

Andreas Reberg

# Laserbasert måling av verktøyposisjon

Juni 2019



# Laserbasert måling av verktøyposisjon

**Andreas Reberg**

Produksjon og Produktutvikling

Innlevert: Juni 2019

Hovedveileder: Knut Sørby

Medveileder: Dan Östling

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for maskinteknikk og produksjon



# Laserbasert måling av verktøyposisjon

Andreas Reberg

Juni 2019

MASTEROPPGAVE

Institutt for Maskinteknikk og Produksjon  
Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet



**NTNU – Trondheim**  
Norwegian University of  
Science and Technology

Veileder ved NTNU: Knut Sørby

Veileder Sandvik Coromant: Dan Östling

## Sammendrag

Sandvik Coromant ønsket et prosjekt for å kartlegge hvorvidt laserbasert måling av verktøyposisjon kan være et av deres neste prosjekter, for å fortsatt være markedsledende på høyteknologisk maskineringsutstyr også i årene som kommer. Det foreligger en tanke om at laserbaserte verktøy vil være supplementerende for dagens verktøy med innebygde strekkklapper, og at de på sikt også kan ta over markedsandelen til disse verktøyene.

Det er gjennomført et arbeid ved å se på sensorer, laserteknologi, komponenter relatert til laserteknologi og deres nøyaktighet. Et litteraturstudie er gjennomført for å skaffe et grunnlag for arbeidet, og det er gjennomført en rekke forsøk av ulikt omfang for å besvare oppgavens spørsmål og å underbygge egne oppfatninger rundt bruksområde og begrensninger for et system basert på laserteknologi. Det er sett på tidligere bruk av laser på relaterte bruksområdet, og det er kommet opp forslag til hvordan dette kan kombineres med ønsket til Sandvik Coromant for implementering i verktøy i fremtiden.

For å underbygge de avgjørelsene som blir tatt i oppgaven er det gjennomført forsøk både hos NTNU Valgrinda i en eldre dreiebank, og hos Sandvik Coromant på Ranheim i en nyere CNC-styrt dreiebank. Det ble benyttet flere ulike sensorer og lasermoduler, forskjellig software og instrumenter for innsamling av data. Det kan nevnes en lasertracker av typen Leica AT960 med presisjon ned mot 1  $\mu\text{m}$ .

Resultatene kommenteres underveis, og det redegjøres for feilkilder og tolkninger omkring data som hentes ut. Det blir gitt en anbefaling for videre arbeid og valg av komponenter basert på det som er observert underveis i arbeidet, med hensyn på fysisk størrelse, kompleksitet og funksjon. Oppgaven danner grunnlag for videre arbeid med konseptet.

## Summary

Sandvik Coromant wanted a project to find out whether laser-based control of tool tip position could be one of their next inventions in order to fortify their position as a marked lead on high-tech machining equipment also in the years to come. There's a theory that laser-based tools will be supplementing today's tools with built-in strain gauges, and that during the time to come they also might replace them completely.

A study on sensors, laser technology, components related to laser technology and their accuracy has been completed. A literature study has been conducted in order to provide the knowledge a task like this require, and a series of tests of different scales was done in order to answer the problems of the task and to back up solutions questioning both the usage and limitations of a system based on laser technology. It has been a study on previous usage of laser on related topics, and it has been developed suggestions on how to combine this with Sandvik Coromant's desire to implement the technology into their tools in the future.

In order to substantiate the decisions taken during the work, tests have been made at NTNU Valgrinda in one of their lathes, and at Sandvik Coromant's factory in a modern CNC-controlled lathe. Several different sensors and laser modules, software and instruments for collection of data were used during the tests. Among other a laser tracker of the type Leica AT960 with a precision close to 1  $\mu\text{m}$ .

The results are discussed throughout the thesis, and sources of error and interpretations are accounted for. A recommendation is given for further work and a choice of components for implementation is given based on observations during the work, taking physical size, complexity and function into consideration. The thesis forms a foundation for further work on the concept.

## Forord

Denne oppgaven er skrevet som en avslutning av mitt to-årige masterstudium innenfor Produksjon og Produktutvikling ved NTNU, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim. Oppgaven er skrevet i samarbeid med Sandvik Coromant, og er en videreføring av en semesteroppgave for høstsemesteret 2018. Jeg bestemte meg for å fortsette med samme tema for oppgaven som jeg hadde i prosjektoppgaven, da det gjensto en del testing før det var mulig å konkludere med om konseptet fra Sandvik Coromant var noe å bygge videre på. Oppgaven passer meg og min bakgrunn som industrimekaniker godt, i tillegg til min interesse for mekatronikk og sensorikk.

Problemstillingen er interessant i den forstand at temaet er nytt - det finnes i dag ingen kommersielle borstenger med et laserbasert system for å kommunisere posisjon på markedet. Temaet er også helt nytt for kandidaten når det gjelder bruk av laser og behandling av måledata. Våren har vært lærerik, og jeg har tilegnet meg ekstra kunnskap om lasere, sensorer og ulik software. Jeg har erfart at prosjekter hvor en har et gitt tidsvindu i tillegg til å være avhengig av andre parter for gjennomføring krever planlegging og byr på utfordringer som i utgangspunktet ikke nødvendigvis ble ansett som en problemstilling.

Det rettes en stor takk til Knut Sørby ved Institutt for maskinteknikk og produksjon ved NTNU for veiledning underveis, og som en av få med opplæring på den nye lasertrackeren Leica AT960 sitt bidrag ved praktiske forsøk hvor denne ble benyttet. Det rettes også en takk til Dan Östling ved Sandvik Coromant som var min kontaktperson i bedriften, for bidrag med fremskaffelse av komponenter som ble benyttet i oppgaven og tilstedeværelse under forsøk hos Sandvik Coromant. Det rettes også en takk for omvisning ved produksjonsanlegget til Sandvik Coromant.



Andreas Reberg

Trondheim, 8. Juni 2019



# Innhold

Sammendrag . . . . .	i
Summary . . . . .	ii
Forord . . . . .	iii
<b>1 Innledning</b>	<b>2</b>
1.1 Prosjektoppgave . . . . .	3
1.2 Oppgavetekst . . . . .	3
1.3 Bakgrunn for oppgavevalg . . . . .	4
1.4 Formål med oppgaven . . . . .	4
1.5 Sandvik Coromant . . . . .	4
1.6 Tilnærming til oppgaven . . . . .	6
1.7 Begrensninger . . . . .	6
1.8 Rapportens oppbygning . . . . .	7
<b>2 Teori</b>	<b>10</b>
2.1 Laser . . . . .	10
2.2 Posisjonssensor . . . . .	15
2.3 Beamsplitter . . . . .	19
2.4 Speil . . . . .	20
2.5 Data Acquisition . . . . .	21
2.6 LabVIEW . . . . .	22
2.7 Python . . . . .	23
2.8 TOS SN 50 C . . . . .	23
2.9 Innvendig maskinering . . . . .	24

2.10 Tidligere bruk av laser . . . . .	29
2.10.1 Smart Boring Tool . . . . .	29
2.11 Dreiebenkens oppbygning . . . . .	31
2.12 Lasertracker . . . . .	32
2.13 Strømkilde . . . . .	34
<b>3 Metode</b>	<b>38</b>
3.1 Akkumulering av data . . . . .	38
3.2 Fremstilling av måledata . . . . .	40
3.3 Statistiske målinger i dreiebank . . . . .	41
3.4 Målinger Sandvik Coromant . . . . .	43
<b>4 Beregninger</b>	<b>45</b>
4.1 Krefter . . . . .	45
4.2 Utbøyning av borstang . . . . .	46
4.3 Rotasjon av koordinatsystem . . . . .	49
<b>5 Labtester</b>	<b>52</b>
5.1 Statistiske målinger i dreiebank . . . . .	52
5.2 Dynamiske målinger i dreiebank . . . . .	55
5.3 Tester i Giana hos Sandvik Coromant . . . . .	56
5.4 Test av NI USB-6009 . . . . .	57
5.5 Test av sensorer . . . . .	58
<b>6 Resultat</b>	<b>59</b>
6.1 Statistiske målinger i dreiebank . . . . .	59
6.2 Dynamiske målinger i dreiebank . . . . .	69
6.3 Dreiebenkens påvirkning på resultatet . . . . .	74
6.4 Tester i Giana hos Sandvik Coromant . . . . .	77
6.4.1 Testkjøring $X_g$ -akse . . . . .	77
6.4.2 Sjekk av helning grunnet feilmontering . . . . .	78
6.4.3 Sjekk av slark i sleider og mateskruer . . . . .	83

6.4.4	Maskineringens påvirkning på toppsleiden . . . . .	84
6.5	Test av NI USB-6009 . . . . .	90
6.6	Test av sensorer . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Innbygging</b>	<b>94</b>
7.1	Antall komponenter . . . . .	94
7.2	Robusthet . . . . .	96
7.2.1	Sensor . . . . .	96
7.2.2	Beamsplitter og speil . . . . .	97
7.2.3	Lasermodul . . . . .	97
7.3	Målenøyaktighet . . . . .	98
7.4	Design og plassering av komponenter . . . . .	98
7.4.1	Forslag 1 - Laser og sensorcelle i senter . . . . .	99
7.4.2	Forslag 2 - Bruk av beamsplitter og speil . . . . .	101
7.4.3	Forslag 3 - Bruk av to speil . . . . .	103
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>106</b>
<b>9</b>	<b>Videre Arbeid</b>	<b>108</b>
	<b>Bibliografi</b>	<b>109</b>
<b>A</b>	<b>Forkortelser og ordforklaringer</b>	<b>113</b>
<b>B</b>	<b>Måledata Giana</b>	<b>115</b>
<b>C</b>	<b>Figurer Kapittel 6</b>	<b>120</b>
<b>D</b>	<b>Skisser innbygging</b>	<b>136</b>
<b>E</b>	<b>Mathcad, Utbøyning av borstang</b>	<b>140</b>
<b>F</b>	<b>Risk Assessment</b>	<b>143</b>

# Figurer

1.1	Logo Sandvik Coromant, hentet fra Eastec (2019)	5
1.2	Verktøyholder for innvendig maskinering med demping, hentet fra Sandvik (2013)	5
2.1	Skisse PN-laser, hentet fra Electrical4U (2019)	11
2.2	Elektronnivåer, hentet fra KhanAcademy (2015)	12
2.3	Skisse PN-laser, hentet fra Sun (2012)	13
2.4	Elliptisk til sirkulær stråle, hentet fra Sun (2015)	14
2.5	Lyssensor, Thorlabs (2019b)	15
2.6	Lyssensor, Thorlabs (2019c)	15
2.7	PDQ80A, Thorlabs (2019c)	16
2.8	PDP90A, Thorlabs (2019b)	17
2.9	QD50-0-SD OSIOptoelectronics (2019)	18
2.10	Sensormodul fra Sandvik Coromant	18
2.11	10mm Ikke-Polariserende Strålesplitter EdmundOptics (2019b)	19
2.12	Speil Ø10, EdmundOptics (2019c)	20
2.13	Speil Ø25, EdmundOptics (2019d)	20
2.14	USB-6009, hentet fra ResearchGate (2019)	21
2.15	Fronpanel, brytere på	22
2.16	Block diagram	22
2.17	KS sylinderhoner, hentet fra Sletteboe.no (2019)	25
2.18	Innvendig maskinering, hentet fra ProductionMachining (2019)	25
2.19	Kraftretninger, hentet fra Kuster and Gyfax (1990)	27

2.20 Verdier for $K_s$ , hentet fra kapittel 3 i Machining Dynamics av Schmitz and Smith (2008) . . . . .	27
2.21 Forflytning av skjærebiter grunnet torsjon . . . . .	28
2.22 Boring av lagerflater i motorblokk, hentet fra Min et al. (2002). . . . .	30
2.23 Dreiebenkens oppbygning, hentet fra Custompartnet (2019) . . . . .	31
2.24 Leica AT960, hentet fra DirectIndustry (2019) . . . . .	33
2.25 Reflektorkuler, hentet fra Hexagon (2019c) . . . . .	33
2.26 Leica T-probe, hentet fra Hexagon (2019b) . . . . .	33
2.27 Nettadapter, hentet fra Biltema (2019) . . . . .	35
2.28 Koblingskjema for endring av spenning, hentet fra Duke (2013). . . . .	36
3.1 Blokkdiagram i LabVIEW . . . . .	39
3.2 Frontpanel i LabVIEW . . . . .	40
3.3 Fremstilling av graf i Python . . . . .	41
3.4 Illustrasjon av testtrigg . . . . .	41
3.5 Illustrasjon av testtrigg . . . . .	42
3.6 Plassering lasertracker . . . . .	43
3.7 Plassering 1 . . . . .	44
3.8 Plassering 2 . . . . .	44
3.9 Plassering 3 . . . . .	44
3.10 Oversiktsbilde innfestning borstang . . . . .	44
4.1 Lengder ved oppspenning . . . . .	47
4.2 Akser Giana, hentet fra HelmanCNC (2019) . . . . .	49
4.3 Plassering lasertracker i forhold til Giana . . . . .	50
5.1 Statisk forsøk, løft . . . . .	53
5.2 Statisk forsøk, nedbøyning . . . . .	54
5.3 Detalj . . . . .	54
5.4 Testoppsett DAQ-enhet . . . . .	57
5.5 Sensor fra Sandvik Coromant . . . . .	58

6.1	Koordinater ved bruk av Leica AT960	60
6.2	Forsøk 1 ved løft	62
6.3	Forsøk 2 ved løft	62
6.4	Forsøk 2 ved løft	63
6.5	Forsøk 1 ved nedtvinging	66
6.6	Forsøk 2 ved nedtvinging	66
6.7	Forsøk 1 ved nedtvinging	67
6.8	Forsøk 2 ved nedtvinging	67
6.9	Forsøk 1 ved dynamisk belastning	69
6.10	Forsøk 2 ved dynamisk belastning, slag	69
6.11	Forsøk 3 ved dynamisk belastning, slag	69
6.12	Forsøk 4 ved dynamisk belastning, slag	69
6.13	Forsøk 1 ved dynamisk belastning, $t = [7, 7.002]$ s	70
6.14	Målt spenning som en funksjon av faktisk utbøyning	71
6.15	Forsøk 1, dynamisk	72
6.16	Forsøk 1, dynamisk	72
6.17	Forsøk 2, dynamisk	73
6.18	Plassering av sokler for reflektorkule	74
6.19	Bakkens posisjon ved utbøyning	76
6.20	Bakkens posisjon ved utbøyning	76
6.21	Bakkens posisjon ved utbøyning	76
6.22	Bakkens posisjon ved utbøyning	76
6.23	Kjøremønster forsøk 11 og 12	79
6.24	Observert helning i forsøk 13	80
6.25	Visualisering av fremgangsmåte	81
6.26	Helning på Giana	82
6.27	Forsøk 8	84
6.28	Forsøk 8	84
6.29	Forsøk 8, $X_g$ korrigert	85
6.30	Sleide for $X_g$ -akse under posisjon 2 for reflektorkule	86

6.31 Forsøk 6, $X_g$ korrigert . . . . .	86
6.32 Forsøk 7, $X_g$ korrigert . . . . .	86
6.33 Forsøk 4, $X_g$ korrigert . . . . .	87
6.34 Forsøk 5, $X_g$ korrigert . . . . .	87
6.35 Forsøk 8, frikjøring . . . . .	89
6.36 Forsøk 9, kutt . . . . .	89
6.37 Forsøk 5, kutt . . . . .	89
6.38 Forsøk 2, frikjøring . . . . .	90
6.39 Forsøk 5, kutt . . . . .	90
6.40 Statisk test PDQ80A, X-diff . . . . .	91
6.41 Statisk test PDQ80A, Sum . . . . .	91
6.42 Statiske målinger, sensor fra Sandvik Coromant . . . . .	92
7.1 Visualisering av eksentrisitet, hentet fra AccuCoatInc (2019) . . . . .	95
7.2 Forslag 1 . . . . .	99
7.3 Festeordning for sensormodul i forslag 1 . . . . .	100
7.4 Brakett for bruk av beamsplitter, sett ovenfra . . . . .	102
7.5 Innbygging i borstang Ø20mm, speil i enden . . . . .	102
7.6 Plassering i borstang uten dempermasse . . . . .	103
7.7 Bruk av to speil . . . . .	103
7.8 Bruk av to speil . . . . .	104
7.9 Innretning for speil . . . . .	105
7.10 Innretning for speil . . . . .	105

# Tabeller

2.1	Spesifikasjoner for laserpekere fra Thorlabs (2019a) og EdmundOptics (2019a): . . .	14
2.2	Spesifikasjoner Posisjonssensor fra Thorlabs (2019c): . . . . .	16
2.3	Spesifikasjoner Posisjonssensor fra Thorlabs (2019b): . . . . .	17
2.4	Spesifikasjoner for Strålesplitter fra EdmundOptics (2019b): . . . . .	19
2.5	Spesifikasjoner speil, EdmundOptics (2019c), EdmundOptics (2019d). . . . .	20
4.1	Skjærekrefter for innvendig dreining, hentet fra Kuster and Gygax (1990) . . . . .	45
4.2	Dimensjoner og material verktøyholder . . . . .	47
4.3	Testkjøring $X_g$ -akse . . . . .	50
5.1	Tester hos Sandvik Coromant . . . . .	56
6.1	Avleste verdier for første forsøk . . . . .	60
6.2	Avleste verdier for andre forsøk . . . . .	61
6.3	Avleste verdier for første forsøk . . . . .	64
6.4	Avleste verdier for andre forsøk . . . . .	65
6.5	Utvalgte verdier fra tabell 6.4 . . . . .	75
6.6	Forsøk 13, Testkjøring $X_g$ -akse . . . . .	77
6.7	Forsøk 11, Testkjøring $X_g$ -akse . . . . .	79
6.8	Forsøk 12, Testkjøring $Z_g$ -akse . . . . .	79
6.9	Forsøk 12, Beregnede vinkler . . . . .	81
6.10	Forsøk 4, Vilkårilige punkter . . . . .	82
6.11	Forsøk 4, Beregnede vinkler . . . . .	82
6.12	Avleste spenninger NI USB-6009 . . . . .	90



# Kapittel 1

## Innledning

Etter årtusenskiftet har norske bedrifter både blitt lagt ned og flagget ut produksjonen til lavkostland på høygir, som en konsekvens av blant annet stadig økende kostnad på arbeidskraft. Det vi ser i bedriftene som blir værende i Norge, som produserer varer og gods som like fullt kunne vært produsert i land med bedre tilgang på arbeidskraft til en lavere pris, er en jevnt over bedre kvalitet på produktene som blir levert.

Faktorer som gjør det mulig for industrielle aktører i Norge kan være behovet for en nærliggende tjeneste med kort leveringstid, kundekontakt, krav om høy kvalitet eller eksepsjonelle produkter som er enerådende innenfor sitt felt. Denne masteravhandlingen fokuserer på de to siste. Prosjektet er et samarbeid mellom Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) ved Institutt for Maskinteknikk og Produksjon, og Sandvik Coromant.

I prosjektet, som er en videreføring av en studentoppgave for samme student høsten 2018, står fokus i å lede an utviklingen av et laserbasert målesystem i verktøyholdere for innvendig maskinering, som skal være i stand til å registrere og gi tilbakemelding til operatøren underveis om hvor man til enhver tid har skjæreeggen. Dette åpner for kontinuerlig kalibrering av verktøyet, som igjen kan gjøre det mulig å få et enda bedre resultat og i tillegg gjøre det mindre utfordrende å komme innenfor de toleransene som er satt.

## 1.1 Prosjektoppgave

Denne masteravhandlingen tar utgangspunkt i prosjektoppgaven "Laserbasert Måling av Utbøyning for Verktøyholder" som ble skrevet av samme student i høstsemesteret 2018. I prosjektoppgaven ble det gjennomført enkle forsøk der man benyttet seg av lasermodul, sensorceller og annet nødvendig utstyr for å kartlegge om dette er noe som kan implementeres i et verktøy for måling av utbøyning, nærmere bestemt en borstang. Studenten konkluderer med at det er fullt mulig å benytte seg av laserbaserte målemetoder for å måle utbøyning av verktøyholder, men at komponenter og oppsett benyttet i prosjektet ikke tilfredsstillende nøyaktighetskravene til et slikt system. Det er også listet flere punkter det bør, og må, jobbes videre med for implementering av et slikt system. Denne rapporten vil ta for seg ett eller flere av de punktene. I tillegg er det kommet til ønsker fra instituttet Institutt for Maskinteknikk og Produksjon ved NTNU om elementer oppgaven kan ta høyde for. Dette danner grunnlaget for oppgaveteksten som er utformet for denne masteravhandlingen, og det legger føringer for hvordan oppgaven vil bli gjennomført.

## 1.2 Oppgavetekst

1. Praktiske tester for å vurdere repeterbarhet og nøyaktighet i målesystemene. Det kan være aktuelt å gjennomføre nye tester med utstyret fra prosjektoppgaven.
2. Vurdering av ulike plasseringer av laser og sensorelement i en borstang.
3. Bruk av lasertracker for verifisering av laserbaserte målinger. I dette arbeidet skal det også vurderes hvordan manglende stivhet i en dreiebenk kan påvirke maskinert resultat.
4. Design og bygging av et system for laserbasert måling. Det skal anskaffes nødvendige komponenter og produseres nødvendig deler for innbygging av systemet. Robustheten og nøyaktigheten til systemet skal diskuteres spesielt.

### 1.3 Bakgrunn for oppgavevalg

Studenten har valgt å videreføre prosjektarbeidet fra foregående semester da det fortsatt gjenstår en rekke ubesvarte spørsmål, og man i skrivende stund er et godt stykke unna å ha lagt grunnlaget for å kunne utvikle et salgbart produkt. Målet for avhandlingen vil ikke i seg selv være å ha et ferdigstilt salgbart produkt, men heller å ha bedre informasjon om komponenter, robusthet og muligheter til å utvikle et verktøy som benytter seg av denne teknologien.

Dette er en type oppgave som passer studenten bra, som fra før av har erfaring fra sin tid som industrimekaniker. Studenten har derfor maskinert en betydelig mengde mekaniske komponenter, blant annet ved bruk av skjærebiter fra Sandvik Coromant. Denne erfaringen kombinert med en bachelor som maskiningeniør danner et fordelaktig grunnlag for å skrive en avhandling av denne karakteren.

### 1.4 Formål med oppgaven

Avhandlingen er skrevet for å bidra til at Sandvik Coromant har noe å ta utgangspunkt i for videre utvikling av laserbaserte målesystemer. Det skal også gi en pekepinn på hva som kan fungere, og hva som helt sikkert ikke vil fungere, dersom slike konklusjoner kan trekkes ut fra praktiske tester som blir gjennomført. Det er ønskelig å gå i bresjen for videreutvikling av maskineringsverktøy.

