer pin-nummer ESC er koblet til
27   Serial.begin(9600); // Start serial monitor
28   scale.set_scale(-867320); // Kalibreringsfaktor for lastcelle
29   scale.tare(); // Nullstill lastcelle
30
31   // Koble til interrupt på digital pin nummer 11
32   attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(11), rpm_motor, FALLING);
33
34   Serial.print("Kobler til SD-kort..");
35
36   // Sjekk om programmet får kontakt med SD-kort:
37   if (!SD.begin(chipSelect)) {
38     Serial.println("Finner ikke SD-kort");
39     return;
40   }
41   Serial.println("SD-kort tilkoblet");
```

Figur 9.9: Arduino program 2, del 1.



```
42 }
43
44 void loop() {
45   // Variabler
46   String dataString = "";
47   long gammelTid = 0;
48   long timee = millis();
49
50   vekt = scale.get_units()*1000,0; // Leser av lastcelle
51   firstESC.writeMicroseconds(value); // Skriver mikrosekunder til ESC
52
53   if(header == false){ // Sjekker om det er opprettet CSV fil
54     createFile(); // Opprettet CSV fil
55     airPressure(); // Måler temperatur og lufttrykk
56     createHeader(); // Oppretter overskrift for måleverdiene i CSV fil
57     gammelTid = timee; // Registrerer tidspunkt
58   }
59
60   if(Serial.available()) // Se etter input fra serial monitor
61     value = Serial.parseInt(); // Sette in antall mikrosekunder skrevet
62     // til serial monitor
63
64   if (millis() - lastmillis >= 1000){ // Oppdaterer sensordata hvert sekund
65     rpmSensor(); // Regner ut rotasjonshastighet
66   }
67
68   // Regner ut antall sekunder fra start av måling
69   float sekunder = (((millis()-gammelTid)/1000.00f)-1);
70
71   // Skriv sensordata til string
72   dataString += sekunder;
73   dataString += ",";
74   dataString += value;
75   dataString += ",";
76   dataString += vekt*(-1);
77   dataString += ",";
78   dataString += rpm;
79
80   File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE); // Åpner CSV fil
81
82   // Skriver måledata til .CSV fil
```

Figur 9.10: Arduino program 2, del 2.

```
83  if (dataFile) {
84      dataFile.println(dataString);
85      dataFile.close();
86      Serial.println(dataString);
87  }
88
89  else {
90      Serial.println("Skriving til fil mislykkes");
91  }
92 }
93
94 void rpm_motor(){
95     revolutions++; // Antall rotasjoner øker med 1
96 }
97
98
99 void airPressure(){
100     String dataString = "";
101     char status;
102     double T,P,p0,a;
103
104     status = pressure.startTemperature(); // Start temperaturmåling
105     if (status != 0)
106     {
107         delay(status);
108
109         status = pressure.getTemperature(T); // Les av temperatur
110         if (status != 0)
111         {
112             dataString += "Tempereatur: ";
113             dataString += String(T,2);
114             dataString += " C";
115             dataString += ",";
116
117             File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE);
118             if (dataFile) {
119                 dataFile.println(dataString);
120                 dataFile.close();
121                 // print to the serial port too:
122                 Serial.println(dataString);
123                 dataStrina = "";
```

Figur 9.11: Arduino program 2, del 3.

```
124 }
125
126 status = pressure.startPressure(3); // Start lufttrykkmåling
127 if (status != 0){
128     delay(status);
129
130     status = pressure.getPressure(P,T); // Les av lufttrykk
131     if (status != 0) {
132         dataString += "Lufttrykk: ";
133         dataString += String(P,2);
134         dataString += "T mb";
135         dataString += ",";
136         File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE);
137     if (dataFile) {
138         dataFile.println(dataString);
139         dataFile.close();
140         // print to the serial port too:
141         Serial.println(dataString);
142         dataString = "";
143     }
144     }
145 }
146 }
147 }
148 }
149
150 void createHeader(){
151     if (header == false){
152         File dataFile = SD.open(csvFile, FILE_WRITE); // Åpner SD-brikke
153         dataFile.println("Sekunder, Mikrosekunder, Skyvekraft, RPM"); // Skriver til SD-brikke
154         dataFile.close(); // Lukker SD-brikke
155         header = true;
156     }
157 }
158 }
```

Figur 9.12: Arduino program 2, del 4.

```
159 void createFile(){
160     char filename[] = "LOGG00.CSV"; // Oppretter filnavn
161     for (uint8_t i = 0; i < 100; i++) { // Endrer nummer i filnavn
162         filename[4] = i/10 + '0';
163         filename[5] = i%10 + '0';
164         if (!SD.exists(filename)) { // Undersøker om filnavn allerede eksisterer
165             File datafile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
166             datafile.close();
167             csvFile = filename; // Skriver filnavn til variabel
168             break; // Forlat if
169         }
170     }
171 }
172
173 void rpmSensor(){
174     detachInterrupt(digitalPinToInterrupt(11)); // Koble fra interrupt
175     rpm = revolutions * 60; // Regner ut rpm
176     revolutions = 0; // Nullstiller antall rotasjoner
177     lastmillis = millis(); // Oppdaterer tidspunkt
178     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(11), rpm_motor, FALLING); // Koble til interrupt
179 }
```

Figur 9.13: Arduino program 2, del 5.

## Vedlegg 4: CNC-kode for tilvirkning av motorfester

Vedlagt ligger CNC programmene brukt under tilvirkning av motorfestene:

### CNC program 2D contour1:

```
O00001
(Using high feed G1 F5000. instead of G0.)
(T4 D=10. CR=0. - ZMIN=-11. - flat end mill)
G90 G94 G17
G21
G53 G00 Z0.

(2D Contour1)
T2 M06
S8000 M03
G54
M08
G00 X130.163 Y64.134
G43 Z15. H02
G00 Z5.
G01 Z3. F50.
Z2.5
G03 X127.349 Y65. Z2.396 I-2.813 J-4.134 F250.
G01 X84.403 Z0.896
G03 X82.131 Y64.454 Z0.814 I0. J-5.
G01 X66.412 Y56.437 Z0.197
G02 X59.597 Y54.8 Z-0.05 I-6.815 J13.363
G01 X37. Z-0.839
G02 X32. Y59.8 Z-1.113 I0. J5.
G01 Y85.2 Z-2.
G02 X37. Y90.2 I5. J0.
G01 X59.597
G02 X66.412 Y88.563 I0. J-15.
G01 X82.131 Y80.546
G03 X84.403 Y80. I2.272 J4.454
G01 X127.349
G03 X131.68 Y82.5 I0.001 J5.
G02 X165.887 Y83.215 I17.32 J-10.
X169. Y72.5 I-16.887 J-10.715
X131.68 Y62.5 I-20. J0.
```

G03 X127.349 Y65. I-4.33 J-2.5  
 G01 X84.403  
 G03 X82.131 Y64.454 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y56.437  
 G02 X59.597 Y54.8 I-6.815 J13.363  
 G01 X37.  
 G02 X32. Y59.8 I0. J5.  
 G01 Y85.2  
 G02 X37. Y90.2 Z-2.274 I5. J0.  
 G01 X59.597 Z-3.063  
 G02 X66.412 Y88.563 Z-3.31 I0. J-15.  
 G01 X82.131 Y80.546 Z-3.927  
 G03 X84.147 Y80.007 Z-4. I2.272 J4.454  
 X84.403 Y80. I0.256 J4.993  
 G01 X127.349  
 G03 X131.68 Y82.5 I0.001 J5.  
 G02 X165.887 Y83.215 I17.32 J-10.  
 X169. Y72.5 I-16.887 J-10.715  
 X131.68 Y62.5 I-20. J0.  