### 1.5 Sandvik Coromant

Sandvik Coromant ble startet opp i Sandviken i Sverige i 1942, og har siden oppstarten utviklet verktøy for maskinering. Selskapet har over 7900 ansatte fordelt i 150 land, noe som gjør de til en av de største aktørene på markedet. [SandvikCoromant \(2019a\)](#)

Forbes rangerte i 2012 Sandvik Coromant som et av verdens 100 mest innovative selskap. På den tiden kom mellom 20% og 45% av bedriftens inntekter fra produkter utviklet i løpet av de siste fem årene. Det gjenspeiler seg også i at Sandvik Coromant jevnlig bidrar med prosjekt- og masteroppgaver til studenter ved NTNU. [Sandvik \(2013\)](#)



Figur 1.1: Logo Sandvik Coromant, hentet fra [Eastec \(2019\)](#)

### Silent Tools™

Silent Tools™ er bare en av årsakene til at Sandvik Coromant er i verdenseliten når det kommer til design og produksjon av verktøy for bearbeiding av metaller, men kanskje den viktigste. I kategorien Silent Tools™ inngår flere ulike verktøyholdere egnet for både dreining, boring og fresing. De er designet for å minimalisere vibrasjoner og derfor øke både presisjon med tanke på toleranser og overflateruhet for den maskinerte flaten. Verktøyene har en innebygd masse som veier opp for systemets svingefrekvens. Demperen består av olje og en bestemt masse. [SandvikCoromant \(2019b\)](#)

Det vil være naturlig at et produkt utviklet på konseptet om overvåkning av skjæreeggens posisjon ved bruk av laser vil være mest naturlig å implementere i et system allerede bestående av Silent Tools™, hvor det allerede er strenge krav til presisjon.



Figur 1.2: Verktøyholder for innvendig maskinering med demping, hentet fra [Sandvik \(2013\)](#)

I teoridelen presenteres det noe målerelatert utstyr, lasermoduler og lignende. Deler av dette er utstyr Sandvik Coromant har stilt til disposisjon for gjennomføring av oppgaven slik at studenten og NTNU unngår større utgifter underveis.

## 1.6 Tilnærming til oppgaven

Oppgaven gjennomføres ved at det først foretas et litteraturstudie hvor relevant teori som tidligere bruk og relevante forsøk kartlegges. Det anskaffes informasjon om komponenter som det er ønskelig at benyttes i oppgaven, og en oversikt over deres bruksområder og begrensninger. Det gjennomføres så enkle praktiske forsøk i lokalene til NTNU ved Valgrinda, for å bekrefte funksjonalitet til et bygd system og danne seg et grunnlag for videre testing. Det gjennomføres forsøk med lasertracker hos Sandvik Coromant på Ranheim for å kunne kommentere enkelte punkter i oppgaveteksten, og for å bidra til en kartlegging av presisjon ved bruk av sponbearbeidende verktøy.

Parallelt gjennomføres det underveis enkle tester av lav kompleksitet for å bekrefte eller avkrefte enkelte komponenters kapasiteter og bruksområder for å kunne gi en fullverdig drøfting hvorvidt feilkilder kommer fra den enkelte komponent, systemet som en helhet eller andre årsaker. For innhenting av relevant litteratur benyttes Oria og Google Scholar. For figurer, bilder og tekniske spesifikasjoner som krever sitering benyttes det regulære nettsider og datablader. Rapporten blir skrevet på bokmål i henhold til instruks fra veileder.

## 1.7 Begrensninger

Som ved all type arbeid som gjennomføres ved universiteter og offentlige instanser vil det være eksterne utfordringer som må håndteres underveis og løses på en best mulig måte for de involverte. Ved gjennomføring av en oppgave som denne ved NTNU vil slike begrensninger være tilgang på kvalifisert personell for produksjon av prototyper og tilgjengelighet av personell med riktig kompetanse for å bistå kandidaten ved eventuelle spørsmål som krever snarlig avklaring.

Tidsrommet for oppgaven vil være en begrensning i den forstand at en praktisk oppgave avhenger blant annet av leveringstid på komponenter og produksjon av deler lokalt. Dokumentasjon av arbeidet krever også en god del tid. Ved endring av prototyper og uforutsette hendelser som ødelagte komponenter vil tid bli essensielt.

Oppgavens art krever ekstrem presisjon i flere ledd. Det skal produseres komponenter av høy kvalitet for bruk i praktiske forsøk, det skal gjennomføres eksterne målinger med annet utstyr for verifisering av et eventuelt system for testing av sensorer. Dette er flere mulige feilkilder som i et forsøk hvor det allerede stilles strenge krav til presisjon, kan bidra til unøyaktige resultater og dermed føre til at forsøk ikke kan vektlegges i den grad det er ønskelig.

## 1.8 Rapportens oppbygning

Rapporten er bygd opp etter, og følger i stor grad IMRaD-formatet, som er en forkortelse for Introduction, Method, Results and Discussion. Resultat og diskusjon er slått sammen, og der er et eget kapittel som tar for seg innbygging av systemet.

Kapittel 1 er selve introduksjonen av oppgaven. Her presenteres prosjektet og dets involverte parter. Det redegjøres kort for valget av oppgave og skribentens interesse rundt temaet. Videre fortelles det om hvordan det er valgt å løse problemstillingene og hvordan dette dokumenteres i sin helhet

I kapittel 2 presenteres det som er funnet av tidligere arbeid med bruk av relevant utstyr i relevante situasjoner. Det blir redegjort for innkjøpte komponenter som benyttes i oppgaven, og det fortelles kort om funksjonaliteten til disse. Programvare som benyttes vil bli presentert, det samme blir utstyr og materiell tilhørende universitetet som benyttes.

Oppgavens utspring kommer fra innvendig maskinering, som presenteres kort i kapittelet. Det er antatt at leseren på forhånd har kunnskap om temaet, men med bakgrunn i hvor sentralt maskineringsprosessen står i oppgaven er det valgt å ha med en presentasjon av det.

Kapittel 3 beskriver hvilke oppsett som benyttes for de ulike forsøkene som gjennomføres. Hensikten med kapitlet er at leseren skal få et innblikk i hvordan ting blir satt opp for de ulike forsøkene, og hvorfor det er valgt å gjøre det på den måten. Det forklarer også kort hvordan de ulike programmene blir brukt i forsøkene. Kapitlet er ikke ment å vise selve gjennomføringen av forsøkene.

Det er nødvendig å gjennomføre enkelte overslagsberegninger for å danne et grunnlag for hvor store krefter som kan forventes ved en maskineringsprosess, og hvilken innvirkning de har på verktøyet. I kapittel 4 blir det sett på nevnte problemstilling. Det blir også utledet en matrise for rotasjon at akser ved forsøk hos Sandvik Coromant, hvor det benyttes to koordinatsystem.

Kapittel 5 er en videreføring av kapittel 3 hvor de ulike forsøkene beskrives i sin helhet. Her kommer det frem hva som ble gjort, hvordan det ble gjort og ved hvilke tilfeller det ble avlest tallmateriale som danner grunnlag for kapittel 6.

I Kapittel 6 presenteres resultatene fra de ulike testene. Det føres også en diskusjon etterhvert som resultatene presenteres, og det drøftes ulike feilkilder og andre faktorer som påvirker resultatet. Det er lagt vekt på å ha en praktisk tilnærming til vurderingen av de ulike forsøkene, hvor det er viktig å kunne sette seg inn i de faktiske forhold når vurderinger foretas. Vurderinger som blir gjort baserer seg i noen grad på vurderinger gjort i tidligere delkapitler, og allerede bekrefte mistanker og fakta om utstyr, feilkilder og unøyaktigheter kommenteres ikke nødvendigvis gjentatte ganger til tross for en tilstedeværelse.

Et eget punkt i oppgaveteksten etterspør en vurdering om innbygging av et system i verktøy for laserbasert måling. I kapittel 7 blir det redegjort for kandidatens mening omkring dette. Det blir gjort en vurdering på faktorer som omhandler robustheten til systemet og målenøyaktigheten slik som oppgaven etterspør. Det er produsert skisser som illustrasjon for forslag til plassering av komponenter ved innbygging av systemet i en borstang.

Det blir i kapittel 8 konkludert med utfallet av arbeidet. Det vil være en oppsummering av hva som er funnet både når det gjelder sensorer og en bedømmelse omkring bruksområder på de dreiebenkens stivhet på maskinert resultat, viktige hensyn som må tas ved innbygging av system i et verktøy og hva som ikke lar seg kommentere med grunnlag i de forsøk som er gjennomført. Helt til slutt vil det være et utsagn hvorvidt skribenten mener å ha laserbasert kontroll på utbøyning av borstang vil være hensiktsmessig. I kapittel 9 er det satt opp punkter som må gjennomføres ved en videreføring av konseptet med utgangspunkt i det som er oppdaget i dette arbeidet som beskrives i rapporten.

I tillegg A er det vedlagt en liste for forklaring av forkortelser som blir brukt i rapporten. Det ligger også en ordforklaringsliste for enkelte ord og begreper som benyttes. I tillegg B ligger en visualisering av samtlige kjøring i Gianaen. Her finnes resultater både for X- og Z-akse, i tillegg til hele kjøring. Også i tillegg C ligger det ved resultater fra ulike tester. Dette tillegget er ment å supplementere rapporten for de grafene som er skalert ned eller står ved siden av en annen, og dermed kan aksene bli vanskelige å lese av.

I tillegg D ligger det figurer som et supplement til kapittel 7, og tillegg E er ment som et supplement til beregningene som presenteres i kapittel 4.2 dersom det er ønskelig å se på dette. For forsøk på verksted hos NTNU Valgrinda er det pålagt å ha gjennomført en risk assesment tilsvarende en sikker-jobb-analyse. Denne ligger vedlagt i tillegg F og er gjeldende for alle labforsøk.



# Kapittel 2

## Teori

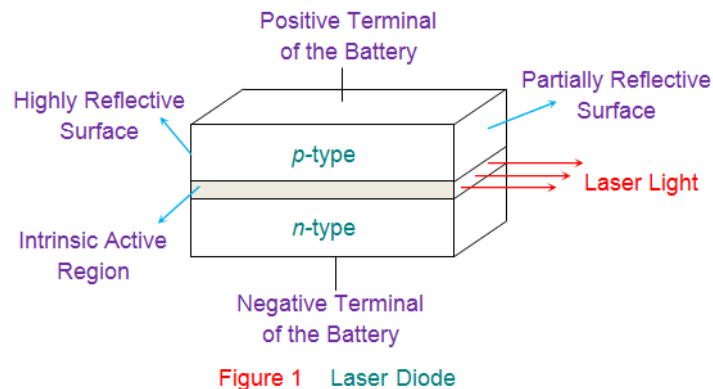
### 2.1 Laser

Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, ble den 16. mai 1960 praktisert for første gang av amerikaneren Theodore Harold Maiman ved Hughes Research Laboratories i California. Hughes var en av flere som deltok i det som karakteriseres som laserkappløpet. Maimans konstruksjon benyttet seg av en stav av rubin, omgitt av lys som sendte lypulser inn i staven, noe som satte startskuddet for det som regnes som en av de mest betydelige oppfinnelser innen fysikken siden andre verdenskrig. [Hecht \(2010a\)](#), [Hecht \(2010b\)](#)

For å benytte seg av laser, er det en forutsetning å ha en formening om hva en laser er, og hvordan den fungerer. Laserlys er en stimulert utstråling av fotoner, såkalt elektromagnetisk stråling. Det menneskelige øyet er i stand til å oppfatte stråling med en bølgelengde i området 350 til 780 nm, noe vi definerer som synlig lys. Det aller meste av laserutstyr tilgjengelig på markedet opererer i dette intervallet, men det finnes også unntak, slik det fremgår av blant annet [Eichhorn \(2014\)](#) på side 1-2, og [COŞKUN et al. \(2013\)](#). For en prosjektoppgave lik denne vil det være hensiktsmessig å benytte seg av lys i denne bølgelengden, derfor vil ikke lasere som faller utenfor verken være nevnt eller vurdert videre.

## Lasermodulens Oppbygning

En diodelaser er en halvleder som minner mye om en lysdiode. Selve laseren består av et aktivt lag eller materiale, som er innkapslet mellom en positivt og negativt ladd del av samme grunnmateriale, som da fungerer som katode og anode for laseren. Når lasermodulen tilføres elektrisitet via katoden (-, n) og anoden (+, p), vil energien som tilføres induktivt starte en reaksjon i det aktive laget. Se figur 2.1.



Figur 2.1: Skisse PN-laser, hentet fra [Electrical4U \(2019\)](#)

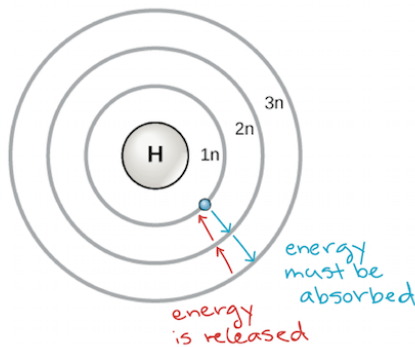
I begge endene av lasermodulen finnes det et speil, hvorav det ene reflekterer alt lys som treffer det, altså fotonene. Det andre speilet slipper gjennom cirka 30% av lyset som treffer, mens de resterende 70% blir sendt tilbake inn i lasermodulen. Både katoden, anoden, det aktive laget og speilene ligger igjen innkapslet i et inaktivt materiale som ikke har noe med selve laserens funksjon å gjøre, annet enn å beskytte komponentene. [Sun \(2012\)](#)

## Lasermodulens Funksjon

Den elektromagnetiske strålingen, eller utstrålingen av fotoner, kommer av såkalt laser pumping inne i lasermodulen. Når man produserer en lasermodul, er det ønskelig å oppnå en gitt bølgelengde på utstrålingen, som gir en gitt farge. Når lasermodulens eneste utløp for fotoner

ligger i enden, sikrer det at fotonene som slipper gjennom har noenlunde samme retning. De vil også ha samme fase og bølgelengde grunnet laserpumpingen. Laserpumping er at den elektriske energien som tilføres laseren via katoden og anoden, laddet atomer i det aktive laget slik at elektronene hopper ut en eller flere elektronbaner.

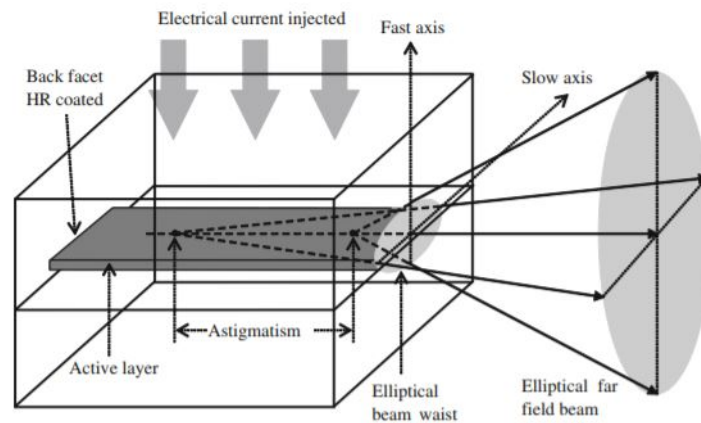
Elektroner som ligger nærmere atomets kjerne inneholder som kjent mindre energi, og derfor vil den tilførte energien atomet (eller det aktive materialet, som så fordeles til atomene) får tilført induktivt fra anoden og katoden, være nok til at elektroner forlater sin posisjon for å finne plass ved et høyere elektronnivå, se figur 2.2. Når fotonene som allerede er i bevegelse inne i laseren treffer elektroner, er elektronet ustabil og hopper ned et elektronnivå. I det elektronet hopper ned et nivå, sendes det ut et foton som er identisk med fotonet som fremprovoserte hoppet. Det nye fotonet har da samme energi, fase og bølgelengde som det som traff elektronet, og det er nå to fotoner i bevegelse. Det tas da svært lite eller ingen energi fra fotonet, men det er den utløsende årsaken til elektronhoppet. Ved hjelp av Planck's konstant og frekvensen er det også mulig å finne eksakt energi i strålingen. Den kan også regnes om til en funksjon av lysets hastighet og bølgelengden til utstrålingen. Dette er også årsaken til at 70% av fotonene reflekteres tilbake inn i lasermodulen. [Eichhorn \(2014\)](#)



Figur 2.2: Elektronnivåer, hentet fra [KhanAcademy \(2015\)](#)

## Laserstrålens form

Slik det kommer frem av figur 2.1 vil lyset som slipper ut av laseren ha et tverrsnitt som er av mer rektangulær art. Intensiteten i senter vil være større enn ute ved sidene, og dermed går lyset over i en mer elliptisk form. Haiyin Sun illustrerer dette godt i figur 2.3, hvor han innfører begrepene treg og rask akse for utviklingen av laserlyset. I treg akse spres lyset tregere enn for rask akse, men i treg akse er lysprofilen bredere enn for rask akse i initialtilstand ut fra lasermodulen. Dette fører til at laserlyset på en gitt avstand fra linsen vil være sirkulært. I avstander som fraviker fra denne avstanden vil alltid lyset som er projisert være elliptisk.

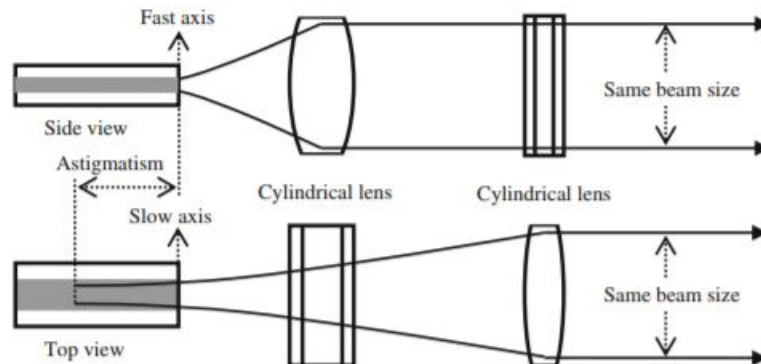


Figur 2.3: Skisse PN-laser, hentet fra Sun (2012)

Ved prosjektet som ble gjennomført før jul ble det benyttet en lasermodul med elliptisk utstråling. Dette medførte problemer ved kalibrering, da det ikke var noen indikator på innkapslingen til selve lasermodulen som anga hvordan lasermodulen var posisjonert med tanke på rotasjon. Dette gjorde det tilnærmet umulig å kunne plassere lasermodulen likt som ved kalibrering, og dermed ble videre målinger vanskelige å benytte seg av. Dette kan løses ved å velge lasermoduler med et sirkulært strålebilde.

Sirkulære strålebilder kan oppnås ved å benytte seg av sylindriske linser. De er utformet på en slik måte at lyset som utvikler seg i den ene av de to retningene ikke blir påvirket av linsen, mens lyset i den andre retningen vil bli rettet slik at videre spredning av strålen uteblir, og man får en

fast diameter over laserlyset i den enkelte akse. Dersom man ønsker seg en laserstråle på f.eks  $\text{\O}3$  mm, vil man først benytte seg av en sylindrisk linse for å begrense den raske aksen til en diameter på 3 mm. Deretter plasseres en ny linse i en bestemt avstand fra den forrige, slik at også den trege aksen får en kontinuerlig diameter på 3 mm, slik det fremgår av figur 2.4.



Figur 2.4: Elliptisk til sirkulær stråle, hentet fra Sun (2015)

Slike sylindriske linser er innebygd i lasermoduler som har sirkulært lysbilde. Det er for oppgaven valgt å benytte seg av nok en laser fra Thorlabs. Denne gang en CPS635R med sirkulært lysbilde. I prosjektoppgaven ble det til sammenlikning benyttet en lasermodul med elliptisk lysbilde, med betegnelse 57-098. Konsekvensen av å velge en sirkulær laser vil være at selve lasermodulen vil ha noe større diameter, i tillegg til å være en del lengre. Egenskapene til de respektive laserne finnes i tabell 2.1.

Tabell 2.1: Spesifikasjoner for laserpekere fra Thorlabs (2019a) og EdmundOptics (2019a):

Egenskap	CPS635R	57-098
Lengde	58 mm	25 mm
Diameter lysstråle	$\text{\O}2.9$ mm	3x1 mm
Diameter housing	11 mm	7 mm
Stråleeffekt	1.2 mW	0.9 mW
Effekt inn	4.9 - 5.2 V	3.5 - 5 V
Bølgelengde	635	635 nm
Temperaturintervall	-10 - 50 °C	-10 - 45 °C
Pekernøyaktighet	<0.6 mrad	<25 mrad
Klassifikasjon - CDRH	3R	2

## 2.2 Posisjonssensor

Blant komponentene Sandvik Coromant hadde kjøpt inn var en PDQ80A Quadrant Sensor fra Thorlabs. Denne fungerer på en så måte at den i tillegg til å måle den totale energien som plukkes opp av sensoren fra laseren, ut fra areal og ståleintensitet, så måler den også hvor på sensoren intensiteten er størst. Her leverer Thorlabs to fysisk like sensorer, PDQ80A og PDP90A. De gjør mer eller mindre den samme jobben, men de er bygd opp etter to vidt forskjellige prinsipper.



Figur 2.5: Lyssensor, [Thorlabs \(2019b\)](#)



Figur 2.6: Lyssensor, [Thorlabs \(2019c\)](#)

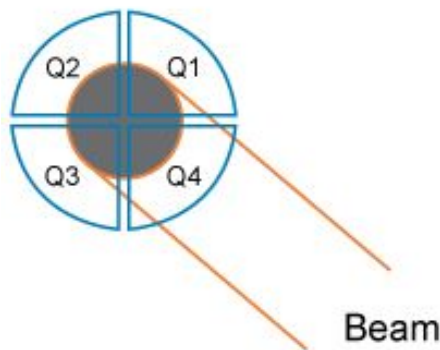
### PDQ80A

PDQ80A er bygd opp av fire sensorceller, slik at selve sensorflaten kan minne om et kakediagram bestående av fire like store deler. Denne sensoren sender et signal i form av varierende spenning, som indikerer den totale energien som blir plukket opp. I tillegg sendes to signaler, også her i form av varierende spenning, som angir posisjonen til sentrum av strålekonsentrasjonen ut fra hvor mye som treffer hver enkelt del, eller hvert kakestykke. Se figur 2.7.

Tabell 2.2: Spesifikasjoner Posisjonssensor fra [Thorlabs \(2019c\)](#):

Egenskap	Verdi	Enhet
Bølgelengde	400 - 1050	nm
Anbefalt lysdiameter	Ø1 - 3.9	mm
Størrelse Sensor	Ø7.8	mm
Størrelse	50.8 x 30.5 x 16.5	mm <sup>3</sup>
Vekt	114	g
Temperaturintervall	10 - 40	°C
Effekt inn	±5 ±5%, 35	V DC, mA
Effekt ut	±2	V DC
Maksimal strøm	200	µA

Som man ser fra tabellen, så stemmer både diameter på strålen og effekt inn på både sensor og laserpeker godt overens. Den fysiske størrelsen på sensoren er relativt stor sett opp mot en verktøyholder for innvendig maskinering som har en diameter på Ø40 mm, som Sandvik Coromant har oppgitt som ønskelig diameter. Dermed vil ikke en sensor av denne typen kunne implementeres i sin helhet, men den er fullt mulig å bruke for å gjennomføre praktiske tester slik Sandvik Coromant ønsker.



$$X = \frac{(Q2 + Q3) - (Q1 + Q4)}{(Q1 + Q2 + Q3 + Q4)} = \frac{Xdiff}{SUM} \quad (2.1)$$

$$Y = \frac{(Q1 + Q2) - (Q3 + Q4)}{(Q1 + Q2 + Q3 + Q4)} = \frac{Ydiff}{SUM} \quad (2.2)$$

Figur 2.7: PDQ80A, [Thorlabs \(2019c\)](#)

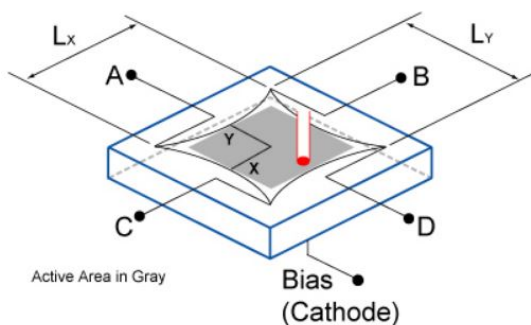
For å definere X og Y koordinater, sendes signalet fra hver av de fire kvadrantene inn til DAQ-enheten. Derfra benyttes likning 2.1 og 2.2 for omgjøring av målt spenning til koordinater. [Thorlabs \(2019c\)](#)

## PDP90A

PDP90A er i motsetning til PDQ80As fire sensorceller, bygd opp av bare én. Sensoren sender også tre signal i form av varierende spenning, på lik linje med PDQ80A. Også her er et av signalene et resultat av samlet effekt som treffer sensoren. Thorlabs har valgt å plassere anodene i hjørnene på sensoren, slik at man beholder en lineær endring i avgitt spenning sett opp mot om man hadde plassert anodene midt på langsidene, se figur 2.8. Sammenlignet med PDQ80A-sensoren har denne en større rekkevidde hva gjelder bølgelengde, og dermed vil den være kompatibel med et større utvalg lasere. Den fungerer også med lasere med både større og mindre lysstråle.

Tabell 2.3: Spesifikasjoner Posisjonssensor fra [Thorlabs \(2019b\)](#):

Egenskap	Verdi	Enhet
Bølgelengde	320 - 1100	nm
Anbefalt lysdiameter	Ø0.2 - 7	mm
Størrelse Sensor	Ø7.8	mm
Størrelse	50.8 x 30.5 x 16.5	mm <sup>3</sup>
Vekt	114	g
Temperaturintervall	10 - 40	°C
Effekt inn	±5 ±5%, 35	V DC, mA
Effekt ut	0-4 og ±4	V DC
Maksimal strøm	200	µA



$$\Delta X = (A + C) - (B + D) \quad (2.3)$$

$$\Delta Y = (A + B) - (C + D) \quad (2.4)$$

$$SUM = (A + B + C + D) \quad (2.5)$$

Figur 2.8: PDP90A, [Thorlabs \(2019b\)](#)



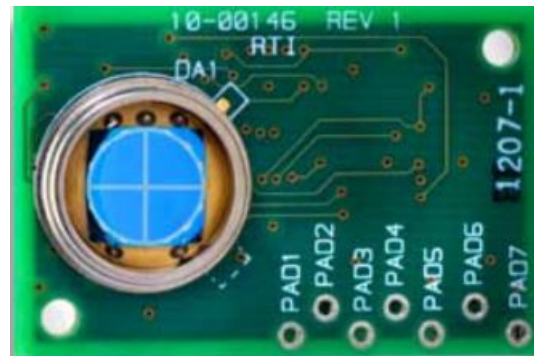
For å finne riktig posisjon i form av X og Y-koordinater for senter av laserstrålen benyttes verdiene for  $\Delta X$  og  $\Delta Y$ , og SUM som ble avlest av DAQ-enheten i likning 2.6 og 2.7, hvor  $L_y$  og  $L_x$  er konstanter ut fra hvilken sensor man benytter. For PDP90A er disse verdiene 10 mm. Det er anbefalt fra Sandvik Coromant å holde seg til PDQ80A-sensoren.

$$X = \frac{L_x * \Delta X}{2 * SUM} \quad (2.6)$$

$$Y = \frac{L_y * \Delta Y}{2 * SUM} \quad (2.7)$$

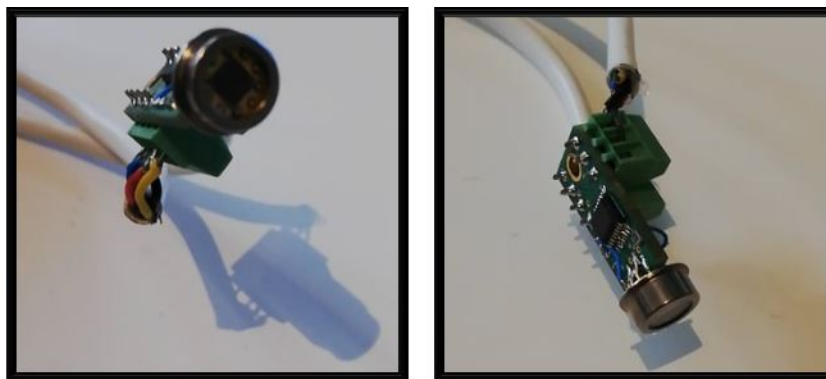
## QD50-0-SD

Betegnelsen QD50-0-SD står for quadrant detector, 50 mm<sup>2</sup>, sum and difference module. Den fungerer på samme måte som PDQ80A-sensoren, men den fysiske størrelsen er mindre. Denne modulen kan benyttes ved innbygging i borstang, det er også mulig å posisjonere selve kvadrantsensoren annerledes i forhold til kretskortet enn hva det er gjort fra



Figur 2.9: QD50-0-SD OSIOptoelectronics (2019)

leverandør. Det er også overlevert en lignende sensor og kretskort fra Sandvik Coromant som det er interessant å benytte for enkle forsøk og sammenligning med PDQ80A-sensoren, se figur 2.10. Fabrikatet på denne er ukjent, men funksjonen er den samme.



Figur 2.10: Sensormodul fra Sandvik Coromant

## 2.3 Beamsplitter

En beamsplitter er utformet som en kube, og er ved første øyekast tilsynelatende av glass. Materialet den er produsert i er N-BK7. En beamsplitter fungerer ved at det sendes en laserstråle inn i den ene flaten, og deler av strålen brytes slik at laserstrålen fortsetter ut av kubens med en vinkelendring på  $90^\circ$  i forhold til inngangsvinkelen. Cirka 50% av lyset brytes, mens resterende fortsetter rett gjennom. Dette er hensiktsmessig i de tilfeller det er ønskelig å benytte en lyskilde og to sensorer. I kommersiell bruk er det normal praksis å føre en av de to utgående laserstrålene tilbake til en posisjonssensor i nærheten av lyskilden. Dette for å ha kontroll på hvor lyset som går rett gjennom kubens treffer. Sandvik Coromant har gått til innkjøp av en beamsplitter som er stilt til disposisjon i oppgaven. Ved bruk av beamsplitter både praktisk og digitalt er det derfor henvist til denne typen. Spesifikasjoner for den aktuelle beamsplitteren finnes i tabell 2.4

Tabell 2.4: Spesifikasjoner for Strålesplitter fra [EdmundOptics \(2019b\)](#):

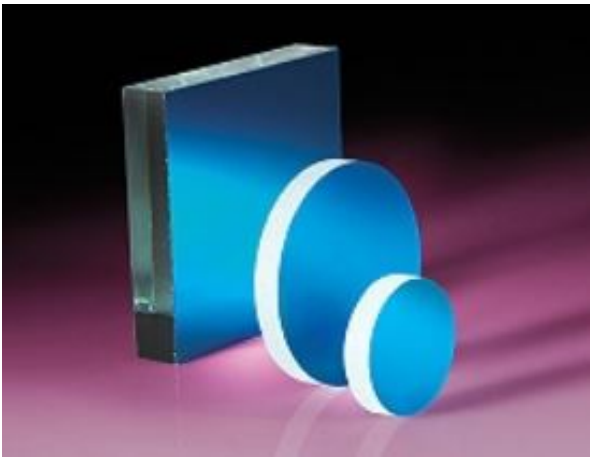
Egenskap	Verdi	Enhet
Størrelse	10 x 10 x 10	mm <sup>3</sup>
Dimensjonelle toleranser	$\pm 0.1$	mm
Bølgelengde	430 - 670	nm
Gjennomsnittlig gjennomlysning	$45 \pm 5$	%
Material	N-BK7	



Figur 2.11: 10mm Ikke-Polariserende Strålesplitter [EdmundOptics \(2019b\)](#)

## 2.4 Speil

Speil benyttes i laserapplikasjoner der det er ønskelig å enten returnere lyset i samme setning som det kom fra, eller for å bøye av lyset og sende det i en annen retning. Speilene er bygd opp av materialer, og med en overflateruhet, som gjør tapet fra laserstrålen minimalt. Det er ikke uvanlig at over 95% av lyset blir reflektert videre. Det er funnet to aktuelle speil for oppgaven, avhengig av hvilket prinsipp for innbygging som vurderes. Begge speilene forhandles av Edmund Optics, og har en utvendig diameter på henholdsvis 25 mm og 10 mm.



Figur 2.12: Speil Ø10, [EdmundOptics \(2019c\)](#)    Figur 2.13: Speil Ø25, [EdmundOptics \(2019d\)](#)

Begge speilene er kompatible med lasermodulen fra tabell 2.1, som er tiltenkt å bli benyttet ved forsøk. I tabell 2.5 finnes de viktigste egenskapene for speilene. Det står oppgitt at speilene med en diameter på Ø10 mm fungerer best ved en vinkel på 45°. Grunnet størrelsen er det i en borstang med en utvendig diameter på Ø40 mm nok plass til å plassere to slike speil i enden for best mulig utnyttelse av speilene. Anbefalt vinkel for speilet med en diameter på Ø25 mm er oppgitt til 0°.

Tabell 2.5: Spesifikasjoner speil, [EdmundOptics \(2019c\)](#), [EdmundOptics \(2019d\)](#).

	Speil Ø10	Speil Ø25
Tykkelse	3 mm	6 mm
Toleranse tykkelse	± 0.25 mm	± 0.2 mm
Toleranse diameter	± 0.25 mm	+0/-0.2 mm
Design wavelenght	633 nm	635/670 nm
Refleksjon ved design wavelenght	>97%	>99.8%
Optimal inngangsvinkel	45°	0° og 45°

## 2.5 Data Acquisition

For innsamling av data benyttes en Data Acquisition enhet. Forkortelsen for Data Acquisition er DAQ, som enheten vil bli omtalt som videre i rapporten. Denne typen enheter samler inn og behandler data fra ulike sensortyper. De kan også benyttes for å sende ut signal, men i en oppgave som beskrevet i dette prosjektet vil det være naturlig å kun bruke en eventuell DAQ-enhet for innsamling av data.

Fra Sandvik Coromant ble det overlevert en USB-6009 DAQ-enhet for bruk i oppgaven. Denne typen har analoge og digitale kanaler både ut og inn. For å lese av PDQ80A-sensoren må det benyttes digitale signaler for å få et kontinuerlig måleresultat, da posisjon gis ved endring i spenning. Fra DAQ-enheten sendes innsamlede data videre til en PC. Denne enheten har 2 analoge utganger, 8 analoge innganger og 13 digitale inn- og utganger. Ved tilkobling til PC starter installasjonsfilen automatisk, som ligger i enheten. USB-6009-enheten har en oppgitt maksimal samplingsfrekvens på 48kS/s i følge [NationalInstruments \(2019\)](#). Typiske bruksområder for DAQ-enheter er ulike labforsøk og målinger hvor det samles inn data.

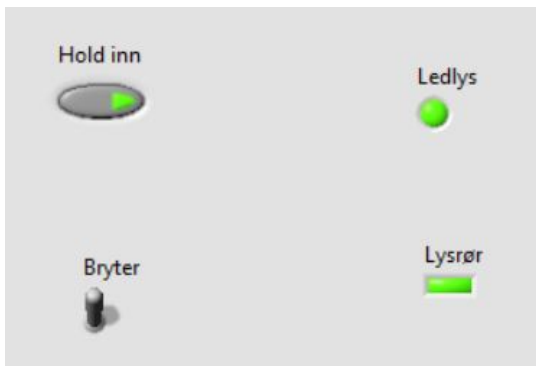


Figur 2.14: USB-6009, hentet fra [ResearchGate \(2019\)](#)

## 2.6 LabVIEW

LabVIEW - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, er utviklet av National Instruments for å være kompatibel med hvilket som helst produkt av National Instruments som er utviklet for ingeniører og forskere til bruk i forskning og labforsøk. LabVIEW er bygd opp av logiske funksjoner med et brukervennlig display, der brukeren fremfor å programmere, kan dra inn de ulike fysiske komponentene. Det kan for eksempel være en DAQ-enhet. Man drar også inn logiske gater og funksjoner, og man trekker ledninger mellom disse. Disse grafiske blokkene sørger for at LabVIEW er produkt med høy brukervennlighet, tilpasset oppgaver som nettopp denne masteravhandlingen.

Som nevnt er DAQ-enheten en slik grafisk blokk som dras inn. Laser, sensor, dioder, brytere og lignende vil også være slik blokker. Programmet er tredelt, hvor den ene delen kalles "block diagram", den andre delen "front panel" og den tredje delen er "tools palette". I blokkdiagrammet drar man ledninger og forbindelser mellom komponentene. Man kan så trykke for å simulere programmet, og da får man sett hvordan programmet fungerer. Se figur 2.15 - 2.16. På grunn av programmets enkle oppbygning og brukervennlighet, kombinert med at det er lett å lære seg og bruke programmet, er det valgt å benytte dette for laboratorieforsøk i prosjektarbeidet.



Figur 2.15: Fronpanel, brytere på



Figur 2.16: Block diagram

## 2.7 Python

For visualisering av måledata og fremstilling av grafer benyttes Python. Python er et programmeringsspråk som i forhold til andre språk er lettlest, noe som gjør det til et godt valg av program for de uerfarne programmererne. Programmet er linje- og innrykkbasert. Det vil si at ved bruk av programmet vil det ikke være diverse tegn som begrenser deler av koden hvert til sitt, men heller innrykk og linjehopp. Det er i utgangspunktet ment å benyttes for enklere verktøy og applikasjoner, men det er også mulig å lage dyptgående spill og diverse web-applikasjoner. [SNL \(2019\)](#) Python opererer etter open source prinsippet, noe som vil si at det er både gratis og tilgjengelig for den som vil benytte seg av det. [Python \(2019\)](#)

## 2.8 TOS SN 50 C

I kapittel 1.2 punkt 3 er det uttrykt ønske om å måle stivhet i dreiebenken og hvordan dette kan påvirke maskinert resultat. Ved NTNUs verksted på Valgrinda finnes det en rekke dreiebenker, en av disse, en TOS SN 50 C, blir benyttet for praktiske tester på lab. Det er flere elementer ved dreiebenken som kan føre til unøyaktigheter på det ferdige produktet, som det er interessant å gjennomføre kontrollforsøk på. Det kan være:

1. Bakdokke

Dersom det dreies emner med utstikk over anbefalt lengde (en tommelfingerregel vil være tre ganger emnets diameter i utstikk), så bør det borres senterhull og benyttes bakdokke. Bakdokken står på sleidene på dreiebenken, og i denne opplagringen vil det være mulighet for en skjevhet som påvirker det endelige resultatet.

2. Chuck

Chucken er skrudd fast i en spindel, slik at det kan byttes chuck fra tre til fire bakker, og tilbake. Spindelen er opplagret, og i dette lageret vil det kunne være noe avvik. Under normale forhold er det rimelig å anta at dette avviket ikke vil være merkbart, men med hjelp av moderne teknologi vil det være mulighet for å verifisere dette.

### 3. Bakker

I chucken vil det være en mulighet for å snu bakkene avhengig av diameter og utforming på emnet som skal maskineres. Bakkene er festet til chucken ved hjelp av skruing, hvor det normalt sett er god klaring mellom bakker og chuck. Dette kan være en feilkilde med tanke på innspenning av selve emnet, og det er grunnet dette at det ved maskinering av emner anbefales å ha så få innspenninger som det lar seg gjøre.

### 4. Verktøysleiden

Verktøyholderen går på den samme sleiden som bakdokken. Her er det toleranser og mulighet for avvik ved maskinering. Fra sleiden til skjæreeggen er det flere punkter som kan gi unøyaktighet, som innfesting av skjærebits til bitsholder, bitsholder til verktøyholder og verktøyholder til selve sleiden. Disse er valgt å holde samlet i dette punktet.

## 2.9 Innvendig maskinering

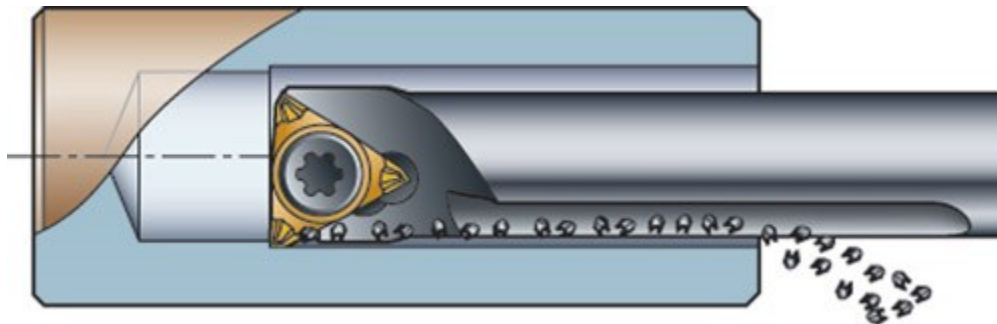
Ved innvendig maskinering forstørres man et hull som enten er forborret, støpt eller smidd opp til en større diameter, en flate med lav overflateruhet eller en gitt toleranse. I mange tilfeller vil den maskindelen som produseres være "god nok" ved bruk av et enkelt bor, men i de tilfeller der det kreves dreining eller annen maskinering er det også store krav til nøyaktighet.

Det finnes en rekke metoder for innvendig bearbeiding, som for eksempel brotsjing, honing og dreining. Ved honing er ikke formålet å få en større diameter, men en bedre overflate. I tillegg er honeverktøy ofte bestående av flere skjæreegger som er i inngrep samme tidspunkt, se fig 2.17, og dermed vil det ikke være nevneverdig utbøyning i honeverktøyet for at det skulle vært aktuelt i dette prosjektet. Brotsjing benyttes ved produksjon av for eksempel kilespor, og det er ofte helt andre toleransekrav ved den typen bearbeiding sammenlignet med innvendig dreining. Herfra vil all omtale om innvendig maskinering gjelde innvendig dreining.



Figur 2.17: KS sylindrhoner, hentet fra [Sletteboe.no](http://Sletteboe.no) (2019)

I dette prosjektet vil fokuset ligge på innvendig dreining, som også er det langsiktige målet hos Sandvik Coromant når det gjelder implementering av utstyret. Innvendig dreining kan gjennomføres i både fleraksede freser og maskinsentre. Operasjonen illustreres i fig 2.18, og omtales videre i rapporten som innvendig dreining, som er en mer normal måte å tiltale operasjonen på for de som jobber i industrien. Ved innvendig dreining i maskinsentre benyttes en borstang, og det er denne som er utsatt for utbøyning. Det er også denne utbøyningen det er ønskelig å om ikke få kontroll på, kunne måle kontinuerlig under dreieoperasjoner for så å kalibrere deretter.



Figur 2.18: Innvendig maskinering, hentet fra [ProductionMachining](http://ProductionMachining.com) (2019)

Innvendig dreining minner på mange måter om utvendig dreining. Skjærgeometrien er tilnærmet den samme. Den vesentlige forskjellen, og roten til problemstillingen for oppgaven, er det lange utstikket som tidvis er nødvendig ved innvendig dreining. Dette kan man også se ut fra fig 2.18.

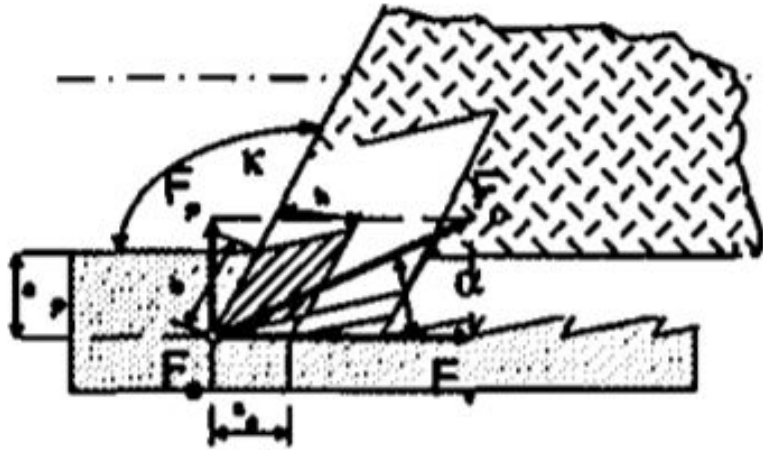


Forholdet mellom lengde og diameter på verktøyet kan passere 14, noe som øker unøyaktigheten i resultatet. [Sørby and Sundseth \(2015\)](#) Resultatet påvirkes av både utbøyning og vibrasjoner. Dette feilplasserer skjæreeggen i forhold til innmålt nullpunkt ved oppspenning av verktøy. For maskinsentre med flere titalls verktøy i magasin så vil også innmålingen som ble gjort da verktøyet ble satt inn, eller skjærebitsen byttet, avvike fra reell angitt posisjon fra maskinsenteret da borstangen er bøyd. Dette påvirker ikke i stor grad deler med lave krav til toleranse, men for maskindeler med fine toleranser kan det være utslagsgivende for hvorvidt delen må kasseres. Det som omtales som skjærebits i oppgaven er det gule skjæret på figur 2.18. Det er skjærebitsen som er i inngrep mot materialet som maskineres, og dette er utskiftbart. [Chun and Ko \(2011\)](#)

I de tilfeller hvor man dreier middels til grove kutt, og det er store krefter som virker på skjæreeggen, vil borstangen bøyes ut. Disse kuttene fører til større ruhet på overflaten. Kombinasjonen ruhet og utbøyning av borstang resulterer i høyfrekvente slag mot skjæreeggen. Dette senker levetiden på skjærebitsen betraktelig. For å plassere sensorer, velge riktig dimensjon på sensor, lasermodul og eventuelle andre komponenter må man ha et grunnlag for å beregne utbøyningen av borstangen. Det vil være godt nok for dimensjonering av utstyr å anta at borstangen oppfører seg som en utkragerbjelke fra verktøyholderen på toppsleiden. Sandvik Coromants dempede verktøy er hule, hvor vibrasjonsdemperen er installert innvendig i enden. Derfor kan denne sees på som et enkelt rør.

## Krefter ved dreining

Ved dreining så oppstår det primært tre krefter i verktøyet og skjæreeggen, som alle kan måles. Disse kreftene kan tiltales som  $F_v$ , som er en kraft induisert av matehastigheten og dermed virker aksielt på verktøyholderen. Den passive kraften,  $F_p$ , bidrar til å skyve skjæreeggen mot senter av arbeidsstykket. Den siste kraften betegnes som  $F_c$ , som er selve skjærkraften. Se figur 2.19. Den passive og skjærkraften er kreftene som må vurderes for å beregne utbøyning av borstang. For å bestemme disse kreftene benyttes eksperimentelle data fra [Kuster and Gyax \(1990\)](#), samme artikkel som figurene som beskriver kreftene er hentet fra.



Figur 2.19: Kraftretninger, hentet fra [Kuster and Gygax \(1990\)](#)

Dersom det er ønskelig å estimere krefter ut fra skjæredata ved dreining, kan det gjøres ved hjelp av følgende formel,

$$F_c = K_s * a_p * b \quad (2.8)$$

hvor  $K_s$  er en materialkonstant hentet fra tabell 2.20,  $a_p$  er kuttdybden og  $b$  er lik matehastighe-  
ten.