 G03 X127.349 Y65. I-4.33 J-2.5  
 G01 X84.403  
 G03 X82.131 Y64.454 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y56.437  
 G02 X59.597 Y54.8 I-6.815 J13.363  
 G01 X37.  
 G02 X32. Y59.8 I0. J5.  
 G01 Y85.2  
 G02 X37. Y90.2 I5. J0.  
 G01 X59.597  
 G02 X66.412 Y88.563 I0. J-15.  
 G01 X82.131 Y80.546  
 G03 X84.147 Y80.007 I2.272 J4.454  
 X84.403 Y80. Z-4.009 I0.256 J4.993  
 G01 X127.349 Z-5.509  
 G03 X131.68 Y82.5 Z-5.692 I0.001 J5.  
 G02 X137.616 Y88.944 Z-6. I17.32 J-10.  
 X165.887 Y83.215 I11.384 J-16.444  
 X169. Y72.5 I-16.887 J-10.715  
 X131.68 Y62.5 I-20. J0.  
 G03 X127.349 Y65. I-4.33 J-2.5

G01 X84.403  
 G03 X82.131 Y64.454 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y56.437  
 G02 X59.597 Y54.8 I-6.815 J13.363  
 G01 X37.  
 G02 X32. Y59.8 I0. J5.  
 G01 Y85.2  
 G02 X37. Y90.2 I5. J0.  
 G01 X59.597  
 G02 X66.412 Y88.563 I0. J-15.  
 G01 X82.131 Y80.546  
 G03 X84.403 Y80. I2.272 J4.454  
 G01 X127.349  
 G03 X131.68 Y82.5 I0.001 J5.  
 G02 X137.616 Y88.944 I17.32 J-10.  
 X165.887 Y83.215 Z-7.125 I11.384 J-16.444  
 X169. Y72.5 Z-7.52 I-16.887 J-10.715  
 X164.458 Y59.81 Z-8. I-20. J0.  
 X131.68 Y62.5 I-15.458 J12.69  
 G03 X127.349 Y65. I-4.33 J-2.5  
 G01 X84.403  
 G03 X82.131 Y64.454 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y56.437  
 G02 X59.597 Y54.8 I-6.815 J13.363  
 G01 X37.  
 G02 X32. Y59.8 I0. J5.  
 G01 Y85.2  
 G02 X37. Y90.2 I5. J0.  
 G01 X59.597  
 G02 X66.412 Y88.563 I0. J-15.  
 G01 X82.131 Y80.546  
 G03 X84.403 Y80. I2.272 J4.454  
 G01 X127.349  
 G03 X131.68 Y82.5 I0.001 J5.  
 G02 X165.887 Y83.215 I17.32 J-10.  
 X169. Y72.5 I-16.887 J-10.715  
 X164.458 Y59.81 I-20. J0.  
 X131.68 Y62.5 Z-9.348 I-15.458 J12.69  
 G03 X127.349 Y65. Z-9.531 I-4.33 J-2.5  
 G01 X113.925 Z-10.

X84.403  
G03 X82.131 Y64.454 I0. J-5.  
G01 X66.412 Y56.437  
G02 X59.597 Y54.8 I-6.815 J13.363  
G01 X37.  
G02 X32. Y59.8 I0. J5.  
G01 Y85.2  
G02 X37. Y90.2 I5. J0.  
G01 X59.597  
G02 X66.412 Y88.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y80.546  
G03 X84.403 Y80. I2.272 J4.454  
G01 X127.349  
G03 X131.68 Y82.5 I0.001 J5.  
G02 X165.887 Y83.215 I17.32 J-10.  
X169. Y72.5 I-16.887 J-10.715  
X131.68 Y62.5 I-20. J0.  
G03 X127.349 Y65. I-4.33 J-2.5  
G01 X113.925  
X85.289 Z-11.  
X84.403  
G03 X82.131 Y64.454 I0. J-5.  
G01 X66.412 Y56.437  
G02 X59.597 Y54.8 I-6.815 J13.363  
G01 X37.  
G02 X32. Y59.8 I0. J5.  
G01 Y85.2  
G02 X37. Y90.2 I5. J0.  
G01 X59.597  
G02 X66.412 Y88.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y80.546  
G03 X84.403 Y80. I2.272 J4.454  
G01 X127.349  
G03 X131.68 Y82.5 I0.001 J5.  
G02 X165.887 Y83.215 I17.32 J-10.  
X169. Y72.5 I-16.887 J-10.715  
X131.68 Y62.5 I-20. J0.  
G03 X127.349 Y65. I-4.33 J-2.5  
G01 X85.289  
G00 Z5.



G01 X122.483 Y20. F5000.  
 Z3. F50.  
 Z2.5  
 X84.403 Z1.17 F250.  
 G03 X82.131 Y19.454 Z1.088 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y11.437 Z0.472  
 G02 X59.597 Y9.8 Z0.225 I-6.815 J13.363  
 G01 X37. Z-0.564  
 G02 X32. Y14.8 Z-0.839 I0. J5.  
 G01 Y40.2 Z-1.726  
 G02 X37. Y45.2 Z-2. I5. J0.  
 G01 X59.597  
 G02 X66.412 Y43.563 I0. J-15.  
 G01 X82.131 Y35.546  
 G03 X84.403 Y35. I2.272 J4.454  
 G01 X127.349  
 G03 X131.68 Y37.5 I0.001 J5.  
 G02 Y17.5 I17.32 J-10.  
 G03 X127.349 Y20. I-4.33 J-2.5  
 G01 X84.403  
 G03 X82.131 Y19.454 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y11.437  
 G02 X59.597 Y9.8 I-6.815 J13.363  
 G01 X37.  
 G02 X32. Y14.8 I0. J5.  
 G01 Y40.2  
 G02 X37. Y45.2 I5. J0.  
 G01 X59.597 Z-2.789  
 G02 X66.412 Y43.563 Z-3.036 I0. J-15.  
 G01 X82.131 Y35.546 Z-3.652  
 G03 X84.403 Y35. Z-3.735 I2.272 J4.454  
 G01 X92. Z-4.  
 X127.349  
 G03 X131.68 Y37.5 I0.001 J5.  
 G02 Y17.5 I17.32 J-10.  
 G03 X127.349 Y20. I-4.33 J-2.5  
 G01 X84.403  
 G03 X82.131 Y19.454 I0. J-5.  
 G01 X66.412 Y11.437  
 G02 X59.597 Y9.8 I-6.815 J13.363

G01 X37.  
G02 X32. Y14.8 I0. J5.  
G01 Y40.2  
G02 X37. Y45.2 I5. J0.  
G01 X59.597  
G02 X66.412 Y43.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y35.546  
G03 X84.403 Y35. I2.272 J4.454  
G01 X92.  
X127.349 Z-5.234  
G03 X131.68 Y37.5 Z-5.417 I0.001 J5.  
G02 X144.776 Y47.049 Z-6. I17.32 J-10.  
X131.68 Y17.5 I4.224 J-19.549  
G03 X127.349 Y20. I-4.33 J-2.5  
G01 X84.403  
G03 X82.131 Y19.454 I0. J-5.  
G01 X66.412 Y11.437  
G02 X59.597 Y9.8 I-6.815 J13.363  
G01 X37.  
G02 X32. Y14.8 I0. J5.  
G01 Y40.2  
G02 X37. Y45.2 I5. J0.  
G01 X59.597  
G02 X66.412 Y43.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y35.546  
G03 X84.403 Y35. I2.272 J4.454  
G01 X127.349  
G03 X131.68 Y37.5 I0.001 J5.  
G02 X144.776 Y47.049 I17.32 J-10.  
X158.425 Y9.861 Z-8. I4.224 J-19.549  
X131.68 Y17.5 I-9.425 J17.639  
G03 X127.349 Y20. I-4.33 J-2.5  
G01 X84.403  
G03 X82.131 Y19.454 I0. J-5.  
G01 X66.412 Y11.437  
G02 X59.597 Y9.8 I-6.815 J13.363  
G01 X37.  
G02 X32. Y14.8 I0. J5.  
G01 Y40.2  
G02 X37. Y45.2 I5. J0.

G01 X59.597  
G02 X66.412 Y43.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y35.546  
G03 X84.403 Y35. I2.272 J4.454  
G01 X127.349  
G03 X131.68 Y37.5 I0.001 J5.  
G02 X158.425 Y9.861 I17.32 J-10.  
X131.68 Y17.5 Z-9.074 I-9.425 J17.639  
G03 X127.349 Y20. Z-9.257 I-4.33 J-2.5  
G01 X106.071 Z-10.  
X84.403  
G03 X82.131 Y19.454 I0. J-5.  
G01 X66.412 Y11.437  
G02 X59.597 Y9.8 I-6.815 J13.363  
G01 X37.  
G02 X32. Y14.8 I0. J5.  
G01 Y40.2  
G02 X37. Y45.2 I5. J0.  
G01 X59.597  
G02 X66.412 Y43.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y35.546  
G03 X84.403 Y35. I2.272 J4.454  
G01 X127.349  
G03 X131.68 Y37.5 I0.001 J5.  
G02 Y17.5 I17.32 J-10.  
G03 X127.349 Y20. I-4.33 J-2.5  
G01 X106.071  
X84.403 Z-10.757  
G03 X82.131 Y19.454 Z-10.839 I0. J-5.  
G01 X78.024 Y17.36 Z-11.  
X66.412 Y11.437  
G02 X59.597 Y9.8 I-6.815 J13.363  
G01 X37.  
G02 X32. Y14.8 I0. J5.  
G01 Y40.2  
G02 X37. Y45.2 I5. J0.  
G01 X59.597  
G02 X66.412 Y43.563 I0. J-15.  
G01 X82.131 Y35.546  
G03 X84.403 Y35. I2.272 J4.454

```
G01 X127.349
G03 X131.68 Y37.5 I0.001 J5.
G02 Y17.5 I17.32 J-10.
G03 X127.349 Y20. I-4.33 J-2.5
G01 X84.403
G03 X82.131 Y19.454 I0. J-5.
G01 X78.024 Y17.36
G00 Z15.
```

```
M05
M09
G53 G00 Z0.
X100.
G53 Y0.
M30
```

**CNC program drilling:**

```
O00011
(Using high feed G1 F5000. instead of G0.)
(T1 D=6. CR=0. TAPER=90deg - ZMIN=-14. - spot drill)
(T2 D=11. CR=0. TAPER=118deg - ZMIN=-14.305 - drill)
(T3 D=3.5 CR=0. TAPER=118deg - ZMIN=-12.052 - drill)
G90 G94 G17
G21
G53 G00 Z0.
```

```
(6mm)
T1 M06
S8000 M03
G54
M08
G00 X49. Y80.
G43 Z15. H01
T4
G00 Z5.
G98 G81 X49. Y80. Z-13. R3. F583.
Y65.
Y35.
```

Y20.  
G80  
G00 Z15.  
M05  
G53 G00 Z0.

(senterbor)

M01  
T4 M06  
S2650 M03  
G54  
G00 X149. Y72.5  
G43 Z15. H04  
T3  
G00 Z5.  
G98 G81 X149. Y72.5 Z-2. R3. F583.  
Y27.5  
G80  
G00 Z15.  
M05  
G53 G00 Z0.

(11mm)

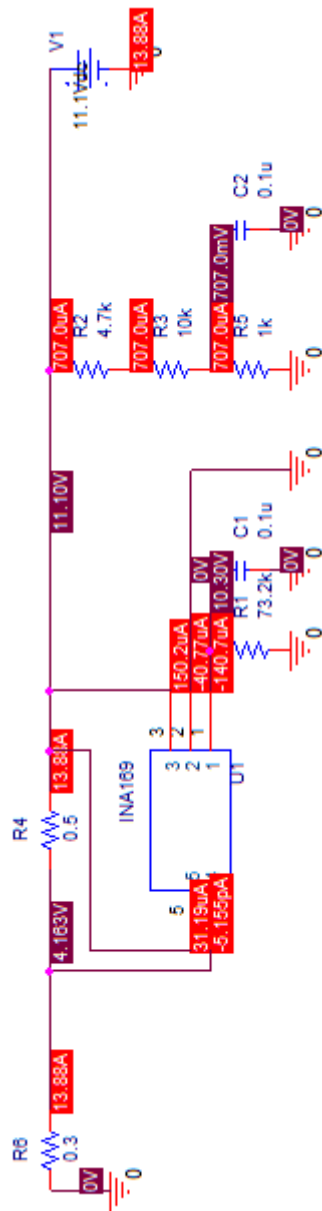
M01  
T3 M06  
S2650 M03  
G54  
G00 X149. Y72.5  
G43 Z15. H03  
T5  
G00 Z5.  
G98 G81 X149. Y72.5 Z-15. R3. F583.  
Y27.5  
G80  
G00 Z15.  
M05  
G53 G00 Z0.

(Drill3)

M01  
T5 M06  
S8320 M03  
G54  
G00 X155.718 Y20.782  
G43 Z15. H05  
T1  
G00 Z5.  
G98 G81 X155.718 Y20.782 Z-12. R3. F582.  
X143.343 Y21.843  
X142.282 Y34.218  
X154.657 Y33.157  
X155.718 Y65.782  
X143.343 Y66.843  
X142.282 Y79.218  
X154.657 Y78.157  
G80  
G00 Z15.

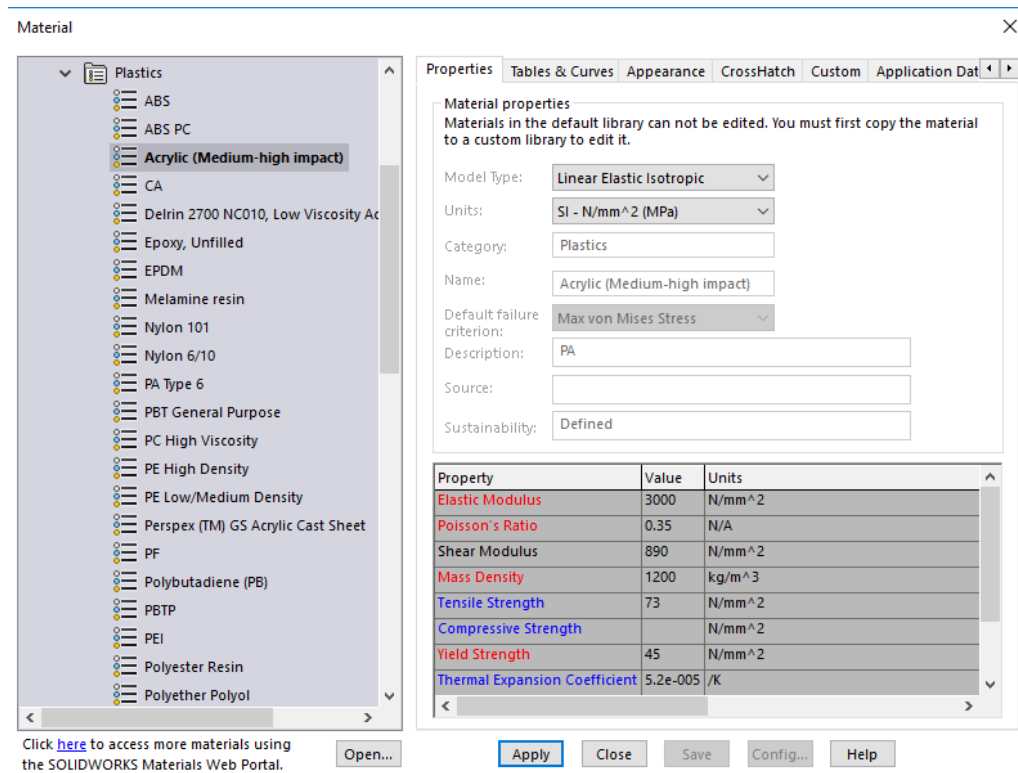
M05  
M09  
G53 G00 Z0.  