**Table 3.1.1** Representative  $K_s$  values for selected workpiece materials [2]

Material	$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	Material	$K_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
Gray cast iron	1500	Ni-based Inconel X	3400
1020 carbon steel	2100	Ni-based Udimet 500	3500
1035 carbon steel	2300	Co-based L605	3500
1045 carbon steel	2600	Ti (6Al, 4 V)	2000
302 stainless steel	2700	Al 7075-T6	850
4140/5140 alloy steel	2800	Al 6061-T6	750

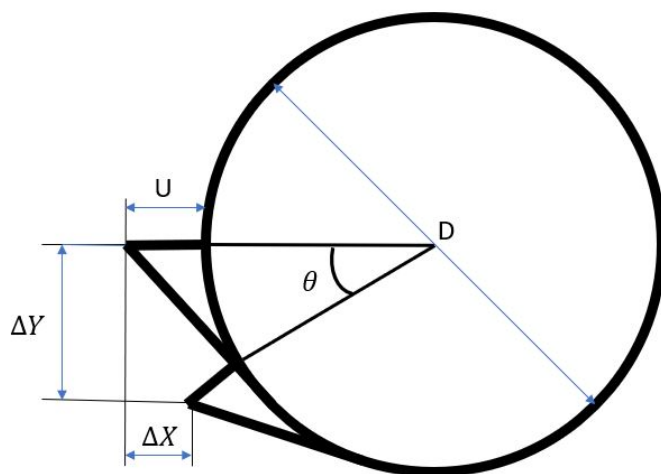
Figur 2.20: Verdier for  $K_s$ , hentet fra kapittel 3 i Machining Dynamics av [Schmitz and Smith \(2008\)](#)

For en utkragerbjelke formet som et rør gjelder følgende formler for henholdsvis utbøyning og vinkelendring,

$$w = \frac{P * L^3}{3 * E * I} \quad (2.9)$$

$$\theta = \frac{PL^2}{2EI} \quad (2.10)$$

der P er den gjeldende kraften, w er nedbøyningen, L er lengden til røret, E er elastisitetsmodulen og I e treghetsmomentet, se side 29 i Stålkonstruksjoner av [Larsen \(2007\)](#). I en gitt borstang fra Sandvik Coromant vil det ikke være rom for å endre på verken elastisitetsmodulen, annet arealmoment eller lengden på verktøyet. Kraften vil også av naturlige årsaker være rigid. Dermed er både utbøyningen w og vinkelendringen  $\theta$  uunngåelig. Ved en vinkelendring lik  $\theta$  over en aksling med en diameter lik D vil følgende likninger være gjeldende for endring av posisjonen til skjærebitsen på en gitt borstang;



$$\Delta X = (U + D) * (1 - \cos(\theta)) \quad (2.11)$$

$$\Delta Y = (U + D) * \sin(\theta) \quad (2.12)$$

Figur 2.21: Forflytning av skjærebits grunnet torsjon

Ved normal innstilling av både borstang for innvendig dreining og verktøy for utvendig dreining, stilles skjærebitsen i samme høyde som senter av emnet som skal maskineres. Figur 2.21 illustrerer vinkelendringen og endring i posisjon for skjærebitsen. Lengden U vil være utstikket fra borstangens ytterpunkt og ut til skjærebitsen.

## Tre-kutts-metoden

Det finnes flere metoder for å kontrollere avviket når man dreier innvendig og har en gitt utbøyning på borstangen som følge av de nevnte kreftene. En av disse metodene kalles for tre-kutts-metoden. Den går ut på, som navnet tilsier, at man gjennomfører dreiningen i tre kutt, på følgende måte;

1. Måling av diameter på hull, så nullstille måleur
2. Divider materialet som skal fjernes på tre, for så å gjennomføre det første kuttet.
3. Ny måling av diameter på hull og nullstilling av måleur
4. Divider resterende materiale på to, for så å gjennomføre det andre kuttet.
5. Gjennomfør det tredje kuttet.

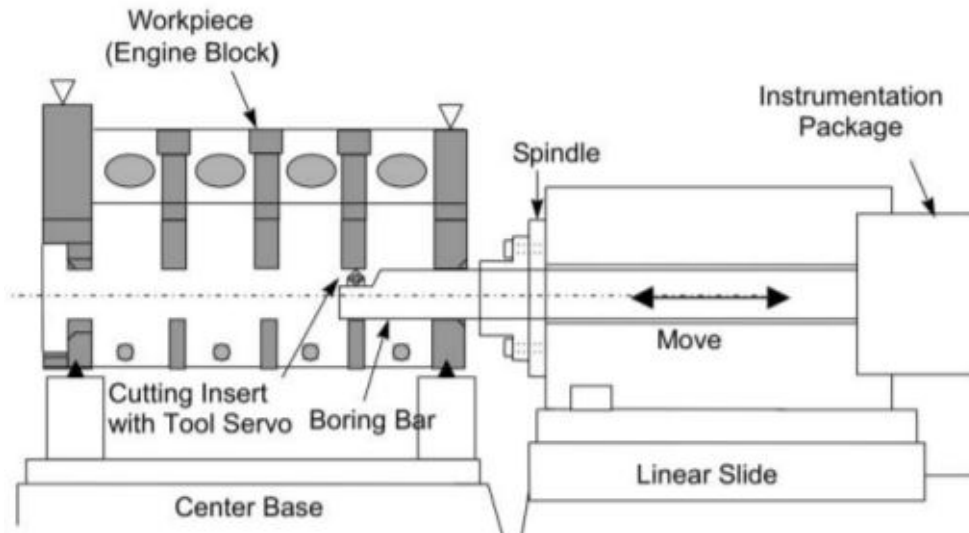
Dette er en metode som også Sandvik Coromant anbefaler sine kunder, men man oppnår ikke et fullstendig perfekt resultat. [Stover \(2003\)](#)

## 2.10 Tidligere bruk av laser

### 2.10.1 Smart Boring Tool

Lasertbasert måling av skjæreeggens posisjon virker å være lite utprøvd, og det finnes ikke stort av publiserte dokumenter som viser til forsøk ved overvåkning ved hjelp av laser. I 2002 utviklet en gruppe på fire forskere ved The University of Michigan et verktøy de har valgt å kalle "Smart Boring Tool". Det mekatroniske verktøyet, som da består av både elektronikk og mekanikk, er designet på en slik måte at verktøyeggens posisjon kontinuerlig kalibreres underveis i maskineringsprosessen. Det er i verktøyet installert en servomotor som hele tiden bidrar aktivt til justering. Akkurat dette verktøyet er ment for maskinering av lagerflatene til veivlagrene i en motorblokk. Et slikt verktøy vil ha et langt utstikk og dermed opptre som en lang utkragerbjelke, og dermed vil oppførselen minne noe om innvendig dreining, se figur 2.22. [Min et al. \(2002\)](#)

Ved hjelp av data fra verktøyet er også tilhørende software i stand til å avgjøre om skjærebitsen er brukket, eller om skjærene er så slitt at de bør byttes. Dette bidrar ikke bare til et bedre maskineringsresultat med tanke på toleranser og overflateruhet, men også til en bedre økonomi ved at man unngår unødvendige bytter av verktøy som i utgangspunktet ennå har igjen en god del av levetiden. Man unngår også unødvendige stopp for å fysisk inspisere verktøyets tilstand.



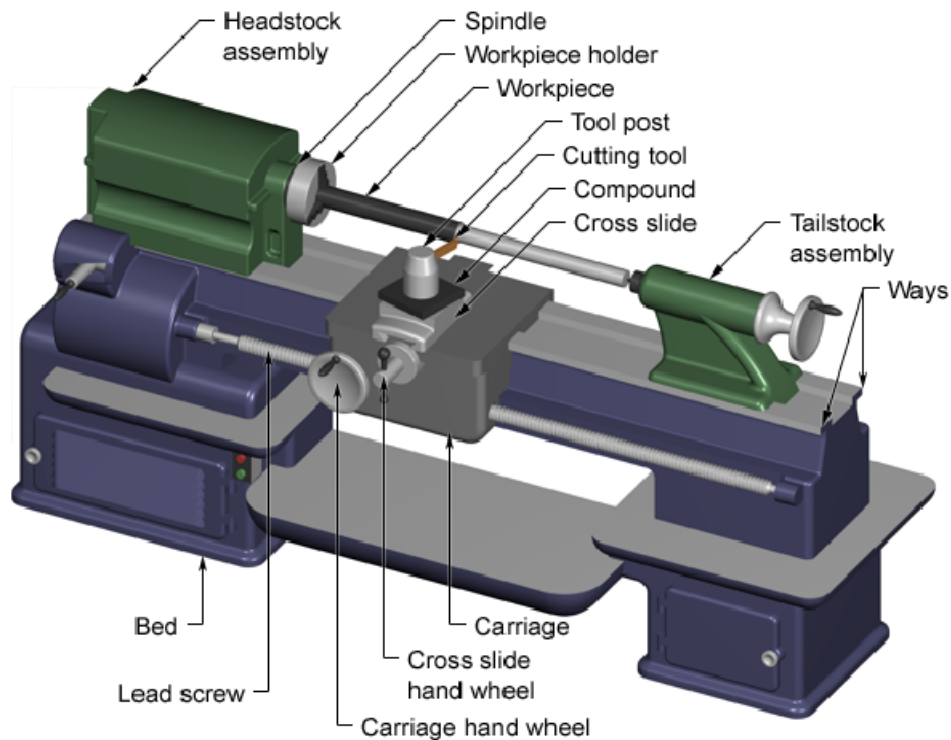
Figur 2.22: Boring av lagerflater i motorblokk, hentet fra [Min et al. \(2002\)](#).

Verktøyet er primært utviklet for å unngå behovet for opplagring flere steder langs verktøyets bane. Flere opplagringer gjør det vanskelig å automatisere verktøybytte etter maskineringsprosessen, da lagerflater må inn for verktøyet, og man har en større andel manuelt arbeid relatert til hver operasjon. I likhet med flere av Silent Tools<sup>TM</sup>-utgavene til Sandvik Coromant operer dette verktøyet med et høyt forholdstall mellom lengde og diameter. Dette gjør derfor Smart Boring Tool, til tross for helt forskjellige maskineringsformål, til kanskje markedets mest relevante verktøy for implementering av laserbasert måleteknologi i et verktøy for innvendig dreining.

Ved hjelp av servoen som er installert ved skjæreeggen og verktøyets hurtige respons på utbøyninger og vibrasjoner holdes toleransene på produserte deler i særklasse. Det er denne teknologien som kan være relevant å på sikt overføre til et verktøy hvor skjæreeggen er overvåket av laser, og det er behov for kontinuerlig, nøyaktig og rask justering.

## 2.11 Dreiebenkens oppbygning

I oppgavetekstens punkt 3 i kapittel 1.2 stilles det ved krav om bruk av lasertracker for verifisering av lasermålinger, og at det i tillegg skal vurderes hvordan manglende stivhet i en dreiebenk kan påvirke maskinert resultat. For å besvare dette er det nødvendig å ta for seg helt enkelt hvordan en dreiebenk er skrudd sammen, og hvilke deler som da kan gi tilstrekkelig slark slik at resultatet av maskineringsprosessen påvirkes. Dette er kort beskrevet allerede i kapittel 2.8 for TOS SN 50 C-dreiebenken. For maskinering hvor formålet er deler av svært høy kvalitet med høye toleransekrav er det derimot mer normalt å benytte seg av CNC-styrte maskiner av nyere dato.



Figur 2.23: Dreiebenkens oppbygning, hentet fra [Custompartnet \(2019\)](#)

I figur 2.23 er det skissert hvordan en dreiebenk er bygd opp. Ved maskinering så spennes emnet opp i spindelen (spindle). Denne delen kalles også for chucken. Dersom emnet er langt nok så benyttes også bakdokken (tailstock assembly) som oppspenningspunkt for å øke stabiliteten. Dersom man ønsker å fjerne material i emnets lengderetning eller å endre diameteren, bruker man to matehjul i forkant av dreiebenken. Disse er på figuren markert som henholdsvis ”cross slide hand wheel” og ”carriage hand wheel”, hvor førstnevnte reduserer diameter. Ved å vri på disse roteres en mateskrue inne som tvinger hele toppsleiden (carriage) frem og tilbake, og dette er et utsatt punkt for slark som kan bli utslagsgivende for maskinert resultat. På CNC-styrte maskiner er matehjulene erstattet med servomotorer som styres ved hjelp av G-koder.

Det er gjort flere studier på deformasjon i dreiebenk ved maskinering, blant annet i [Staniek et al. \(2012\)](#), hvor det gjennomføres FEM-analyser for utvendig dreining ved hjelp av bakdokke. Det er gjennomført en simulering med både 3 og 4 bakker i chucken. Med en dreiehastighet på 120 m/min og skjærekrefter  $F_c$  opp mot 6000N, ligger påkjenningene på dreiebanken en del høyere enn det som vil bli testet i denne rapporten. Likevel er det grunn til å anta at resultatene fra simuleringene er noenlunde lineære med forsøk ved lavere krefter. I resultatene fra artikkelen er det to forsøk som viser til noe utbøyning, men resultatene sier ingenting om vinkelendring i chuck som er av interesse for våre forsøk. Det er derfor ikke funnet stort av relevant teori for vinkelendringen i oppspenningsområdet, noe som undersøkes nærmere i denne rapporten.

## 2.12 Lasertracker

Det vil ved besvarelse av oppgavens punkter 1 og 3 bli benyttet en lasertracker for overvåkning av utbøyning ved bruk av utstyret fra prosjektoppgaven, i tillegg til tester som gjennomføres hos Sandvik Coromant. Trackeren som benyttes er en Leica AT960 produsert av Hexagon Manufacturing Intelligence. AT960 er en lasertracker med seks frihetsgrader, som automatisk danner et bilde av objektet som blir skannet. Trackeren er bærbar og egner seg derfor godt til måleoperasjoner som i prosjektet da forsøkene pågår over en kortere periode, og dermed vil det være gunstig med utstyr som er bærbart, lett tilgjengelig og som likevel opprettholder nødvendig nøyaktighet.



Figur 2.24: Leica AT960, hentet fra [DirectIndustry \(2019\)](#)

Ved hjelp av touch-skjerm og et intuitivt oppbygd operativsystem minimaliseres sjansen for brukerfeil, noe som vil være både penge- og tidsbesparende, opplyser Hexagon om på deres sider. Av ekstraustyr til trackeren kan nevnes både T-probe, T-mac, T-Scan 5, Reflektorkulen Red Ring Reflector 1.5" og Absolute Scanner-technology. Av dette er det ved NTNU Valgrinda anskaffet både T-probe og to reflektorkuler. Trackeren har et måleområde som går inntil 160 meter fra utstyret, og dermed kan man måle både større og mindre objekter. [Hexagon \(2019a\)](#)



Figur 2.25: Reflektorkuler, hentet fra [Hexagon \(2019c\)](#)



Figur 2.26: Leica T-probe, hentet fra [Hexagon \(2019b\)](#)



Det vil i prosjektet kun bli benyttet reflektorkule til de respektive forsøkene som gjennomføres. Reflektorkulene fungerer ved at lasertrackeren peker inn i linsen på kule, som reflekterer laserstrålen tilbake. Lasertrackeren vet ved hjelp av dette hvilken orientasjon den har, og lengden til senter av kule. Dette fører til at koordinatene i senter av kule til enhver tid er tilgjengelig i softwaren som benyttes ved bruk av lasertrackeren. Kulene plasseres i magnetiske sokler på objektet som skal måles.

Når det måles ved bruk av reflektorkulene er det ved bevegelse av objektet som måles flere måter å gjennomføre målingene på. Det kan gjennomføres kontinuerlige lagringer av posisjon etter en forhåndsbestemt frekvens, det kan lagres posisjon for hver angitte lengde som objektet flytter og det kan lagres koordinater manuelt ved behov. Lasertrackeren oppgir sammen med målte koordinater en grad av usikkerhet i målingene som er anslått å stemme med et 95% konfidensintervall. Denne usikkerheten ligger ofte i området  $2\ \mu\text{m}$  til  $5\ \mu\text{m}$ , men kan også være så lav som  $1\ \mu\text{m}$ .

## 2.13 Strømkilde

For gjennomføring av de enkelte oppgavepunktene i kapittel 1.2 er det valgt å benytte seg av forskjellige løsninger, og forslag til løsninger, for å tilfredsstille behovet for strømforsyning. Det er valgt å benytte seg av allerede innkjøpt utstyr fra prosjektoppgaven for repetering av målinger i dreiebenk hvor deler av utstyret byttes ut.

### Tester i dreiebenk

Det ble i prosjektoppgaven benyttet to nettadaptere fra biltema med justerbar utgangsspenning, se figur 2.27. Disse vil ved å lodde sammen positiv spenning fra den ene, og negativ fra den andre, dannes den unipolære strømkilden som er nødvendig for å kunne benytte seg av PDQ80A-sensoren. PDQ80A-sensoren krever en spenning på  $\pm 5\text{-}15\text{V}$ , noe som ligger i intervallet for adapterne.

I utgangspunktet vil en av adapterne danne en bipolar spenningskilde, hvor man har en positiv og en negativ verdi. Dette er kjent som +/-positiv spenning, ofte 5V/12V, og jording som er 0V. Ved en unipolær strømforsyning har man tre ledere. Positiv- og negativ spenning, og jording.



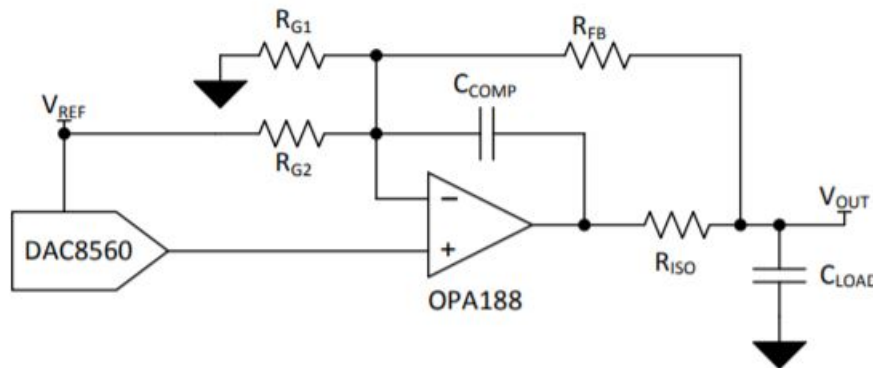
Figur 2.27: Nettadapter, hentet fra [Biltema \(2019\)](#)

## Implementering i verktøy

For å implementere systemet i et verktøy stilles det strengere krav til fysisk størrelse på komponentene som benyttes. Det vil være fordelaktig om komponentene som benyttes er å få kjøpt hos grossist eller ved bestilling hos mindre produsenter, fremfor å være produsert lokalt og være spesialtilpasset kun det respektive produktet.

Det ble allerede i prosjektoppgaven vurdert utstyr for implementering i verktøy. Det ble funnet en krets utviklet av [Duke \(2013\)](#) hos Texas Instrument, som tilfredsstill de krav til ytelse man vil møte på ved implementering i et verktøy. Se figur 2.28. Det vil fortsatt være interessant å benytte seg av denne kretsen ved implementering, da den tilfredsstill kravene til spenning og har liten fysisk størrelse.

Denne kretsen danner i likhet med adapterne en unipolær strømkilde. En av de største forskjellene ved å bruke adapterne og kretsen utviklet av Kevin Duke vil være at kretsen kan plasseres et sted mellom DAQ-enheten og sensoren, da den krever en bipolar spenning inn. Dette fører til at det eneste av ledninger til verktøyet vil være ledningene som går direkte fra DAQ-enheten. Dette åpner for muligheten til å få alt inn på en og samme kontakt.



Figur 2.28: Koblingskjema for endring av spenning, hentet fra [Duke \(2013\)](#).

I figur 2.28 kan man se en forenklet utgave av koblingskretsen. Kretsen består av en rekke motstander som velges ut fra hvilken spenning man ønsker inn, og hvilke spenninger man ønsker å kunne ta ut. Formel 2.13 benyttes for å regne ut nødvendig motstand.

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_{FB}}{R_{G2}} + \frac{R_{FB}}{R_{G1}}\right) * V_{DAC} - \frac{R_{FB}}{R_{G2}} * V_{REF} \quad (2.13)$$

Ved en spenning ut fra DAQ-enheten lik 5V, og ønsket spenning inn på sensor lik  $\pm 10V$  DC, vil man for negativ spenning få følgende likning,

$$-10V = \left(1 + \frac{R_{FB}}{R_{G2}} + \frac{R_{FB}}{R_{G1}}\right) * 0 - \frac{R_{FB}}{R_{G2}} * 5V = -\frac{R_{FB}}{R_{G2}} * 5V$$

$$R_{FB} = 2 * R_{G2}$$

mens man for positiv spenning vil få følgende likning;

$$10V = \left(1 + \frac{R_{FB}}{R_{G2}} + \frac{R_{FB}}{R_{G1}}\right) * 2.5V - \frac{R_{FB}}{R_{G2}} * 5V = -\frac{R_{FB}}{R_{G2}} * 5V$$

$$10V = \left(1 + \frac{R_{FB}}{R_{G1}}\right) * 5V$$

$$R_{G1} = R_{FB}$$

Ut fra disse likningene velger man tre motstander i en størrelsesorden som tåler strømmen fra sensorene. Strømmen fra sensorene er relativt lav. Det vil kreves to slike kretser for å drive sensoren da man er avhengig av å ha både en positiv og negativ spenning kontinuerlig. Fordelen med et oppsett av denne typen kan også være at man får mindre støy enn hva man får ved å benytte seg av nettadaptere. Det lar seg også implementere i verktøyet, og ved DAQ-enheten som spenningskilde vil det eneste nødvendige tilkoblingspunktet til verktøyet være en kabel fra DAQ-enhet til styreenhet.

# Kapittel 3

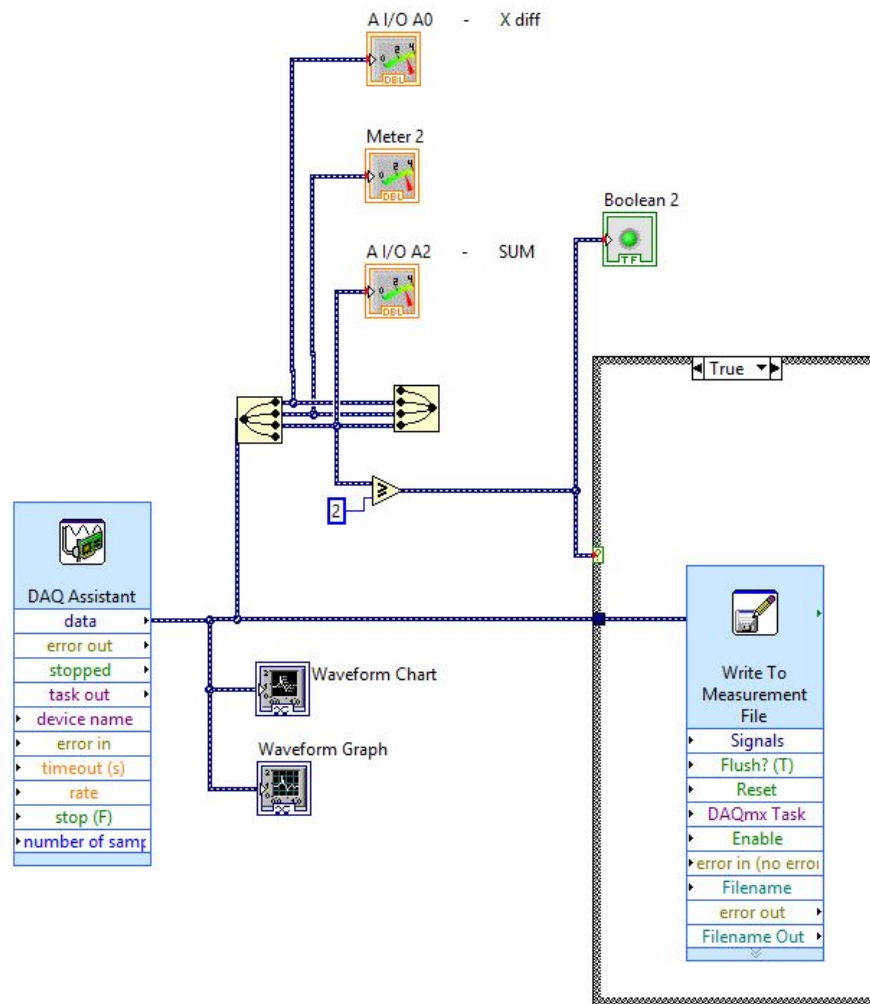
## Metode

Kapitlet er ment for å redegjøre hvordan de ulike komponentene og programvare blir benyttet for å legge grunnlaget for labforsøkene beskrevet i kapittel 5. Det viser også plassering av de ulike komponentene under forsøkene, og det danner et grunnlag for de beregningene som blir gjennomført i kapittel 4.

### 3.1 Akkumulering av data

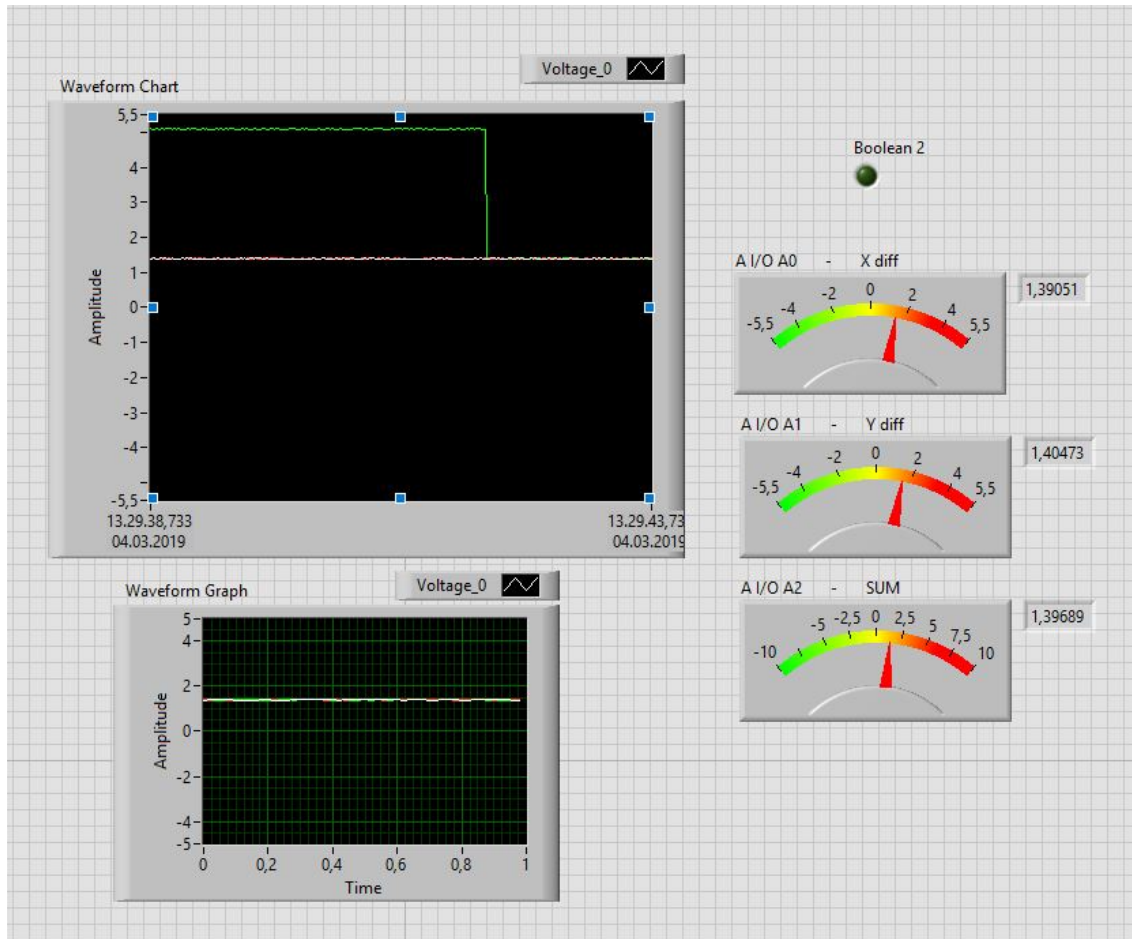
For innsamling av måledata benyttes programmet LabVIEW fra kapittel 2.6, kombinert med Python for plotting av grafer. Det er satt opp et blokkdiagram som gir avlesning av spenningen fra hver av de tre lederne - differanse i X-retning, differanse i Y-retning og SUM.

I tillegg loggføres alle avmålte verdier i en egen tekstfil dersom SUM-spenningen overstiger 2V. Det ble i prosjektoppgaven erfart at SUM lå i intervallet 3.1V til 3.2V. Det loggføres med en frekvens på 1000Hz, dermed er det ønskelig kun å loggføre dersom laserpekeren er aktiv, for å holde filstørrelsen ved et minimum, noe den er ved SUM-verdier over 2V.



Figur 3.1: Blokkdiagram i LabVIEW

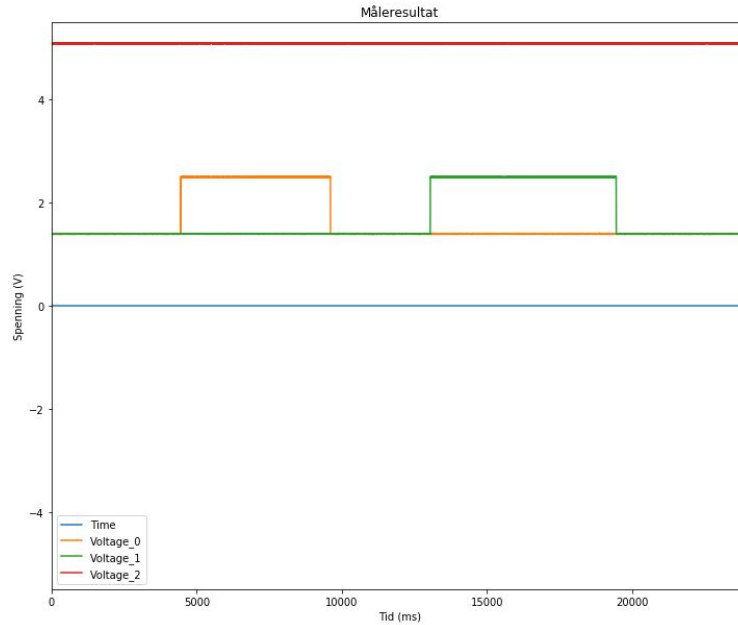
Underveis i målingene er det mulig å lese av gjeldende verdier for hver og en av lederne ved hjelp av tre målere, se figur 3.2. I tillegg til avlesningen fra målerne er det også lagt inn en boks som viser nøyaktig avlest verdi ved tidspunktet. Denne verdien loggføres ikke og er til hjelp ved statiske forsøk. Kontinuerlig loggføring er interessant for å plukke opp hvor godt systemet responderer ved dynamiske bevegelser. Ved dynamiske forsøk benyttes en frekvens på 5000Hz.



Figur 3.2: Frontpanel i LabVIEW

## 3.2 Fremstilling av måledata

Det er gjennomført en rekke forsøk som medfører en hel del måledata som skal presenteres. For dette er det valgt å benytte seg av programvaren Python 3.6. I Python hentes data fra excel-filen eller tekstdokumentet, avhengig av lagringsmetode, inn ved hjelp av biblioteket pandas. Det kan fremstilles en graf med data fra det øyeblikket laserpekeren slås på. Utskrift av graf vil bli tilsvarende som i figur 3.3, men med mykere overganger da det ved testing ble påført spenninger på hhv 2.5V og 5V for verifisering av programmet. Figurene blir deretter lagret automatisk ved filnavn som programmeres i Python, noe som gjør det effektivt å laste inn og erstatte gjeldende figur i dokumentet dersom det er nødvendig.

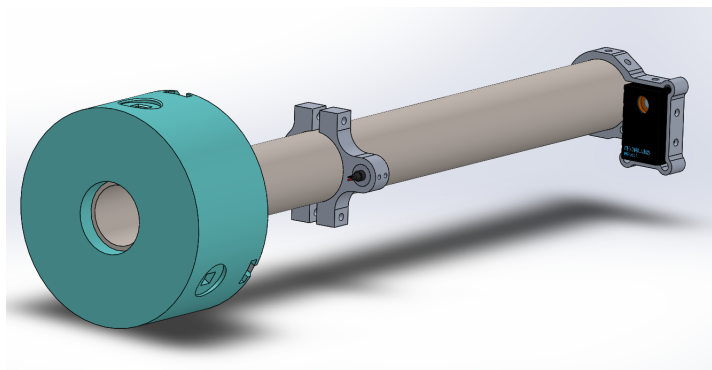


Figur 3.3: Fremstilling av graf i Python

### 3.3 Statiske målinger i dreiebenk

For å gjennomføre statiske tester i dreiebenk på lik linje med prosjektoppgaven, denne gang med verifisering av målinger ved hjelp av lasertrackeren Leica AT960, benyttes utstyr fra prosjektoppgaven. I tillegg til allerede nevnte komponenter som laser, lasermodul, DAQ-enhet og programvare benyttes maskinerte deler for oppspenning av borstang og komponentene. Det er også maskinert noe nytt utstyr. Dette utstyret er bestående av;

1. Borstang, 1 stk rør  $\text{Ø}48.3 \times 41.8$
2. Brakett for sensor
3. Todelt holder for lasermodul
4. Hylse for lasermodul
5. Brakett for lasermodul



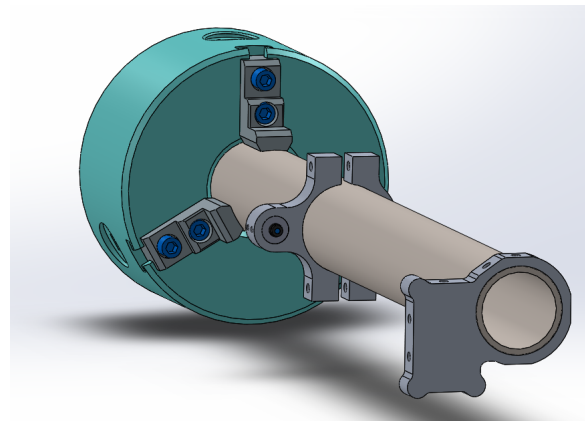
Figur 3.4: Illustrasjon av testrigg



Det ble i tillegg benyttet en plate i underkant av sleidene i dreiebenk og en klave for å legge på oversiden av borstang i prosjektoppgaven. To gjengestag mellom disse ble benyttet for å tvinge borstangen ned, tilsvarende en simulert utbøyning ved maskinering. For nye forsøk er det besluttet å også benytte seg av en vekt for å få enda bedre kontroll på kreftene som påføres, ved å løfte røret opp. Det ble også gjennomført repeterte forsøk lik de i prosjektoppgaven for å få målinger med ny laser. Testtriggen vil da bli seende ut som i prosjektoppgaven med noen modifiseringer, illustrert i figur 3.4 og 3.5. Oppsettet slik det blir benyttet vises i figur 5.2 og 5.1.

Ved innbygging av systemet vil det være naturlig å plassere lasermodul i tverrsnittets senter, dersom det benyttes sirkulær laserstråle. Systemet vil da ha lik sensitivitet for utbøyning i alle retninger. På statiske tester som gjennomføres i dreiebenk vil det ikke ha noen praktisk betydning hvorvidt sensor og laser er plassert i senter, eller i horisontalplanet fra senter da utbøyningen vertikalt vil være den samme over hele planet. En slik plassering muliggjør full overvåkning av systemet og tillater testing med moduler som i utgangspunktet har for stor fysisk størrelse for innbygging, men testen tillater verifisering av utstyret og gir dermed en indikasjon på om man skal gå videre, eller gjennomføre flere tester med andre komponenter.

Hvilke krefter som må overgå ved testing fremkommer av kapittel 4.1, hvor erfaringsbaserte tall fra lignende maskineringsprosesser benyttes for å danne et bilde av hvilke krefter man kan forvente. Ved praktiske forsøk på lab ble det benyttet en vekt som satte begrensninger med tanke på krefter, og dermed vil ikke de kreftene som ble beregnet i kapittel 4.1 kunne benyttes. De forsøkene som ble gjennomført på samme metode som i prosjektoppgave i form av tvungen nedbøyning vil derimot kreftene som er påført overstige de beregnede kreftene.



Figur 3.5: Illustrasjon av testtrigg

### 3.4 Målinger Sandvik Coromant

Det ble gjennomført målinger i en av de største CNC-styrte dreiebenkene hos Sandvik Coromant, som er en maskin produsert av Giana. Forsøkene er interessante for å kartlegge maskinens bevegelser både ved frikjøring og under maskineringsprosesser, og for å kartlegge om manglende stivhet i dreiebenken kan påvirke det maskinerte resultatet i henhold til oppgaveteksten i kapittel 1.2. Lasertrackeren ble benyttet for å observere nøyaktig posisjon av enkelte områder på dreiebenken.

Ved forsøkene ble lasertrackeren plassert i området bak dreiebenken, slik at den til enhver tid skulle ha fri sikt til de tre stedene hvor det ble plassert ut sokler for reflektorkulen. Se figur 3.6. Figuren illustrerer plassering av lasertrackeren, og sokkelen til to av de tre posisjonene som ble benyttet for reflektorkulen. I forsøkene var det montert en Ø60 mm borstang, utstyrt med strekkklapper og akselerometer for å kunne gjennomføre maskinerte prosesser med et utstikk på henholdsvis 12 og 14 ganger diameteren, noe som ved dempede verktøylar seg gjennomføre uten å gå på bekostning av resultatet, i følge [Sørby and Sundseth \(2015\)](#).



Figur 3.6: Plassering lasertracker

Det ble gjennomført forsøk der sleidene på dreiebenken ble kjørt uten at skjæreeggen var i inn-grep, og det ble gjennomført reelle maskineringsoperasjoner der de samme målingene ble gjentatt. Dette ble gjort for å se om reflektorkulen ved de respektive forsøkene beholdt samme posisjon under maskinering som ved tomgangskjøring, eller om kreftene påvirket toppsleiden på dreiebenken nok til at posisjonen endret seg. Det er forventet at posisjonen til reflektorkulen på borstangen flytter seg noe.

I tillegg til forsøk med kjøring av sleidene som ved en maskineringsoperasjon, ble det også kjørt trinnvise målinger både i Gianaens X- og Z-akse hver for seg for å kunne identifisere om det var slark i mateskruer, sleider og andre bevegelige deler som er i bevegelse når borstanger forflytter seg. Disse målingene ble også benyttet for å danne grunnlaget for rotasjonsmatrisen i kapittel 4.3.



Figur 3.7: Plassering 1

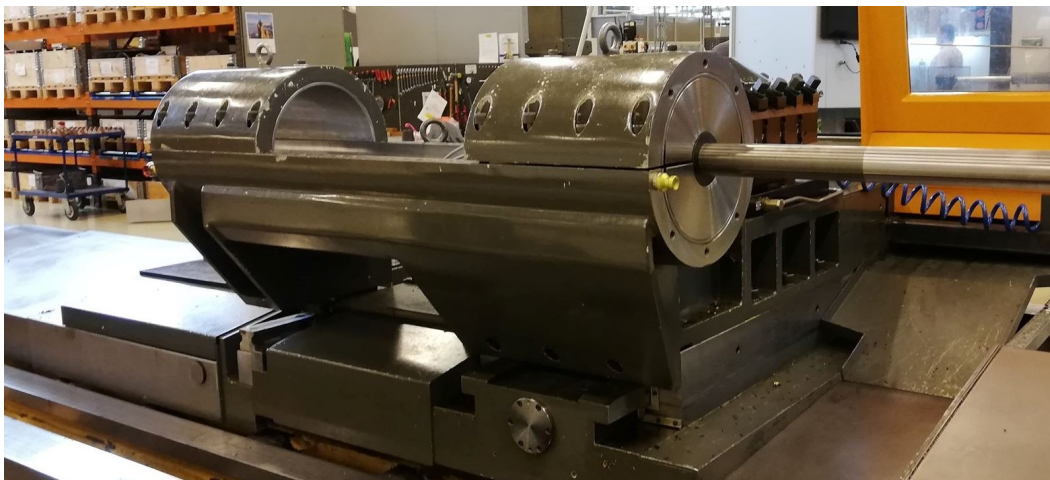


Figur 3.8: Plassering 2



Figur 3.9: Plassering 3

Figur 3.7-3.9 viser plasseringen til de tre soklene for reflektorkulen. Plassering 3 er i bakkant av innfestningen til borstangen. Det er valgt å plassere sokkelen på den nedre halvdelen av festet slik at den følger bevegelsene til toppsleiden. Den øvre halvdelen var ved forsøkene ikke skrudd til og dermed utelukket, da borstangen er fort kort til å benytte seg av begge festene. Se figur 3.10. I figur 3.8 ser man at også sokkel nummer to er plassert på den nedre delen av innfestningen.



Figur 3.10: Oversiktsbilde innfestning borstang

# Kapittel 4

## Beregninger

Dette kapitlet tar for seg de nødvendige beregningene for å supplementere forsøkene i kapittel 5. Det utledes en kraft som er veiledende for å danne grunnlag for utbøyning og pålast ved de praktiske testene. Det beregnes også vinkler som er nødvendige ved omregning fra lasertrackers koordinatsystem til Gianaens system.

### 4.1 Krefter

For praktiske tester hvor det legges på vekter for å demonstrere virkningen til systemet, er det nødvendig å vite omtrent hvilke krefter man oppnår ved maskinering. Slik det er i beskrevet i kapittel 2.9, så vil det være tilstrekkelig å benytte seg av eksperimentelle måledata fra andre forsøk. Det er tatt utgangspunkt i artikkelen "Cutting dynamics and Stability of Boring Bars". Denne artikkelen introduserer tall som samsvarer med figur 2.19

Tabell 4.1: Skjærekrefter for innvendig dreining, hentet fra [Kuster and Gyax \(1990\)](#)

	Finish turn. 0.8	Finish turn. 1.2	Rough turn. 0.8	Rough turn. 1.2
$F_c$	128 N	151.6 N	1643 N	1575.2 N
$F_v$	49.4 N (38.6)	55.1 N (36.4)	770.6 N (46.9)	673.4 N (42.8)
$F_p$	74.1 N (57.9)	92.1 N (60.1)	329.6 N (20.0)	378.8 N (24.1)

I tabell 4.1 er det gjennomført to forskjellige typer kutt. "Rough turning" tilsvarer et kutt på 2 mm, mens "finish turning" tilsvarer et kutt på 0.5 mm. Det er lagt inn i parentes hvor mange prosent av  $F_c$  den respektive kraften utgjør. Dette for å vise at det ikke er noe fasitsvar for forholdstallet mellom skjærkraften  $F_c$  og de andre kreftene, til tross for at det finnes formler for dette. Det blir tatt utgangspunkt i en kuttdybde som ligger mellom de to fra tabellen, med en kuttdybde  $a_p$  lik 1.5 mm. Matehastighet blir estimert til 0.2 mm/omdreining, og verdi for materialkonstanten  $k_s$  blir satt til 3000 MPa. Sandvik Coromant har i sin produktkatalog en anbefaling på kuttdybde fra 1 til 2 mm. Der opplyses det også om at matehastigheten for de aller fleste skjærebits hos de ligger på 0.2 mm/omdreining. 0.8 og 1.2 i tabell 4.1 kommer av neseradius på skjærebitsen som benyttes.

Skjærkraften  $F_c$  for bruk i videre anslag vil da bli lik;

$$F_c = k_s * a_p * b = 3000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1.5\text{mm} * 0.2 \frac{\text{mm}}{\text{omdr}} * 1 \text{omdr} = 900\text{N} \quad (4.1)$$

En kraft på 900 N tilsvarer omtrent 92 kg. En nødvendig vekt pakke for å få virkelighetsnære målinger vil da ligge i området 80 - 100 kg, noe det fysisk ikke er nok plass til i dreiebenken. Derfor er det valgt å benytte seg av en vekt for to av forsøkene, og utstyret fra prosjektoppgaven i to av forsøkene for å få en utbøyning som overgår beregnet last.

## 4.2 Utbøyning av borstang

Slik det fremgår av kapittel 2.9 så kan borstangen sees på som et rør, innfestet som en utkragerbjelke. For praktiske tester i dreiebenk som tilsvar på oppgavens punkt 1 og 3, blir det benyttet et emnerør som allerede finnes i labens sortiment. Det er valgt et emnerør med dimensjon  $\text{Ø}48.3 \times 41.8$  mm for å kunne benytte seg av utstyret som ble benyttet i prosjektoppgaven, slik oppgaveteksten tilsier.

Maskinerte deler som benyttes i oppgaven er produsert i aluminium, og grunnet deres størrelse vil vekten bli neglisjert fra eventuelle beregninger som ville inkludert de. Da det benyttes vekt i testene som foretas i dreiebenk, vil det målbare resultatet være forskjell i utbøyning før og etter

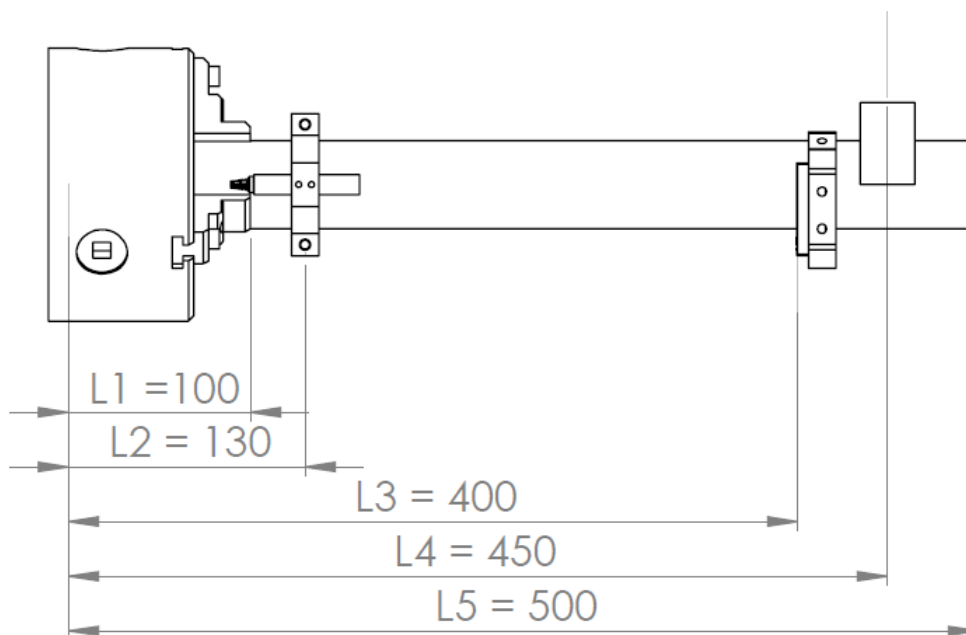
pålegging av vekt. Til tross for at maskinerte deler og selve røret gir en initial-nedbøyning, vil det ikke være hensiktsmessig å beregne denne da forskjell i vekt og forskjell i nedbøyning gir de svarene som søkes. Tekniske data for røret finnes i tabell 4.2. Det brukes 100 mm av rørets lengde for oppspenning i chucken.