X100.5  
G53 Y0.  
M30

Vedlegg 5: AttoPilot simulering



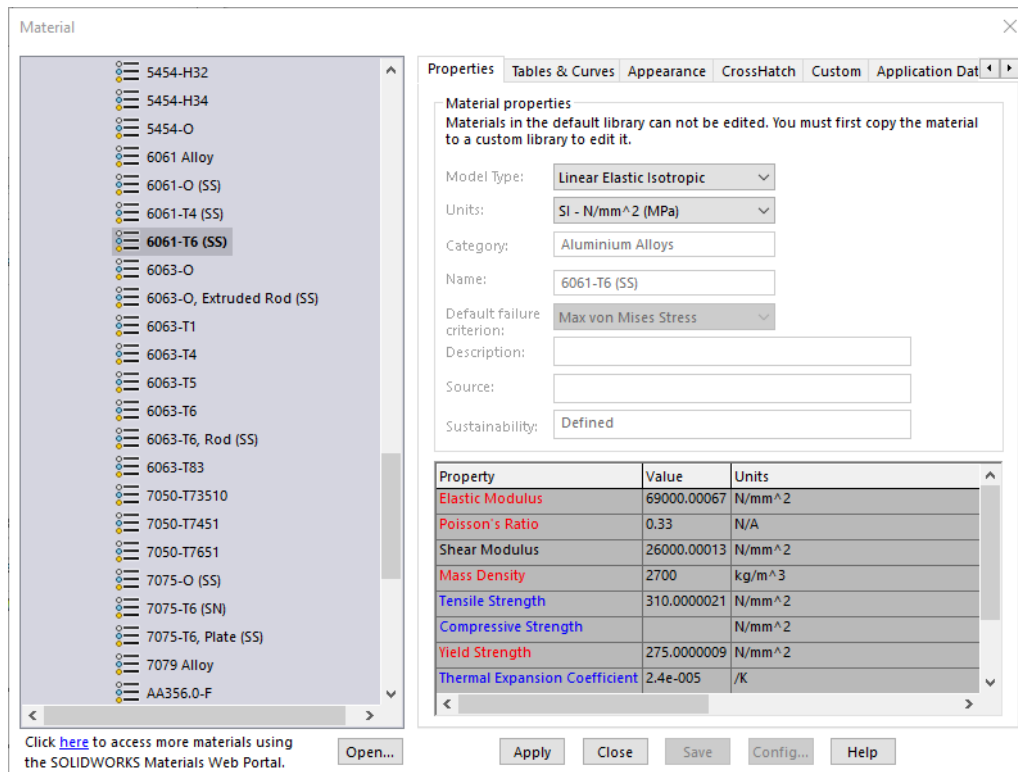
Figur 9.14: Simulering av AttoPilot

## Vedlegg 6: Materialer brukt i materialvalg analyser

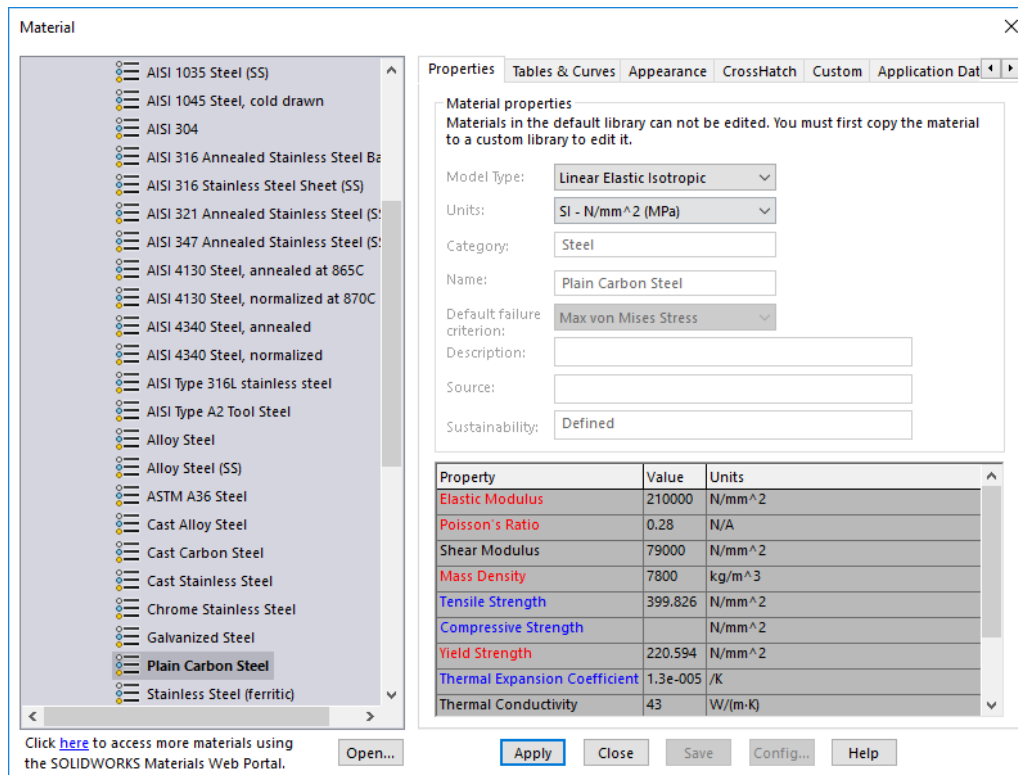


Figur 9.15: Materialegenskapene til akryl brukt under FEM-analyser ved materialvalg



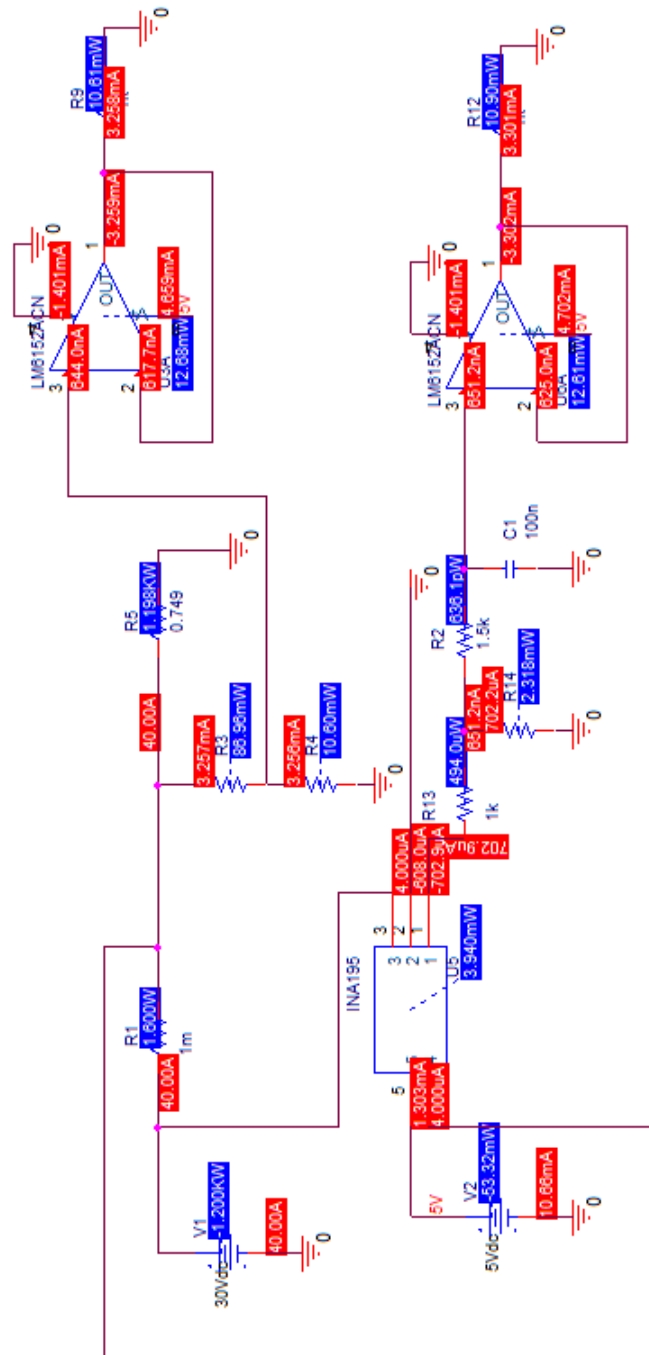


Figur 9.16: Materialegenskapene til aluminium 6061-t6 brukt under FEM-analyser ved materialvalg

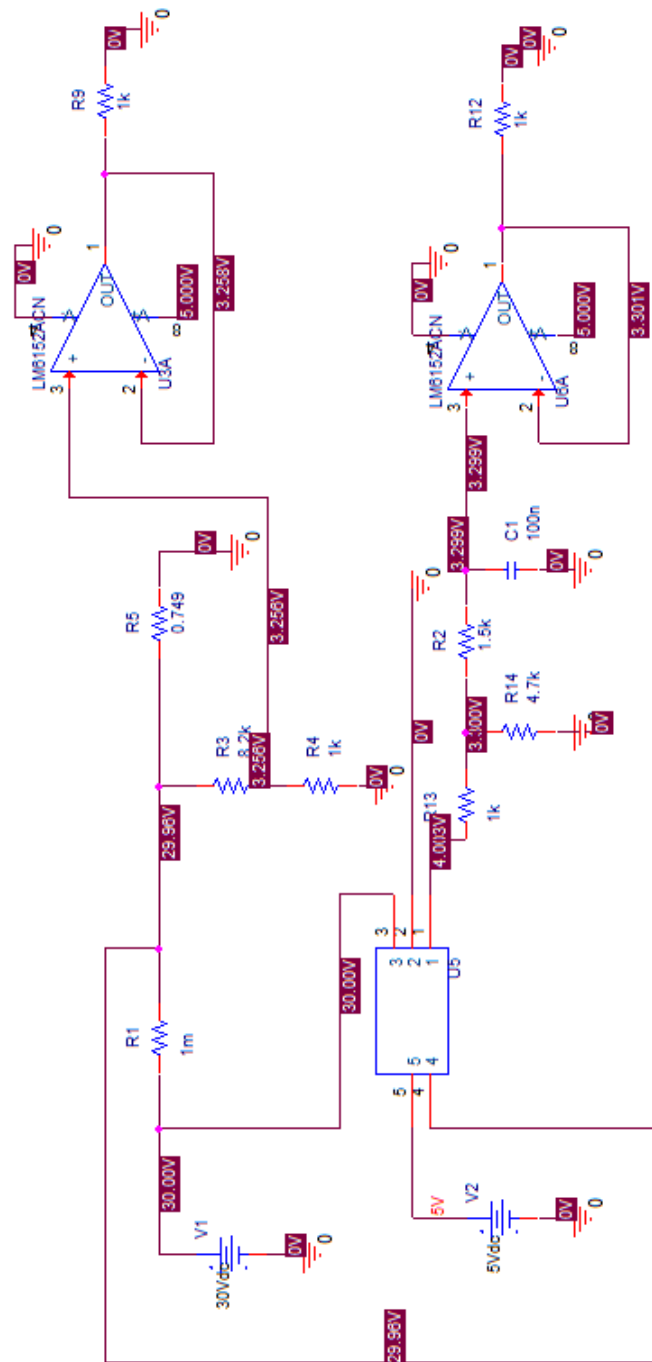


Figur 9.17: Materialegenskapene til konstruksjonsstål brukt under FEM-analyser ved materialvalg

## Vedlegg 7: Simulering av kretsdesign



Figur 9.18: Strøm og effekt simulert i kretsdesign



Figur 9.19: Spenning simulert i kretsdesign

## Vedlegg 8: Versjonskontroller

Dette avsnittet gir en oversikt over utviklingen for de forskjellige versjonene av dokumentasjonen.

### Computer Numerical Control Fresing

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	16.05.17	Dokument opprettet	Truls Øhrn
0.1	16.05.17	Dokumentasjon av cnc fresing	Truls Øhrn
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

### Destruktiv Testing

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	16.03.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
0.1	23.03.17	Ferdigstilt rapport	Halvard Thon
0.2	23.03.17	Rettskrevet	Fredrik Hansen
1.0	27.03.17	Revidert til publisering	Fredrik Hansen
1.2	15.05.17	Gjennomlest og rettskrevet. Rettelse av labels for figurer.	Halvard Thon