Tabell 4.2: Dimensjoner og material verktøyholder

Total lengde [L5]	500	mm
Oppspenningslengde [L1]	100	mm
Utvendig diameter [D]	Ø48.3	mm
Innvendig diameter [d]	Ø41.8	mm
Massetetthet [ $\rho$ ]	7850	kg/m <sup>3</sup>
Elastisitetsmodul [E]	210000	MPa
Skjærmodul [G]	80770	MPa

Annet treghetsmomentet for røret finnes ut fra følgende formel, hentet fra [Larsen \(2007\)](#),

$$I_x = I_y = \frac{\pi *}{64} * (D^4 - d^4) = 117296 \text{ mm}^4 \quad (4.2)$$



Figur 4.1: Lengder ved oppspenning

Ved påføring av last vil rørets utbøyning være proporsjonal over hele området. Det vil si at helt inne ved chucken hvor laseren er plassert, så vil det også være et begrenset avvik mellom horisontalplanet og laserstrålens utgangsretning. Som det fremgår av beregningene i tillegg E vil dette avviket være på 0.28 mRad. Sett opp mot det som oppgis fra fabrikantene av lasermodulene med maksimale avvik på henholdsvis 0.6 mRad og 25 mRad for de vurderte og benyttede lasermodulene, vil denne nedbøyningen være neglisjerbar for målingene. Det er verdt å merke seg at hvis man endrer avstanden  $L_3$  fra å gjelde for en lasermodul på 60 mm lengde til en med 15 mm lengde, altså endringen fra CPS635R-modulen til lasermodulen fra prosjektoppgaven som ble gjennomført før jul, vil denne vinkelen gå fra 0.28 mRad til 0.071 mRad. Det er med andre ord en svært utslagsgivende for måleresultatene hvor lasermodulen plasseres. Ideelt sett burde da lasermodulen i forsøkene være plassert i den enden av verktøyet som er opplagret i bakkene og dermed ikke har noen nedbøyning. Ved hjelp av vinkelendringen for lasermodulen er det mulig å beregne hvor mye utslag dette gir ute ved sensorens plassering. Ved en lengde mellom sensoren og lasermodulen på  $(L_4 - L_3)$ , slik det kommer frem av likning 4.3, viser det seg at noe av den teoretiske nedbøyningen til verktøyet vil være dekket inn av laserens utgangsvinkel,

$$x_1 = \beta_3 * (L_4 - L_3) = 0.075 \text{ mm} \quad (4.3)$$

noe som gjør at den målbare nedbøyningen bare vil være,

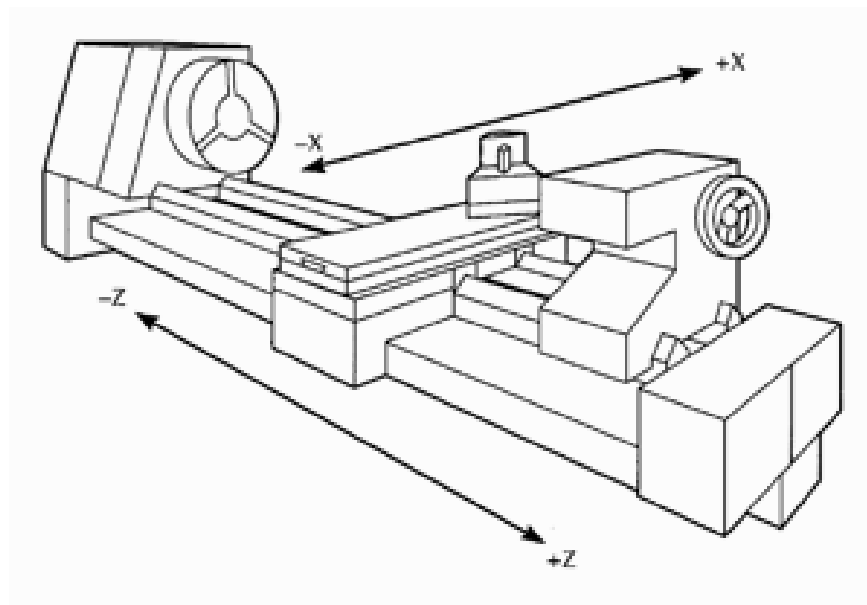
$$x_2 = y_4 - x_1 = 0.44672 \text{ mm} \quad (4.4)$$

og ikke 0.559 mm som først beregnet. Denne beregningen er noe forenklet da det ikke er tatt høyde for at sensoren som er plassert ute ved punkt 4 på borstangen vil komme noe nærmere bakkene i det horisontale planet når røret bøyes ned, men at det er antatt er sensoren beveger seg loddreid nedover. Distansen som ikke er tatt høyde for vil være så lav at den er neglisjerbar i det store bildet. Det kan være interessant å se på nevnte problemstilling ved innbygging i verktøy og kalibrering av dette, men ved forsøk som gjennomføres i prosjektet vil ikke dette være utslagsgivende for en konklusjon om hvorvidt utstyret og prinsippet lar seg gjennomføre. Se tillegg E for skisser. Lastpunktet  $L_4$  vil være det samme for begge typen forsøk.

Forventet nedbøyning av røret som simulerer verktøyet vil da ved en pålast av 900N altså bære 0.559 mm ved sensorens plassering. Det som forventes å være målbart av dette vil være 0.44672 mm. Dette er godt innenfor kvadrantsensorens måleareal og dermed målbart.

### 4.3 Rotasjon av koordinatsystem

Det vil for testene som gjennomføres hos Sandvik Coromant være nødvendig med en matrise eller et likningssett for å få endret måledata fra lasertrackeren og dens koordinatsystem, slik at det stemmer overens med Gianaen og dens koordinatsystem, som er CNC-dreiebenken hos Sandvik Coromant som ble benyttet for noen av målingene med lasertrackeren.



Figur 4.2: Akser Giana, hentet fra [HelmanCNC \(2019\)](#)

I figur 4.2 illustreres aksene i CNC-dreiebenken, slik det ble oppgitt fra operatør. Lasertrackeren vil ikke kunne posisjoneres nøyaktig i forhold til koordinataksene på Gianaen. Plasseringen som ble benyttet kommer frem i figur 3.6 og danner grunnlaget for figur 4.3 som benyttes ved rotasjon av X og Z-akse i måledataene. En kjøring på 250 mm i positiv  $X_g$ -retning på Gianaen ga resultatene i tabell 4.3. X-, Y- og Z-aksene på Gianaen omtales som henholdsvis  $X_g$ ,  $Y_g$  og  $Z_g$ .



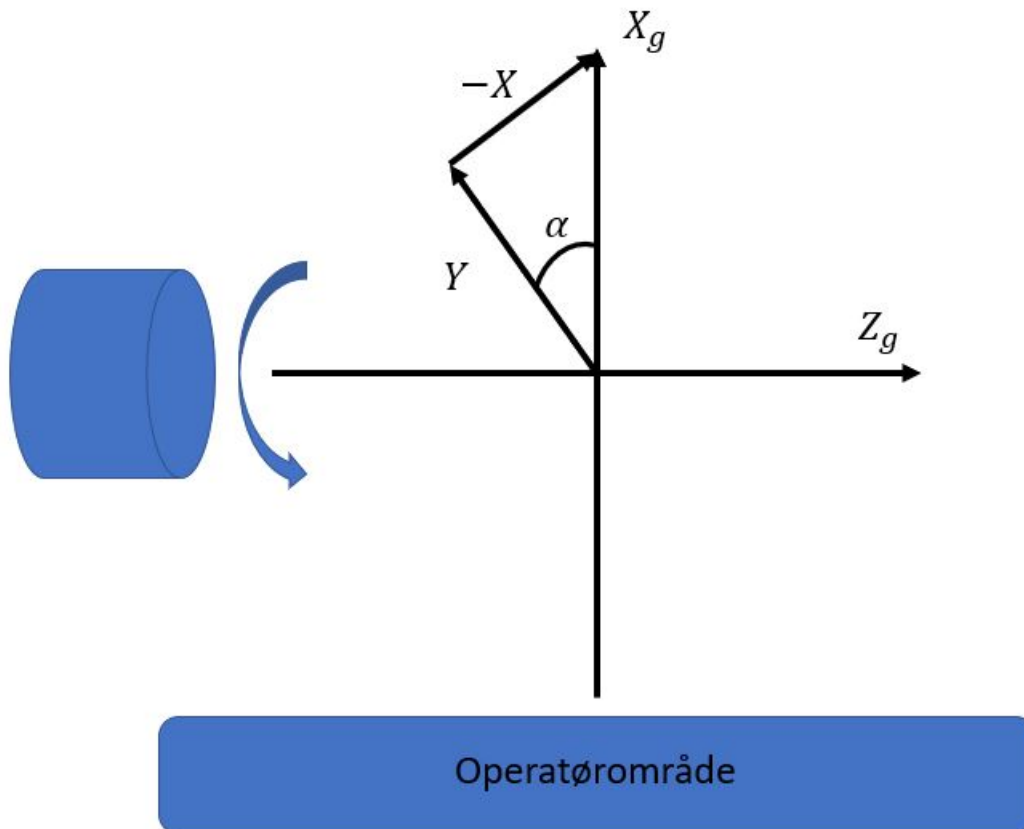
Tabell 4.3: Testkjøring  $X_g$ -akse

Posisjon	X [mm]	Y [mm]	U(95) [mm]	U(95) X [mm]	U(95) Y [mm]
1	0	0	0.001	0.001	0.001
2	-167.023	186.017	0.002	0.001	0.001

En kontrollregning viser at distansen reflektorkulen flyttet seg var 250 mm,

$$\Delta L = \sqrt{-167.023^2 + 186.017^2} = 249.998 \quad (4.5)$$

som er innenfor gitt feilmarginen trackeren selv har oppgitt.



Figur 4.3: Plassering lasertracker i forhold til Giana

I figur 4.3 er resultatene fra testkjøringen i  $X_g$ -aksen tegnet inn, og det er funnet en vinkel  $\alpha$  som viser seg å være gjeldende mellom alle kjøringene i Gianaen og målte resultater fra lasertrackeren. X og Y tilsvarer aksene i lasertrackerens koordinatsystem.

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{186.017}{249.998} = 48.0796^\circ \quad (4.6)$$

Dermed kan det settes opp en matrise eller et likningssett for å konvertere målte verdier fra lasertrackerens koordinatsystem til Gianaens koordinatsystem.

$$X_g = -X * \cos(\alpha) + Y * \sin(\alpha) \quad (4.7)$$

$$Z_g = -X * \sin(\alpha) - Y * \cos(\alpha) \quad (4.8)$$

$$\begin{bmatrix} X_g \\ Z_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & -\cos(\alpha) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

# Kapittel 5

## Labtester

I dette kapittelet benyttes komponenter fra kapittel 2 kombinert med utregnede verdier fra kapittel 4.1, for gjennomføring av forsøk knyttet opp mot oppgavens punkt 2 og 3 i kapittel 1.2. Forsøkene blir satt opp slik det er beskrevet i kapittel 3, og utfyllende informasjon omkring hvilke kjøring og forsøk som gjennomføres blir presentert.

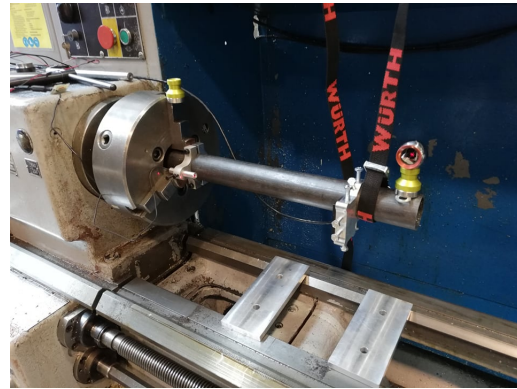
### 5.1 Statistiske målinger i dreiebenk

De første testene ble gjennomført med oppsettet i kapittel 3.3. Det ble gjennomført fire forskjellige statistiske forsøk for å undersøke repeterbarheten til systemet. Ved to av testene ble enden av røret løftet vertikalt ved hjelp av kran og kraftmåler, mens ved de to siste testene ble røret tvunget ned mekanisk. Ved alle testene ble Leica AT960 lasertrackeren benyttet for kontrollmål og verifisering, slik at rørets nøyaktige posisjon kunne sammenlignes med avleste måleverdier fra posisjonssensoren.

#### Forsøk ved løft

Det ble gjennomført målinger hvor enden av røret ble løftet ved hjelp av en verkstedkran som går på skinnebaner i taket, et strammebånd og en enkel bagasjevekt. I figur 5.1 vises noe av oppsettet, før strammebåndet ble dratt til. Vekten som ble benyttet var av typen Travelon, og hadde som hensikt å gi en indikasjon på kraftbildet ved de forskjellige målingene. Travelon-vekten hadde en maksimal kapasitet på 34 kg, og dermed var det ingen mulighet å oppnå krefter

lik de som ble funnet i kapittel 4.1. Ved bruk av vekt er det imidlertid mulig å danne seg et bilde for i hvilke områder av utbøyningen posisjonssensoren returnerer et lineært resultat til DAQ-enheten. Hele systemet ble før testingen begynte plassert i henhold til målene som ble benyttet i kapittel 4.2 ved beregning av teoretisk utbøyning. Grunnet strammebåndets funksjon ble det som antatt ikke mulig å ha full kontroll over hvilken vekt som ble påført ved hver enkelt justering av båndet. Det ble også begrenset med avlesninger før vekten nådde 34 kg. Ved gjennomføringen av forsøkene med løft ble posisjonen til senter i reflektorkulen og verdier fra posisjonssensoren lest av før det ble satt krefter på røret, for å vite nøyaktig utgangspunkt for forsøket. Deretter ble strammebåndet justert ett hakk og nye verdier avlest.



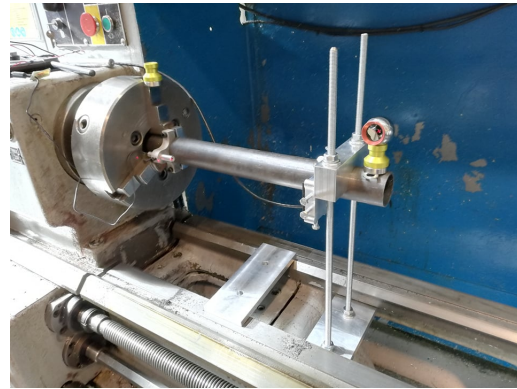
Figur 5.1: Statisk forsøk, løft

Prosessen ble gjentatt til begrensningen satt av vekten var innfridd. Ved dette tidspunktet ble så strammebåndet løst ut, og man hadde de samme forhold som ved begynnelsen av testene. Det ble nå på nytt lest av verdier både på reflektorkulen og posisjonssensor. Det er her rimelig å anta at man har verdier som samsvarer med de verdier avlest før prosessen ble påbegynt.

### **Forsøk ved mekanisk nedbøyning**

Forsøk tre og fire ble gjennomført ved at det som i prosjektoppgaven ble montert en klave på oversiden av røret, som så ble skrudd ned mot sleidene i dreiebenken, slik det fremgår av figur 5.2. Også i disse forsøkene er hensikten å kunne si noe om sensoren returnerer et lineært resultat av målinger i henhold til utbøyningen, om målingene er repeterbare i den grad at samme utbøyning ved hvert enkelt forsøk returnerer samme verdier, og at man ved avlastning leser av verdier tilnærmet det samme før og etter at det har vært påført en utbøyning.

I motsetning til forsøkene med strammebånd er det her mulig å ha bedre kontroll på utbøyningen også underveis. Det gjør det også mulig å få flere målepunkter ved hvert enkelt forsøk da det ikke ligger noen begrensning i strammebånd, og de utbøyningene man oppnår ved skruing vil være av en størrelsesorden flere ganger større enn beregnet nedbøyning ved en *normal* dreieoperasjon.



Figur 5.2: Statisk forsøk, nedbøyning

Ved forsøkene ble det gjennomført tre avlesninger på trackeren ved hver utbøyning. Først en hvor reflektorkulen var plassert ut ved enden av røret. Deretter ble kulan plassert i sokkelen som sto plassert på en av de tre bakkene, se figur 5.2. Den siste avlesningen ble gjort etter at reflektorkulen var plassert tilbake i sokkelen ved enden av røret. Det ble avlest to ganger ute ved enden av røret, før og etter forflytning, for å oppdage en eventuell forskyvning av sokkel i det kulan fjernes. Verdier fra posisjonssensoren ble avlest rett etter justering, i samme posisjon som den første av de tre målingene mellom hver justering av utbøyningen.



Figur 5.3: Detalj

## 5.2 Dynamiske målinger i dreiebenk

Ved implementering av utstyret i et verktøy vil det ikke være statiske tilfeller som gjelder, men dynamiske. Derfor er det gjennomført tester for å vurdere systemets evne til å fange opp høyfrekvente endringer i borstangens posisjon. Ved disse testene ble DAQ-enhetens frekvens endret til 5000 Hz.

Det ble gjennomført fire loggføringer ved dynamiske tester. I den første ble røret påsatt en vibrasjon ved å svinge røret ut for hånd. I de tre siste det ble påført hammerslag av varierende styrke, retning og frekvens. De respektive målingene presenteres i sin helhet i kapittel 6.2. Formålet med testene er å danne seg et bilde om hvorvidt det er DAQ-enhet eller posisjonssensoren som er begrensningen i systemets evne til å oppfatte dynamiske bevegelser. Ved testene ble det samme utstyret benyttet som for testene i kapittel 5.1, med unntak av strammebånd, vekt og klave.

### 5.3 Tester i Giana hos Sandvik Coromant

Det ble den 30. April gjennomført tester for å kartlegge presisjon og stivhet på CNC-dreiebenken Giana hos Sandvik Coromant, med oppsettet vist i kapittel 3.4. Det ble gjennomført totalt 13 avlesninger, som skulle gi tilstrekkelig informasjon til å ta en beslutning om det er interessant å gjennomføre nye tester med en større borstang hvor kreftene og utslagene ville vært større. Det skal også kunne kommenteres hvorvidt stivheten til dreiebenken påvirker maskinert resultat.

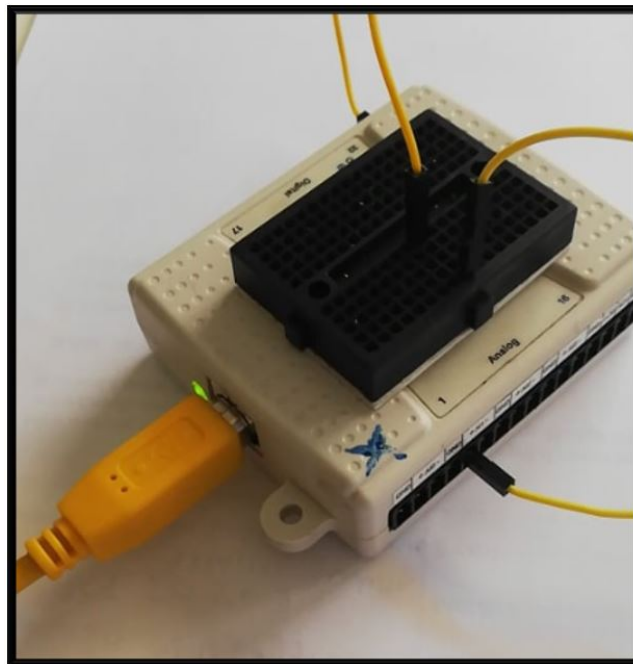
Tabell 5.1: Tester hos Sandvik Coromant

Test	Type	Plassering reflektorkule	Kuttdybde
1	Tomgangskjøring	Posisjon 1	
2	Tomgangskjøring	Posisjon 1	
3	Kutt	Posisjon 1	2.5 mm
4	Tomgangskjøring	Posisjon 1	
5	Kutt	Posisjon 1	2.5 mm
6	Kutt	Posisjon 2	2.5 mm
7	Tomgangskjøring	Posisjon 2	
8	Tomgangskjøring	Posisjon 3	
9	Kutt	Posisjon 3	2.5 mm
10	Tomgangskjøring	Posisjon 3	
11	Innmåling	Posisjon 3	
12	Innmåling	Posisjon 3	
13	Innmåling	Posisjon 3	

De 13 testene er fremstilt i tabell 5.1. Etter ti forsøk hvor det ble avlest tallmateriale for å se på forskjellen mellom kjøring med og uten skjæret i inngrep, ble det gjennomført to avlesninger hvor aksene ble kjørt hver for seg med 10 mm ( $X_g$ ) og 5 mm ( $Z_g$ ) forflytning mellom hver avlesning. Se kapittel 6.4 for behandlede måledata. De siste testene er viktige for å kunne vurdere slark i sleidene i dreiebenken, og for å kunne kommentere viktigheten av å kjøre seg inn mot et kutt fra samme side hver gang. For  $Z_g$ -aksen spiller ikke dette noen rolle for maskinert resultat da man uansett må kjøre seg inn fra den samme siden, men for  $X_g$ -aksen står man i utgangspunktet fritt til å velge om den siste kjøringen i aksene skal være i negativ eller positiv retning før inngrepet. Helt til slutt ble det gjennomført en kjøring hvor toppsleiden ble kjørt 250 mm i positiv X-retning for å danne grunnlaget til likningene 4.7 og 4.8.

## 5.4 Test av NI USB-6009

I kapittel 6 kommer det frem at det er støy i målingene, og at avlest spenning fra DAQ-enheten viser seg å variere noe. Derfor gjennomføres det en avlesning hvor jordingen på DAQ-enheten kobles direkte opp mot den analoge porten som måler Y-differansen slik det er beskrevet i kapittel 3.1. Formålet med testen er å konkludere med om støyen skyldes sensor eller selve DAQ-enheten. Avlesningene bli gjennomført med en frekvens på 5000Hz, og totalt 70 000 målinger blir avlest.

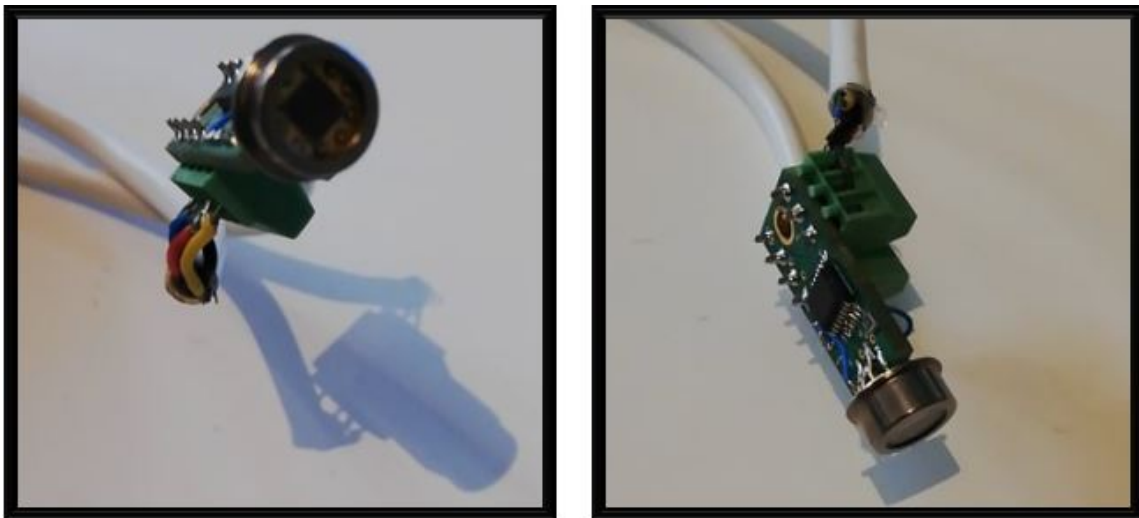


Figur 5.4: Testoppsett DAQ-enhet



## 5.5 Test av sensorer

I likhet med testen av DAQ-enheten i kapittel 5.4 testes også begge sensorene i et statisk tilfelle hvor det ikke er noen form for bevegelse på verken laser eller sensor. Komponentene plasseres i en jigg slik at det ikke skal være rom for bevegelse. Den første testen blir gjennomført på PDQ80A-sensoren som ble benyttet ved testene hos NTNU Valgrinda. Den andre testen blir gjennomført på en posisjonssensor overlevert fra Sandvik Coromant med tilhørende kretskort, for å avdekke spenningsvariasjoner mellom denne og PDQ80A-sensoren. Denne sensoren er satt sammen hos Sandvik Coromant av innkjøpte komponenter, og minner mye om en QD50-SD-modul. Det kan være aktuelt å benytte seg av denne ved implementering i verktøy der PDQ80A-sensoren er for stor fysisk. Det er interessant å se om en sensor som er fysisk mindre opprettholder samme presisjon som et kommersielt produkt.



Figur 5.5: Sensor fra Sandvik Coromant

For PDQ80A-sensoren leses det av verdier for X-diff og sum. X-diff og Y-diff genereres likt og dermed er det ingen hensikt i å lese av begge verdiene, da støyen for de to avlesningene vil være den samme avhengig av hvor laserstrålen treffer under forsøket. For sensormodulen bygd av Sandvik Coromant leses én av fire ledere. De fire lederne for sensormodulen tilsvarer Q1-Q4 for PDQ80A-sensoren i likningene 2.1 og 2.2. Det blir gjennomført 80000 avlesninger for hvert av forsøkene.

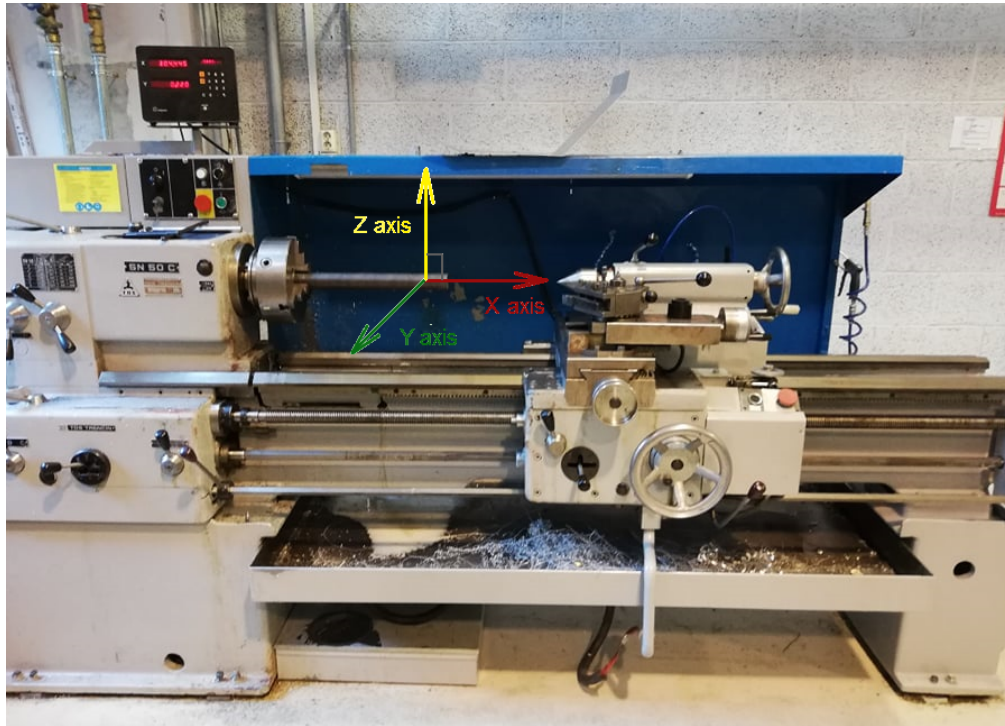
# Kapittel 6

## Resultat

I kapitlet presenteres behandlede måledata for forsøkene beskrevet i kapittel 5, slik at målt nullpunkt ligger i senter av reflektorkulen ved målingenes start. Det er gjennomført hensiktsmessige justeringer og behandling av datene for å lettere kunne kommentere den faktiske konsekvensen av de ulike rådataene, og for å danne et grunnlag for sammenligning mellom de ulike forsøkene. Kapitlet inneholder også en diskusjon omkring resultatene, hvor det drøftes hvorvidt målingene er representative, feilkilder og andre omkringliggende årsaker som påvirker resultatene.

### 6.1 Statistiske målinger i dreiebenk

For DAQ-enheten er det angitt maksimal og minimumsverdi for statistiske målinger da de avleste verdier varierte mellom flere verdier til enhver tid, noe som tyder på støy enten i målingene eller at oppløsningen til enheten ikke er god nok. Ved igangkjøring av Leica AT960 trackeren ble laseren plassert i forkant av dreiebenken på en så måte at èn av de tre kartesiste koordinatene gikk parallelt med rørets lengderetning, èn av koordinataksene gikk vertikalt og den siste horisontalt ut mot selve trackeren, slik det fremgår av figur 6.1.



Figur 6.1: Koordinater ved bruk av Leica AT960

## Forsøk ved løft

Ved løft av rørets ende ble det fra vekten, Leica AT960 lasertrackeren og DAQ-enheten NI USB-6009 avlest de verdiene som er gjengitt i tabell 6.1 og tabell 6.2 for de to respektive forsøkene.

Tabell 6.1: Avleste verdier for første forsøk

	Travelon	Leica AT960				NI USB-6009	
	Vekt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	U(95) [mm]	X-diff [max/min][V]	Y-diff [max/min][V]
1	0 kg	0	0	0	0.003	-0.04603 -0.05113	0.12630 0.11858
2	10 kg	0.463	-0.566	0.084	0.004	-0.03824 -0.04345	0.07563 0.06732
3	20 kg	0.975	-1.19	0.171	0.008	-0.00523 -0.07553	-0.29482 -0.30756
4	22.5 kg	1.01	-1.191	0.307	0.012	0.02284 0.00499	-0.41476 -0.42753
5	0 kg	0.86	-1.11	-0.001	0.008	-0.03072 -0.03582	0.08543 0.08032

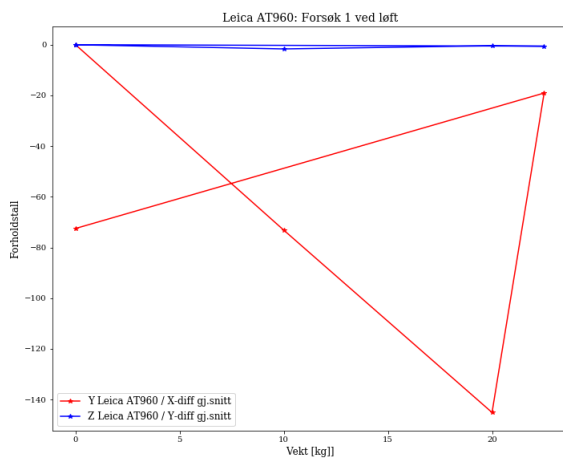
Tabell 6.2: Avleste verdier for andre forsøk

	Travelon	Leica AT960				NI USB-6009	
	Vekt	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	U(95) [mm]	X-diff [max/min][V]	Y-diff [max/min][V]
1	0	0	0	0	0.006	-0.03582 -0.03837	0.12368 0.11092
2	4	0.019	-0.022	0.042	0.003	-0.02081 -0.03582	-0.01156 -0.02177
3	8	0.091	-0.086	0.067	0.009	-0.01031 -0.02306	-0.05494 -0.0677
4	12.5	0.17	-0.173	0.115	0.006	-0.00775 -0.01541	-0.16978 -0.18254
5	18	0.26	-0.255	0.165	0.008	-0.0001 0.00499	-0.26424 -0.28206
6	25	0.28	-0.259	0.252	0.003	0.02281 0.01521	-0.40455 -0.42497
7	29	0.294	-0.265	0.305	0.007	0.02031 0.03051	-0.47091 -0.48366
8	0	0.106	-0.166	-0.027	0.008	-0.02817 -0.03837	0.06754 0.05223

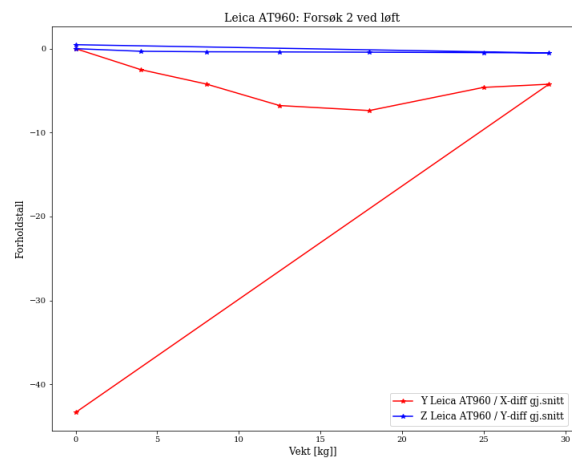
U(95) angir trackerens eget estimat for presisjon ved et 95%-konfidensintervall, og estimatet er for begge forsøkene forsvinnende lite i forhold til forflytningen etterhvert som vekten øker. X, Y og Z angir de globale koordinatene for hvert avleste punkt. I tabellene er nullpunkt satt lik det første avleste punktet ved hvert forsøk.

Fra tabell 6.1 og tabell 6.2 observerer man at ingen av X-, Y- og Z-koordinatene går tilbake til utgangspunktet. Dette indikerer enten at at reflektorkulen har flyttet på seg, røret er i en annen posisjon i forhold til chucken eller at chucken har endret posisjon. At reflektorkulen som er festet med en kraftig magnet flytter på seg er lite sannsynlig, det samme gjelder en relativ forflytning mellom chuck og rør. Dermed er sannsynligheten for at chucken har rotert noe i forhold til utgangspunktet stor. Chucken er "låst" ved å være satt til det laveste omdreiningstallet for dreiebenken, men det vil alltid bære noe slark som tillater bevegelse.

Ved rotasjon av chucken vil de første avleste verdier gi lite informasjon om komponentenes bruksverdi. Etterhvert som kraften det løftes med tiltar vil rotasjonen av chucken avta før den fullstendig uteblir, og måleresultatene vil kunne si noe om målenøyaktigheten. I figur 6.2 og figur 6.3 er det angitt forholdstall mellom faktisk posisjonsendring angitt fra lasertrackeren, og avlest måleverdi for spenningen fra posisjonssensoren. Den avleste spenningen fra posisjonssensoren er den gjennomsnittlige verdien av minimum- og maksimumsverdiene angitt i tabellene 6.1 og 6.2. Også for disse verdiene er det korrigert slik at utgangsverdiene er 0. Så lenge alt lys fra laseren treffer posisjonssensoren vil spenningens endring være lineær med forflytningen, noe som ble bekreftet i prosjektoppgaven. Med dette som utgangspunkt skal forholdstallene kunne plottes tilnærmet lineært i et perfekt tilfelle.



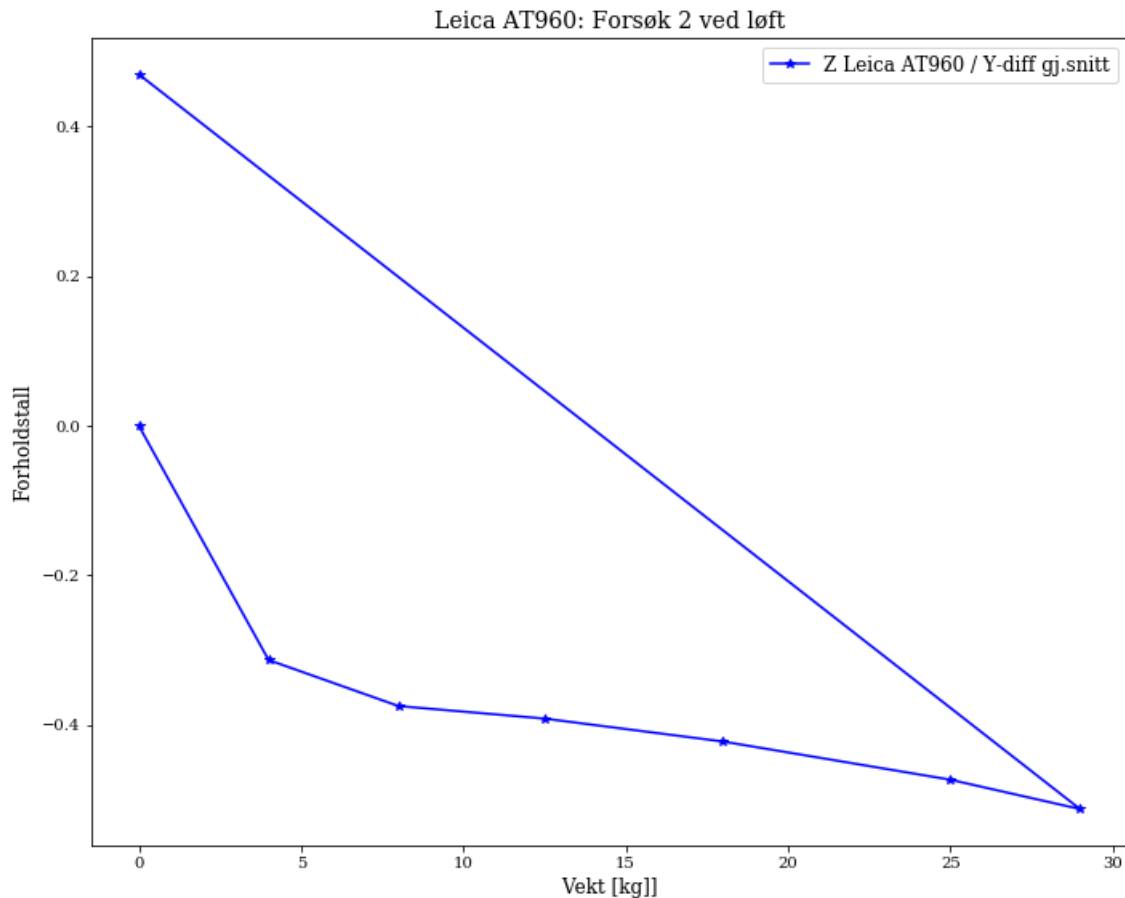
Figur 6.2: Forsøk 1 ved løft



Figur 6.3: Forsøk 2 ved løft

I figur 6.2 og figur 6.3 ser man at det ved begge forsøkene er tilnærmet lineære resultat som kommer frem av målingene. Det røde plottet tilsvare posisjonssensorens X-differanse-verdi, altså Y-aksen i figur 6.1. Her blir ved avlastning verdien aldri den samme som initialverdien, og dette avslører en sensitivitet for en liten rotasjon av chucken. Det er verdt å merke seg at ved rotasjon av chucken vil ikke dette påvirke avleste verdier fra posisjonssensoren, da både den og laseren roterer med chucken. Avleste verdier fra lasertrackeren vil derimot bli påvirket.

Det blå plottet tilsvarende posisjonssensorens Y-differanse-verdi, altså Z-aksen i figur 6.1. Her observeres det at forholdstallet ved avlastning blir tilnærmet det samme som initialverdien, og at det er en større grad av linearitet ved gradvis økning i kraften. Ved å se kun på plottet for globale Z-verdier for forsøk 2 ved løft ser man i figur 6.4 at forholdstallets stigningstall forholder seg tilnærmet konstant fra en kraft på cirka 5 kg og høyere. Man observerer også at forholdstallet ved avlastning ligger langt fra 0. Dette skyldes, slik det fremgår av formelen i øvre høyre hjørne av figuren, at avlest Z-verdi fra lasertrackeren ikke lengre er 0. Ved korreksjon av avleste verdier fra posisjonssensoren er avviket her derimot mindre, noe som gir et høyt forholdstall. Dette vitner nok en gang om at det er rotasjon av chucken som står bak mye av endringen i avleste verdier fra lasertrackeren. Grafen bekrefter også at posisjonssensoren i det området av forsøket hvor man ikke har vridning av chuck eller høy utnyttelse av vekten, mellom 8 og 25 kg, at avleste verdier øker jevnt med avleste verdier fra lasertrackeren.



Figur 6.4: Forsøk 2 ved løft

## Forsøk ved mekanisk nedbøyning

Ved forsøkene med mekanisk nedbøyning av rørets ende ble det fra Leica AT960 lasertrackeren og DAQ-enheten avlest de verdiene som er gjengitt i tabell 6.3 og tabell 6.4 for de to respektive forsøkene. Også her er nullpunkt satt lik det første avleste punktet for lasertrackeren.

Tabell 6.3: Avleste verdier for første forsøk

	Leica AT960				NI USB-6009	
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	U(95) [mm]	X [max/min]	Y [max/min]
1	0	0	0	0.005		
2	321.799	241.487	90.921	0.006		
3	-0.002	0.002	0.012	0.012	-0.03072	0.0854
					-0.03582	0.07264
4	-0.461	0.189	-1.082	0.005		
5	321.236	242.181	90.936	0.018		
6	-0.461	0.206	-1.081	0.024	-0.04092	1.22612
					-0.05879	1.21842
7	-0.549	0.165	-1.507	0.011		
8	321.212	242.213	90.932	0.012		
9	-0.548	0.165	-1.49	0.011	-0.0001	1.48139
					-0.01521	1.47619
10	-0.623	0.119	-1.875	0.004		
11	321.218	242.206	90.929	0.007		
12	-0.625	0.13	-1.875	0.011	0.02541	1.66248
					0.01011	1.65227
13	-0.686	0.084	-2.252	0.019		
14	321.271	242.132	90.925	0.011		
15	-0.695	0.081	-2.265	0.008	0.05348	1.81049
					0.05093	1.79773
16	-0.787	0.041	-2.689	0.004		
17	321.251	242.151	90.905	0.015		
18	-0.784	0.046	-2.693	0.011	0.10961	1.96364
					0.09431	1.94829
19	-0.83	0.01	-3.018	0.004		
20	321.218	242.186	90.929	0.011		
21	-0.842	0.016	-3.024	0.015	0.14278	1.96084
					0.14023	1.94063
22	-0.133	0.034	-0.438	0.009		
23	321.808	241.475	90.903	0.009		
24	-0.152	0.048	-0.433	0.009	-0.02832	0.07642
					-0.02954	0.06526

Tabell 6.4: Avleste verdier for andre forsøk

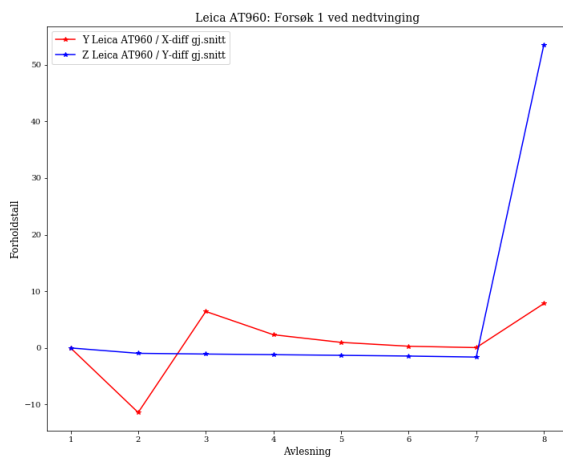
	Leica AT960				NI USB-6009	
	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	U(95) [mm]	X [max/min]	Y [max/min]
1	0	0	0	0.006		
2	321.903	241.514	91.339	0.013		
3	0.005	0.005	-0.013	0.011	-0.05368	0.21555
					-0.06644	0.20279
4	0.007	-0.108	-0.317	0.017		
5	321.984	241.412	91.317	0.006		
6	-0.029	-0.052	-0.294	0.005	-0.07154	0.65443
					-0.08941	0.64427
7	-0.105	-0.073	-0.613	0.01		
8	321.924	241.458	91.319	0.013		
9	-0.113	-0.077	-0.607	0.019	-0.09196	0.94029
					-0.09706	0.93518
10	-0.211	-0.077	-0.962	0.008		
11	321.88	241.515	91.308	0.01		
12	-0.24	-0.042	-0.965	0.019	-0.07665	1.16486
					-0.08685	1.15721
13	-0.292	-0.098	-1.317	0.019		
14	321.92	241.449	91.311	0.017		
15	-0.3	-0.104	-1.313	0.009	-0.04603	1.37156
					-0.05623	1.36616
16	-0.358	-0.149	-1.674	0.015		
17	321.906	241.477	91.311	0.015		
18	-0.352	-0.148	-1.672	0.006	-0.00101	1.56295
					-0.00775	1.54764
19	-0.395	-0.214	-2.05	0.013		
20	321.967	241.397	91.303	0.012		
21	-0.401	-0.218	-2.039	0.009	0.02796	1.72371
					0.02031	1.71607
22	-0.417	-0.304	-2.362	0.006		
23	322.078	241.235	91.282	0.008		
24	-0.422	-0.311	-2.341	0.016	0.06878	1.89471
					0.05858	1.87173
25	-0.313	-0.521	-2.598	0.014		
26	322.351	240.874	91.261	0.013		
27	-0.319	-0.525	-2.61	0.01	0.09172	1.98657
					0.08409	1.97891
28	0.134	-0.173	-0.026	0.009		
29	322.322	240.99	91.293	0.009		
30	0.132	-0.171	-0.038	0.015	-0.07154	0.20201
					-0.08175	0.19258



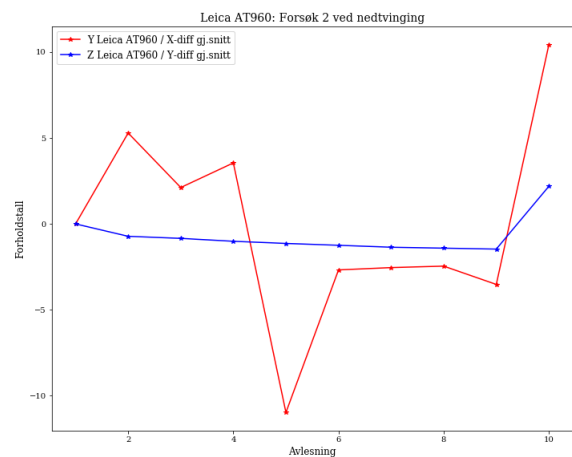
Her observerer man at ingen av X-, Y- og Z-koordinatene går tilbake til utgangspunktet etter avlastning, og det er det naturlig å anta at dette i hovedsak skyldes rotasjon av chucken. Det kan imidlertid også skyldes kreftene som er påsatt røret. Ved avlesning 19 og 21 i tabell 6.3 ser man at nedbøyningen på det meste er over tre mm, nesten seks ganger større enn forventet utbøyning ved en maskineringsoperasjon lik den i kapittel 4.1.

Resultatene sier som for forsøkene ved løft av emnets ende at det er vanskelig å kommentere noe om repeterbarheten av systemet. Forsøkene med mekanisk nedbøyning har derimot en rekke flere avlesninger grunnet en større utbøyning. Utbøyningen vil her være så stor at man ikke kan forvente en linearitet av avleste verdier fra posisjonssensoren da deler av lyset fra laseren risikerer å havne delvis utenfor sensorflaten ved de største utbøyningene.

I figur 6.5 og figur 6.6 er det angitt forholdstall mellom faktisk posisjonsendring angitt fra lasertrackeren, og avlest måleverdi for spenningen fra posisjonssensoren. I likhet med forsøkene med løft av rørets ende er det benyttet en gjennomsnittlig verdi av minimum og maksimumsverdiene i tabellene 6.3 og 6.4, og korrigert slik at utgangsverdiene er 0, og dermed burde forholdstallenes graf være tilnærmet lineær i et perfekt tilfelle for utbøyningen. Variasjonen i avleste verdier kan bidra til at verdien som regnes ut fører til et ikke-lineært resultat.