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Halvard Thon

\*Ground Effect

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.1	17.02.17	Dokument opprettet	Truls Øhrn
0.2	02.03.17	Lagt til 2.1, 2.2 og 2.3	Eivind Foss-Pedersen
1.0	27.03.17	Revidert til publisering	Halvard Fredrik
1.1	20.05.17	Referanser oppdatert	Halvard Thon
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

**Innfesting**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	16.02.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
0.1	17.02.17	Ferdigstilt rapport	Halvard Thon
1.0	27.03.17	Revidert for publisering	Halvard Fredrik
1.2	12.03.17	Tillegg til konklusjon lagt til	Halvard Thon
1.3	19.05.17	Gjennomlest og rettskrevet, kilder og referanser oppdatert	Halvard Thon
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Halvard Thon

**Moment i innfesting**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	27.04.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
0.1	29.4.17	Figurer lagt til	Halvard Thon
0.2	16.05.17	Rettskrevet og referanser lagt til	Halvard Thon
0.3	18.05.17.	Avsnitt om bremsing og tregghet lagt til	Halvard Thon
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

**Oppløsning og Usikkerhet**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.1	14.03.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
0.3	17.03.17	Omformulert og endret, avsnitt om Justervesenet fjernet	Halvard Thon
1.0	27.03.17	Revidert for publisering	Halvard Thon
1.1	20.05.17	Tittel endret, avsnitt om oppløsning lagt til	Halvard Thon
1.2	21.05.17	Figurer lagt til, avsnitt om lastcellens usikkerhet lagt til	Halvard Thon
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

**Ledningsnett**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.1	14.05.17	Dokument opprettet	Fredrik Hansen
0.2	16.05.17	Bilder lagt til	Fredrik Hansen
0.3	19.05.17	Dokumentasjon lagt til	Fredrik Hansen
0.4	20.05.17	Dokument oppdatert	Fredrik Hansen
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Halvard Thon

### Prototype Konstruksjon

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	10.03.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
0.1	14.03.17	Ferdigstilt	Halvard Thon
0.2	16.03.17	Revidert	Fredrik Hansen
1.0	27.03.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen
1.1	14.05.17	Referanser oppdatert	Halvard Thon
1.2	19.05.17	Bildetekst rettet	Halvard Thon
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Truls Øhrn

### Sikkerhet

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.1	26.04.17	Dokument opprettet	Fredrik Hansen
0.2	11.05.17	Dokument oppdatert	Fredrik Hansen
0.3	12.05.17	Bilder lagt til	Fredrik Hansen
0.4	20.05.17	Dokument oppdatert	Fredrik Hansen
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Halvard Thon

### Konsept

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	01.03.17	Dokument opprettet	Fredrik Hansen
0.1	02.03.17	Redigert innhold	Fredrik Hansen
0.2	09.03.17	Revidert	Cecilie Dokken
0.3	24.03.17	Figurer av konsepter lagt til	Eivind Foss-Pedersen
0.4	27.03.17	Figurer endret	Halvard Thon
1.0	27.03.17	Revidert til publisering	Halvard Thon



**Materialvalg Innfesting**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.1	16.03.17	Dokument opprettet	Eivind Foss-Pedersen
0.2	22.03.17	Revidert	Eivind Foss-Pedersen
1.0	27.03.17	Revidert for publisering	Halvard Fredrik
2.0	23.05.17	Revidert for publisering	Eivind Foss-Pedersen

**Sensorarm**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.1	09.05.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
02.	15.05.17	Rettskrevet og figurer tilpasset	Halvard Thon
03.	15.05.17	Dokument ferdigstilt	Halvard Thon
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Halvard Thon

**Varibel pitch**

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	10.05.17	Dokument opprettet	Halvard Thon
0.1	11.05.17	Figurer lagt til	Halvard Thon
0.2	12.05.17	Konklusjon lagt til og ferdigstilt	Halvard Thon
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

## GUI

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	15.05.17	Dokument opprettet	Eivind Foss-Pedersen
0.1	16.05.17	Brødtekst lagt inn	Eivind Foss-Pedersen
0.2	22.05.17	Flytdiagram lagt til	Eivind Foss-Pedersen
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

## Mikrokontroller

Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	09.03.17	Dokument opprettet	Cecilie Dokken
0.1	23.03.17	Sammendrag, innledning og kap. 2 lagt til	Cecilie Dokken
0.2	24.03.17	Kap. 3 og 4 lagt til	Cecilie Dokken
1.0	27.03.17	Revidert for publisering	Halvard Fredrik

## Sensorer

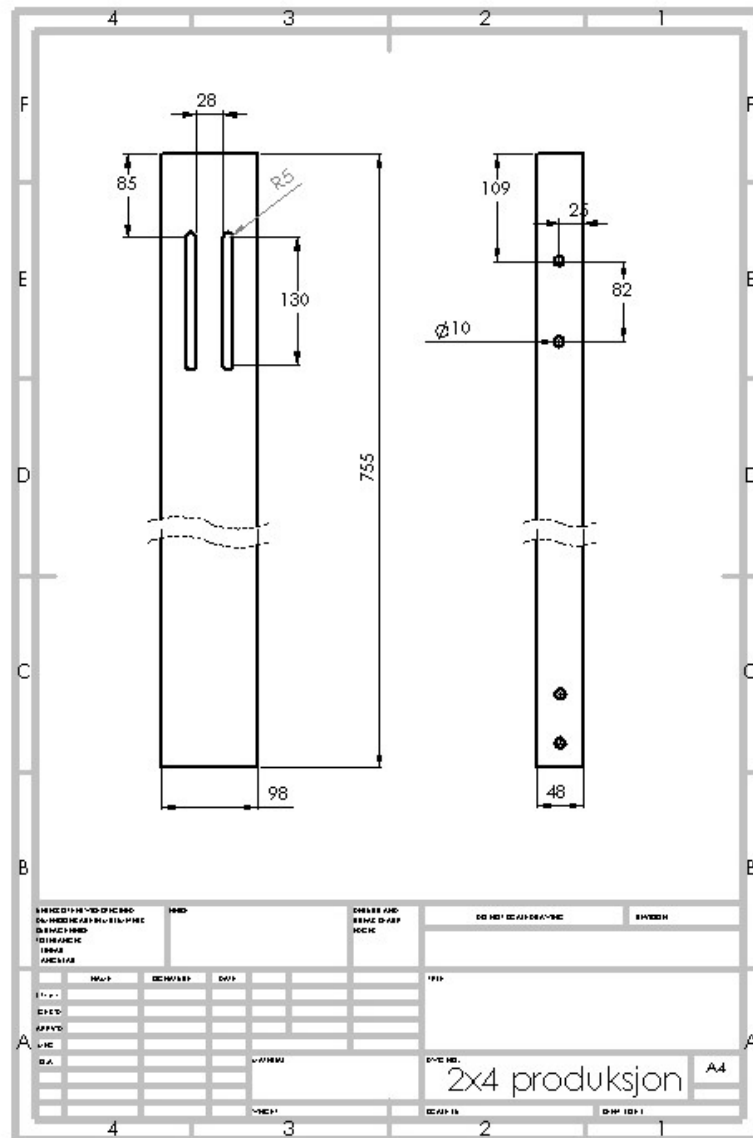
Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	11.05.17	Dokument opprettet	Cecilie Dokken
0.1	13.05.17	Innledning skrevet, oppsett satt opp og kap. 3 påbegynt	Cecilie Dokken
0.2	14.05.17	Kap 3 ferdigstilt. Kap. 4 lagt til.	Cecilie Dokken
0.3	15.05.17	Avsnitt om <i>double-bending beam</i> lagt til under seksjon PC22-lastcelle	Halvard Thon
0.4	22.05.17	Kap. 5 lagt til	Cecilie Dokken
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

**Kretskortdesign**

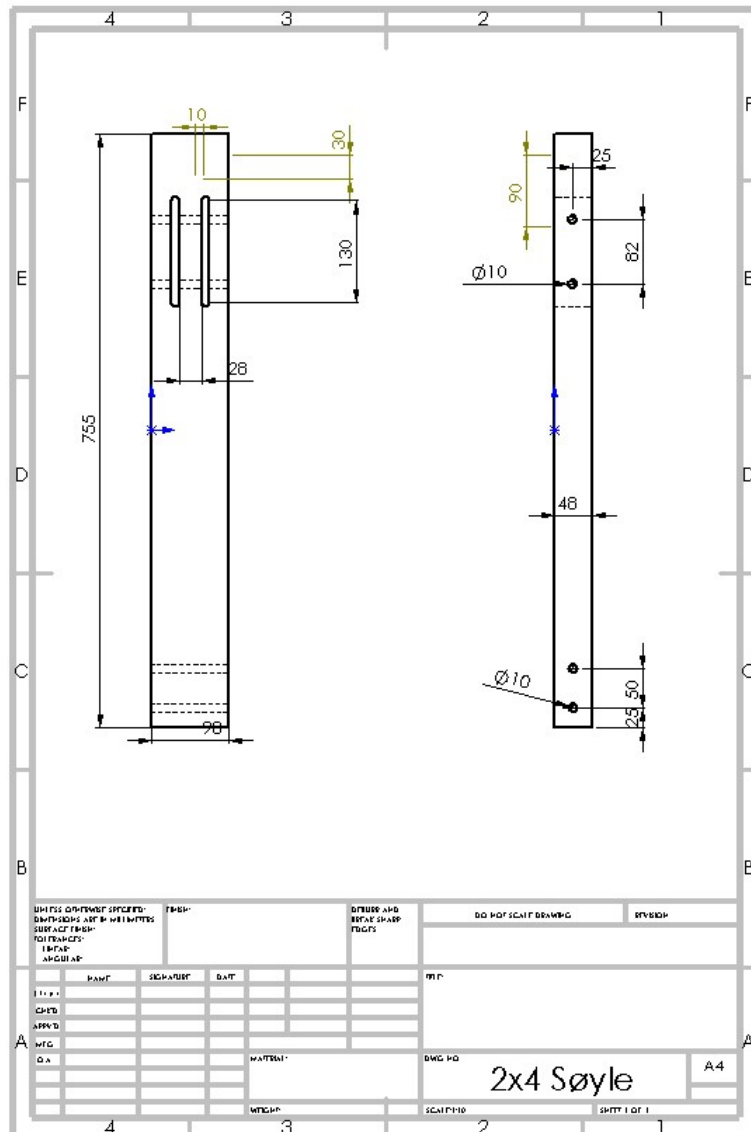
Versjon	Dato	Endring	Godkjent av
0.0	22.05.17	Dokument opprettet	Cecilie Dokken
0.1	23.05.17	Dokumentasjon lagt til	Cecilie Dokken
1.0	23.05.17	Revidert for publisering	Fredrik Hansen

## Vedlegg 9: DAK 2D tegninger

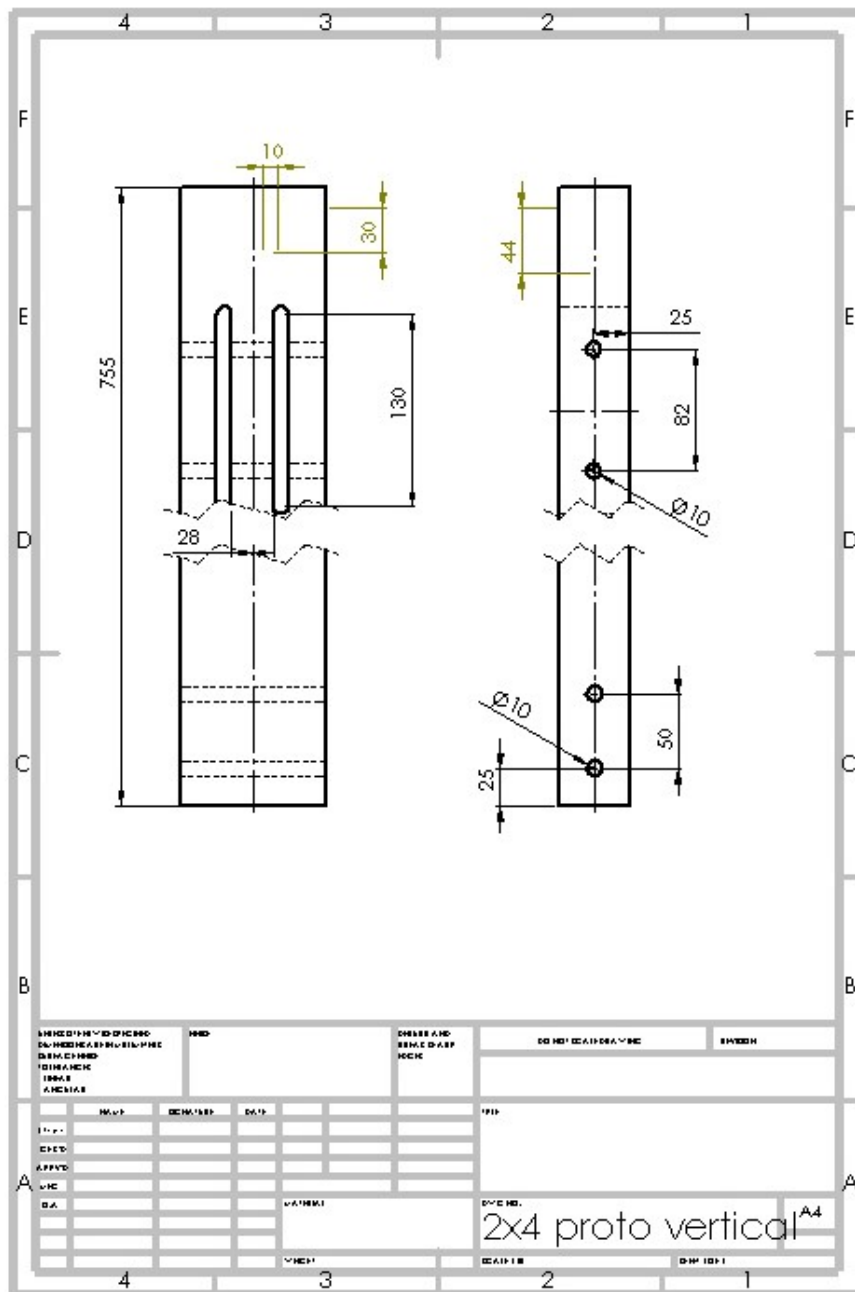
Vedlagt et utvalg 2D tegninger:



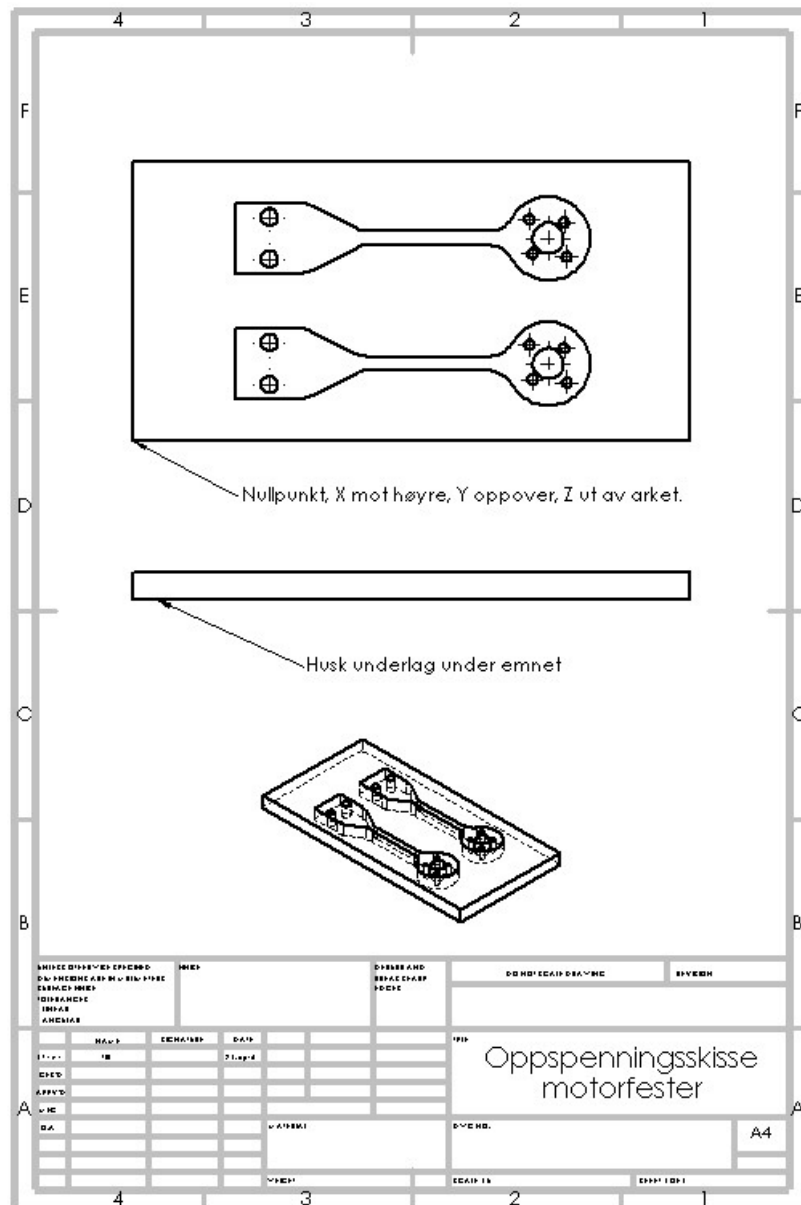
Figur 9.20: 2x4 tegning



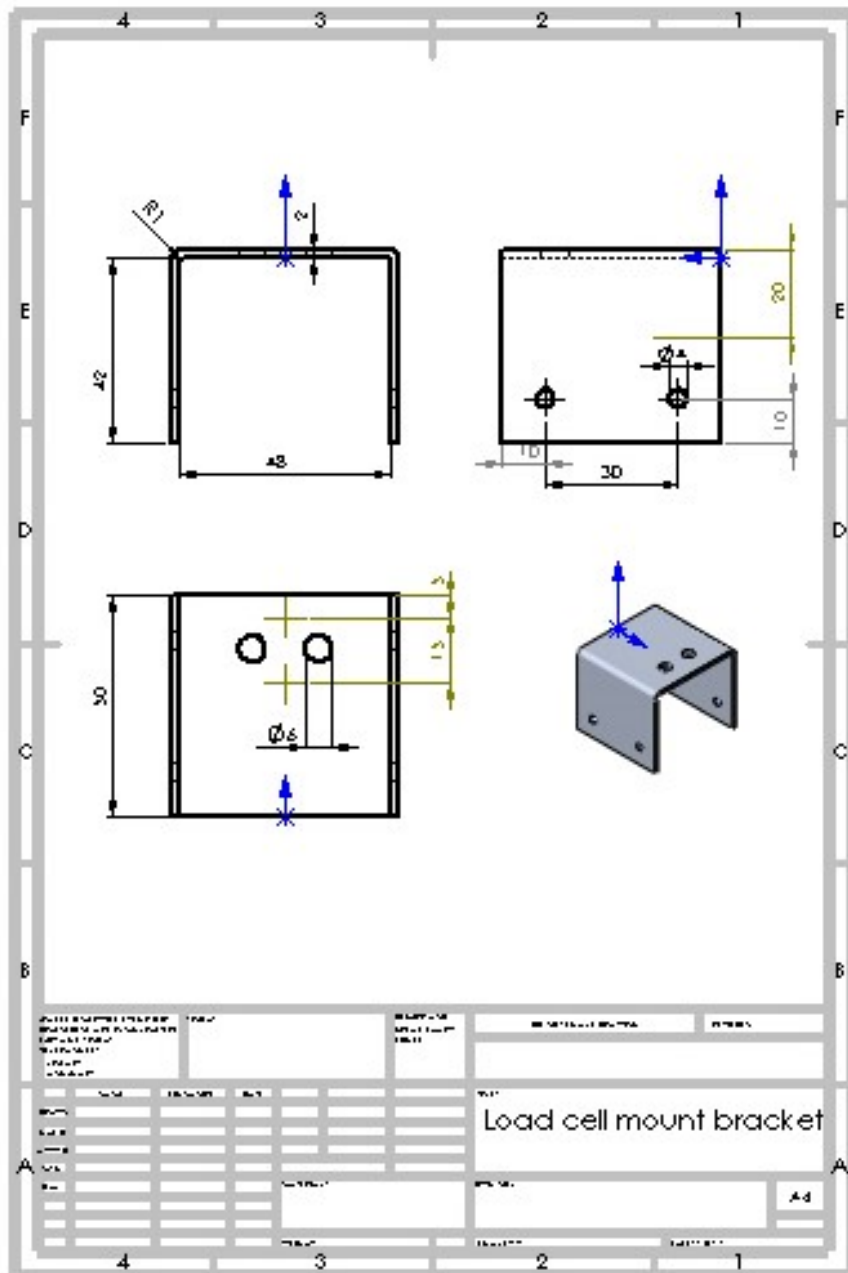
Figur 9.21: 2x4 tegning søyle



Figur 9.22: 2x4 tegning vertikal søyle



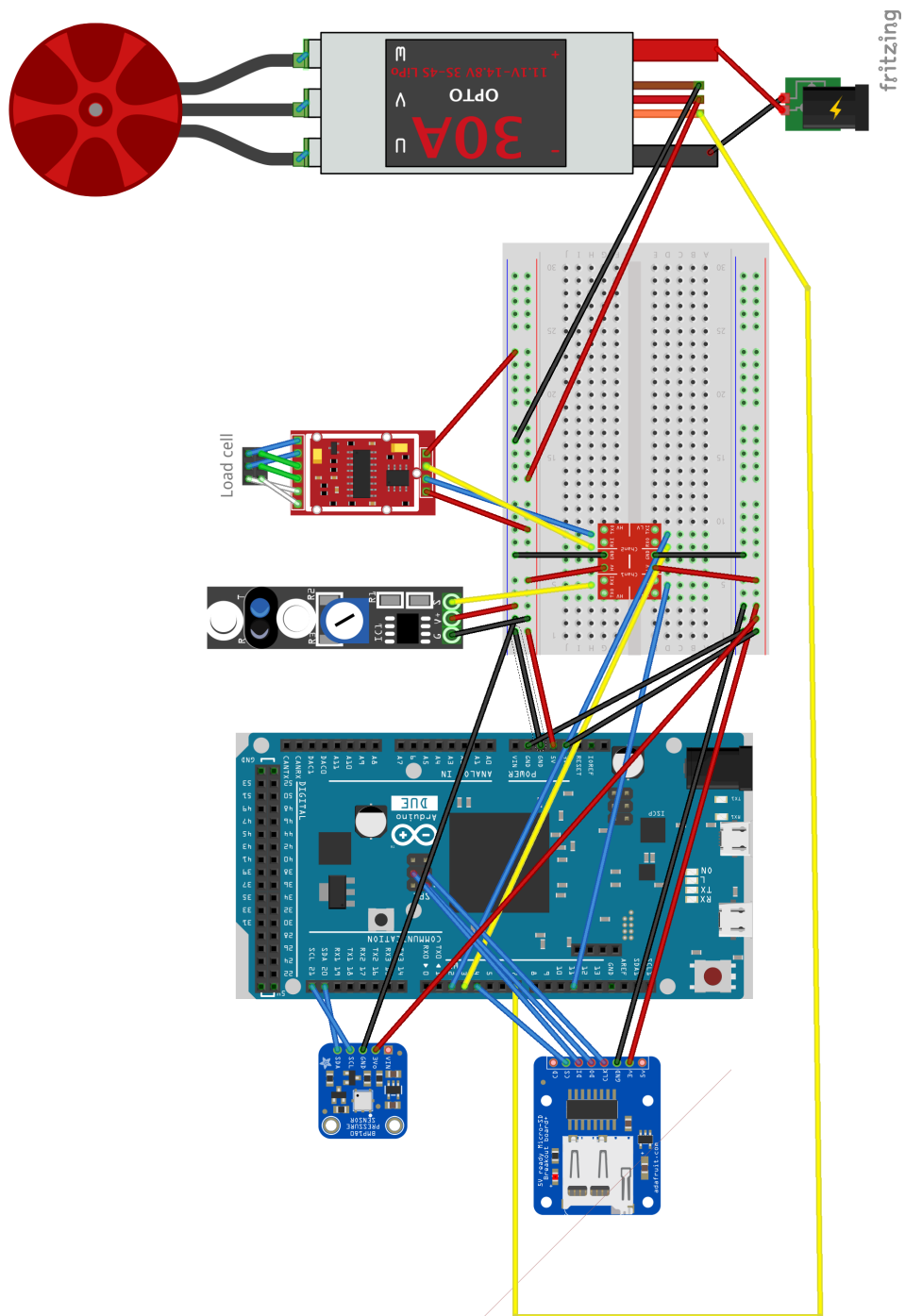
Figur 9.23: Oppspenningsskisse



Figur 9.24: Innfestning lastcelle



### Vedlegg 10: Kretstegning for maskinvare



Figur 9.25: Kretstegning for maskinvare