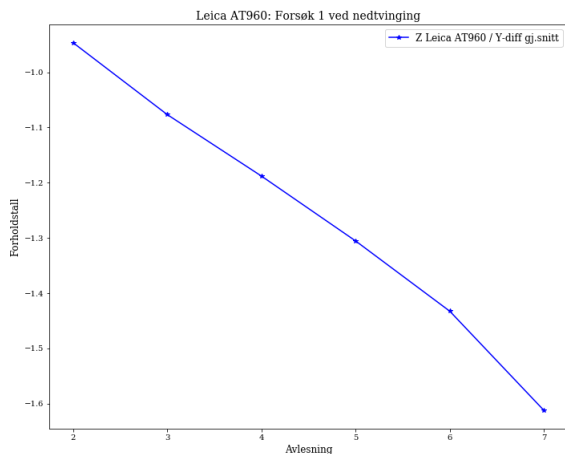
Figur 6.5: Forsøk 1 ved nedtvinging



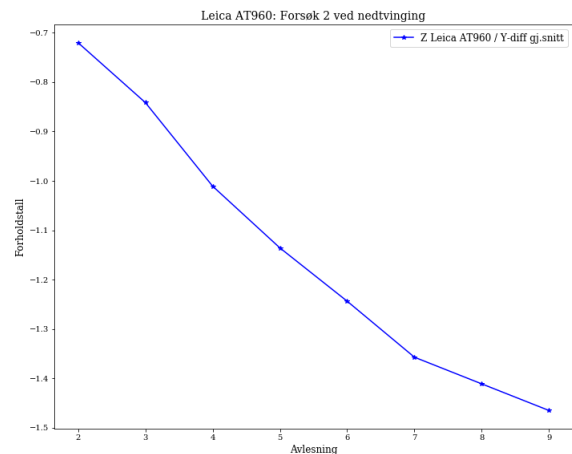
Figur 6.6: Forsøk 2 ved nedtvinging

Den røde grafen tilsvarer lasertrackerens Y-akse, og posisjonssensorens X-akse. På grunn av en i utgangspunktet lav eller ingen forflytning langs aksene i et perfekt tilfelle vil en liten påvirkning gi store utslag. En slik påvirkning kan være at det på de to strammemutterne ikke strammes identisk, og dermed vil røret kunne bøye seg noe ut sideveis. Ved menneskelig involvering og justering på en kvart omdreining per måling vil dette være omtrent uunngåelig. For lasertrackerens Z-akse og posisjonssensorens Y-akse, som er den aksene som indikerer utbøyningen, vil det være mulig å observere en forventet linearitet i målingene.

Figurene viser at man ikke oppnår initialtilstand ved avlastning. Dette skyldes trolig samme årsak som for ved forsøkene der enden av røret ble løftet. Det er derimot interessant å se på et plot hvor man fjerner den første og siste avlesningen fra forsøkene ved nedtvinging for å få et tydelig bilde på lineariteten i området, da den fra figurene 6.5 og 6.6 tilsynelatende virker å være svært lineær.



Figur 6.7: Forsøk 1 ved nedtvinging



Figur 6.8: Forsøk 2 ved nedtvinging

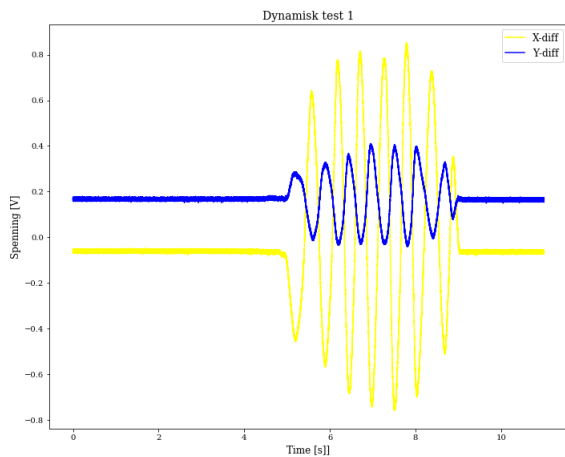
For fremstilling av figur 6.5-6.8 er den gjennomsnittlige avleste verdien korrigert ved et fratrukk av avlest gjennomsnittverdi fra sensorcellen i initialtilstand. Denne verdien er så dividert med avlest verdi fra lasertrackeren med utgangspunkt i at det første avleste punktet fra lasertrackeren har koordinatene (0,0,0). Ved hjelp av lineær regresjon og minste kvadraters metode kan lineariteten i de to forsøkene beskrives med en nøyaktighet på henholdsvis  $R^2=99.34\%$  og  $R^2=97.34\%$ .

Med utgangspunkt i rotasjon i chuck, begrenset kontroll på belastning og mulighet for skjevtrekk ved økende nedbøyning er det grunnlag for å mene at forsøkene viser en stor grad av samhandling mellom avleste verdier fra kvadrantsensoren og lasertrackeren. Nøyaktigheten kan forventes å være enda bedre dersom det blir produsert nye komponenter med svært høye toleranser for opplagring av både laser og sensor ved nye forsøk.

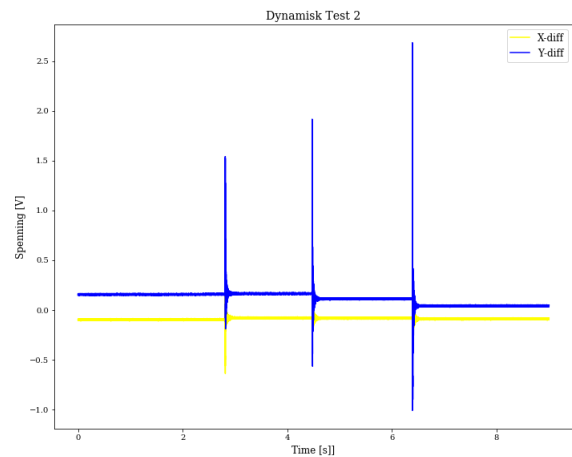
I forsøkene som ble gjennomført er det for mange usikkerhetsmomenter til å kommentere repetibarheten til systemet. Til tross for at å benytte seg av chuck som opplagring for den simulerte borstangen grunnet enkelhet i innfestning, og at det i kapittel 6.3 bli benyttet måledata for å kommentere maskinens stivhet, burde det ha blitt benyttet en innfestning i toppsleiden som minner mer om innfestningen til en borstang dersom det skulle blitt gjennomført flere forsøk. Det er funnet indikasjoner på at utstyret leverer høy grad av presisjon når det gjelder linearitet i måleresultatene, dersom initialbetingelsene bedres ytterligere før bruk av komponentene.

## 6.2 Dynamiske målinger i dreiebenk

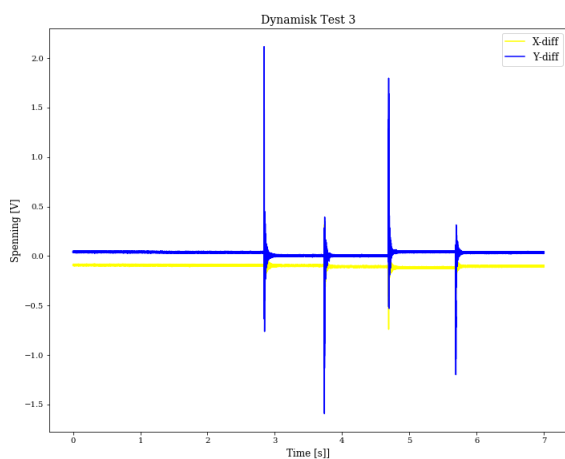
Det er tydelig ut fra de kontinuerlige fremstillingene i Python at både kvadrantsensor og DAQ-enhet var i stand til å oppdage utbøyningen, slik det fremgår av råmaterialet i figurene 6.9-6.12. Det er nødvendig å bryte ned dataene for å kunne si noe om hvor følsomt systemet er. Det er interessant å se på overgangen fra stillstand til påført slag, og tidsrommet fra slaget til vibrasjonene har avtatt.



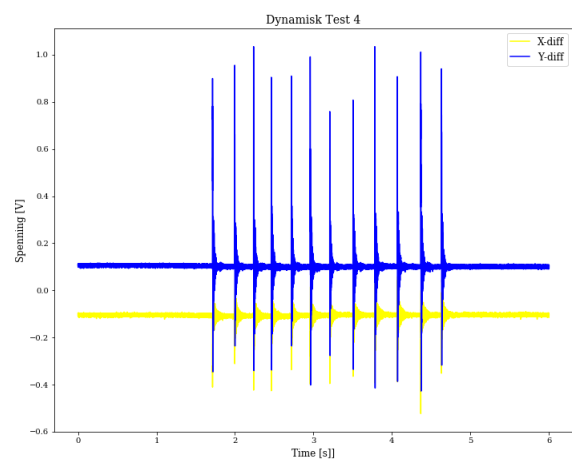
Figur 6.9: Forsøk 1 ved dynamisk belastning



Figur 6.10: Forsøk 2 ved dynamisk belastning, slag

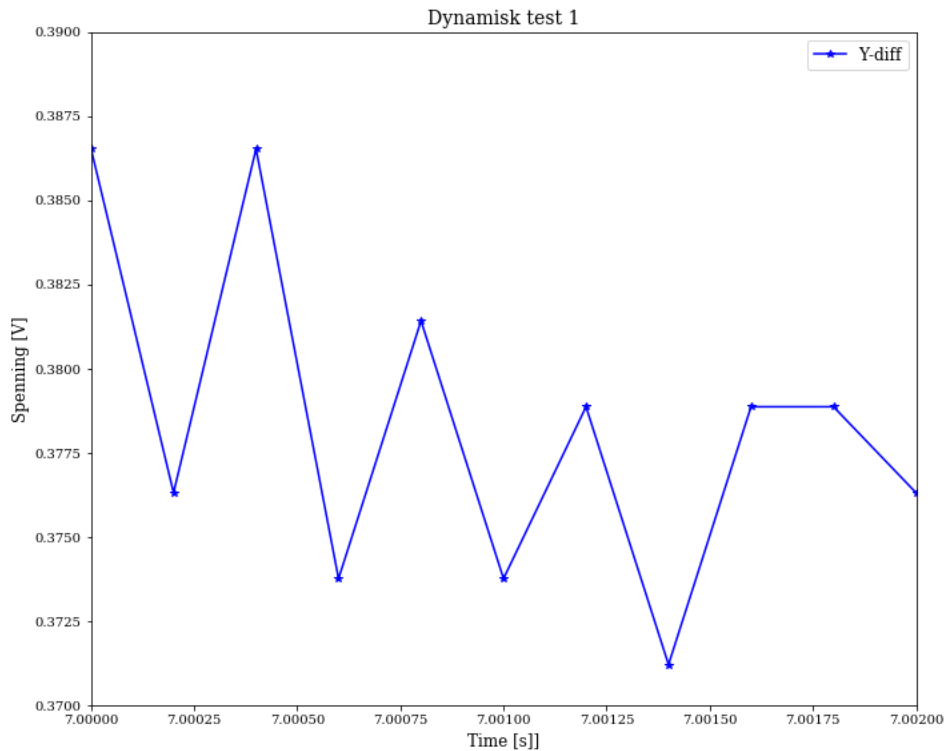


Figur 6.11: Forsøk 3 ved dynamisk belastning, slag



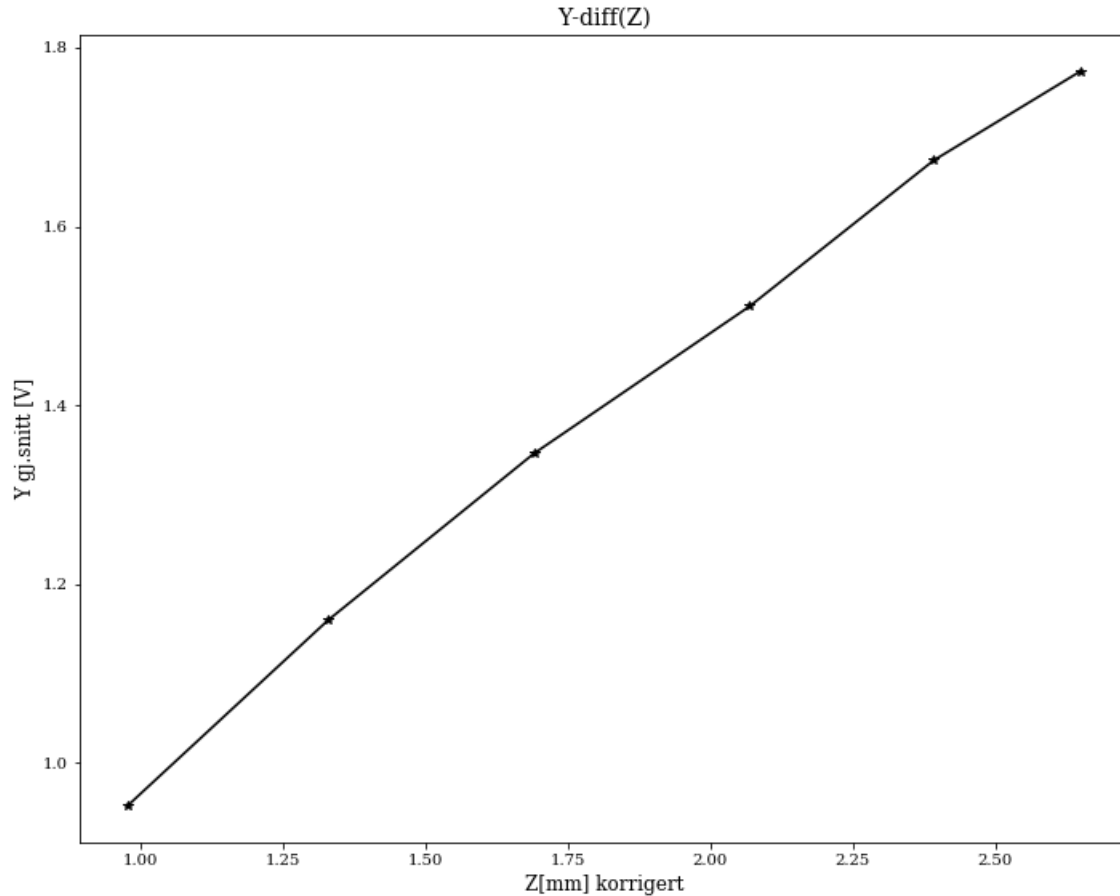
Figur 6.12: Forsøk 4 ved dynamisk belastning, slag

Ved en frekvens på 5000 Hz vil det for hver måling gå 0.0002 sekunder. Ved å studere dataene for det første dynamiske forsøket i figur 6.9 i tidsintervallet  $t = [7, 7.002]$ s får man plottet ti verdier for registrert utbøyning. Fra figur 6.13 ser man at verdiene varierer fra 0.371217V ved 7.0014s, til 0.378873V ved 7.0016s, altså en spenningsforskjell på 0.007656V. Etter 7.0004 sekunder kan man lese av 0.386529V, mens man ved 7.0006 sekunder kan lese av 0.373769V, noe som gir en spenningsforskjell på 0.01276V.



Figur 6.13: Forsøk 1 ved dynamisk belastning,  $t = [7, 7.002]$ s

Dersom man tar utgangspunkt i verdiene fra tabell 6.4, kan det settes opp et forhold mellom utbøyning og målt spenning for posisjonssensorens Y-akse. I figur 6.14 er det korrigert for forskjellen før og etter forflytning av reflektorkulen, slik at den utbøyningen man får oppgitt fra lasertrackeren er den forrige gitte utbøyning addert med høydeforskjellen mellom den første målingen etter justering, og den siste målingen før justering. Ved stabile målinger vil man da få en lineær graf som forteller noe om hvor mye spenningen som avgis fra posisjonssensoren øker for hver millimeter røret blir bøyd ut. Det er dette som blir illustrert i figur 6.14. I figuren er det benyttet verdier for en utbøyning mellom en og tre millimeter,



Figur 6.14: Målt spenning som en funksjon av faktisk utbøyning

hvor grafen er fremstilt av formelen;

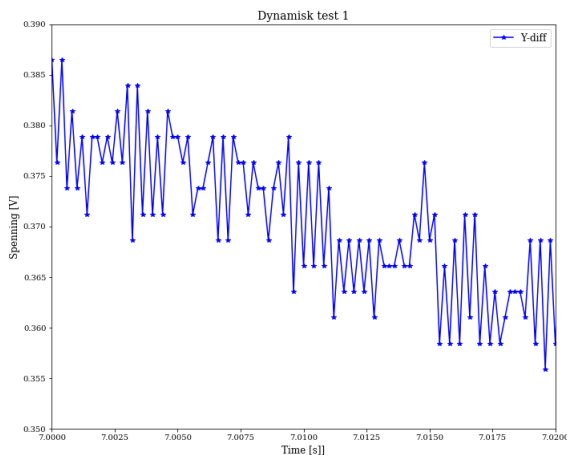
$$Y - \text{diff}(\Delta Z) = 0,4889x + 0,4974 \quad (6.1)$$

som har en  $R^2$ -verdi på 99.67%. +0,4974 kommer av at det her ikke er kalibrert for at laserpekeren ikke står i sentrum av posisjonssensor ved start av målingene, og er irrelevant for bruken av grafen. Stigningstallet forteller hvor mye spenningen posisjonssensoren gir fra seg for Y-diff ved en faktisk nedbøyning av røret, og dette benyttes for å få et tall på hvor mye målingene avviker mellom hver måling i figur 6.13.

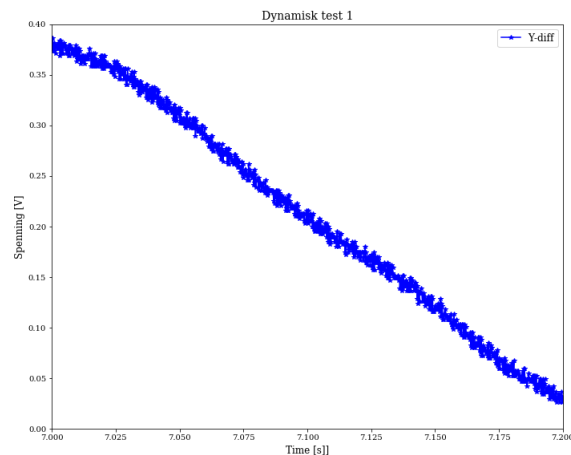
Spenningsforskjellen i tidsrommet 7.0014s til 7.0016s som lå på 0.007656V, tilsvarer en registrert forskjell i utbøyning på 0.0157 millimeter. Spenningsforskjellen i tidsrommet 7.0004s til 7.0006s som lå på 0.01276V, tilsvarer en registrert forskjell i utbøyning på 0.0261 millimeter. Den maksi-

male usikkerheten som lasertrackeren selv estimerte ved målingene ved det andre forsøket med tvungen nedbøyning lå på 0.019 millimeter, slik det står oppgitt i femte kolumne i tabell 6.4. Med andre ord kan så mye som 72.8% av den største variasjonen i de dynamiske målingene i det valgte utsnittet allerede være feil ved bruk av lasertrackeren. Dette forteller også at et system for overvåkning av utbøyning ved maskinering, bygd opp av laser og posisjonssensor, burde være godt nok for maskinering hvor toleransene ligger i området 20-30  $\mu\text{m}$ .

Spenningsforskjellene som er oppdaget mellom hver avlesning er av samme størrelsesorden som spenningsforskjellene i tabell 6.4 ved de statiske forsøkene. Det indikerer at de svigningene som finnes i figur 6.13 verken er vibrasjoner eller utbøyninger, men støy fra komponentene. Det er dermed nødvendig å se på et større antall avlesninger ved å øke tidsintervallet. I figur 6.15 er tidsintervallet fra figur 6.13 økt til  $t = [7, 7.02]$ , mens det i figur 6.16 er økt til  $t = [7, 7.2]$ .



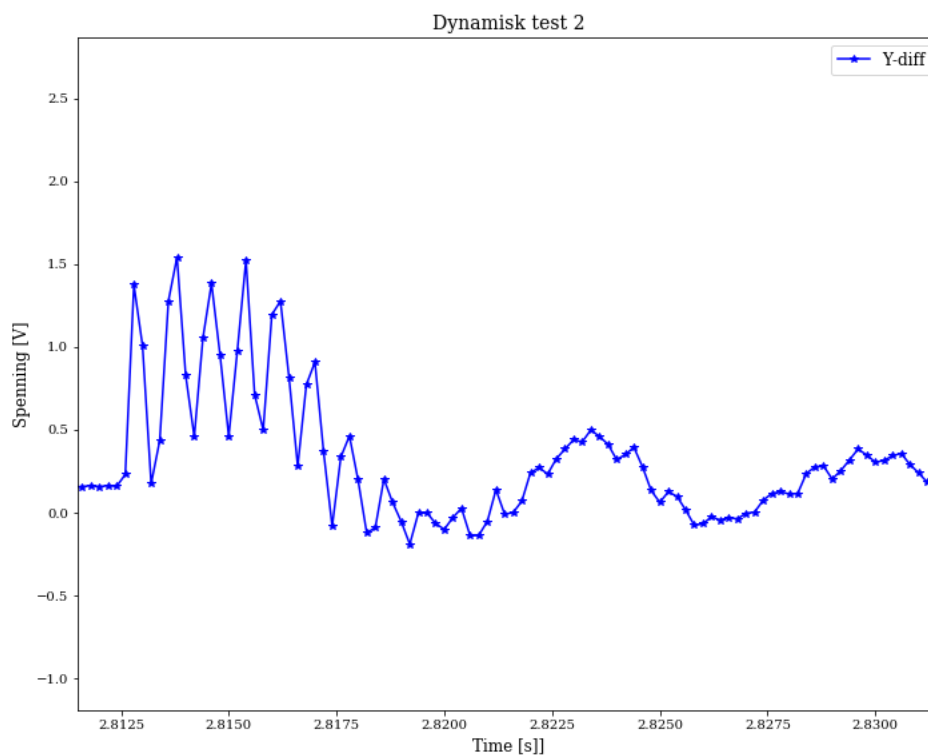
Figur 6.15: Forsøk 1, dynamisk



Figur 6.16: Forsøk 1, dynamisk

Også i disse figurene ligger forskjellen mellom maksimal og minimal spenning avlest i et gitt tidsintervall i samme størrelsesorden som støyen for systemet. Det er fortsatt grunnlag for å anta at systemet er godt nok for maskinering med toleranser i området 20 - 30  $\mu\text{m}$ . Det er viktig å legge til grunn at forsøkene er gjennomført med en enkel jigg for plassering av både laser og sensor, og dersom det ved dynamiske forsøk tilkommer med støy enn for statiske så er det nærliggende å anta at det kan skyldes innfestning. Det ble ikke funnet faktorer som tyder på dette ved å se på figur 6.16, men ved implementering og prøvekjøring ved en videreføring av konseptet kan det bli en problemstilling.

Ved å se på de dynamiske testene i figur 6.10-6.12 hvor det slås på enden av røret er det mulig å danne seg et bilde om sensoren og DAQ-enheten vil være i stand til å oppfatte og formidle høyfrekvente vibrasjoner til en eventuell styreenhet. Med høyfrekvente vibrasjoner menes vibrasjoner som kommer av slag som simulerer en maskineringsprosess, og ikke den typen dynamiske forsøk som det er sett på i figur 6.9 hvor frekvensen på utbøyningene var lavere. I figur 6.17 kommer det frem at en frekvens på 5000Hz ikke vil være godt nok for å kartlegge bevegelsene i tilstrekkelig grad, og at det går cirka 0.01 sekund fra slaget før det registreres nok målinger til å gi et kontinuerlig plot. Det er en spenningsforskjell opp mot 1.5V like etter slaget.



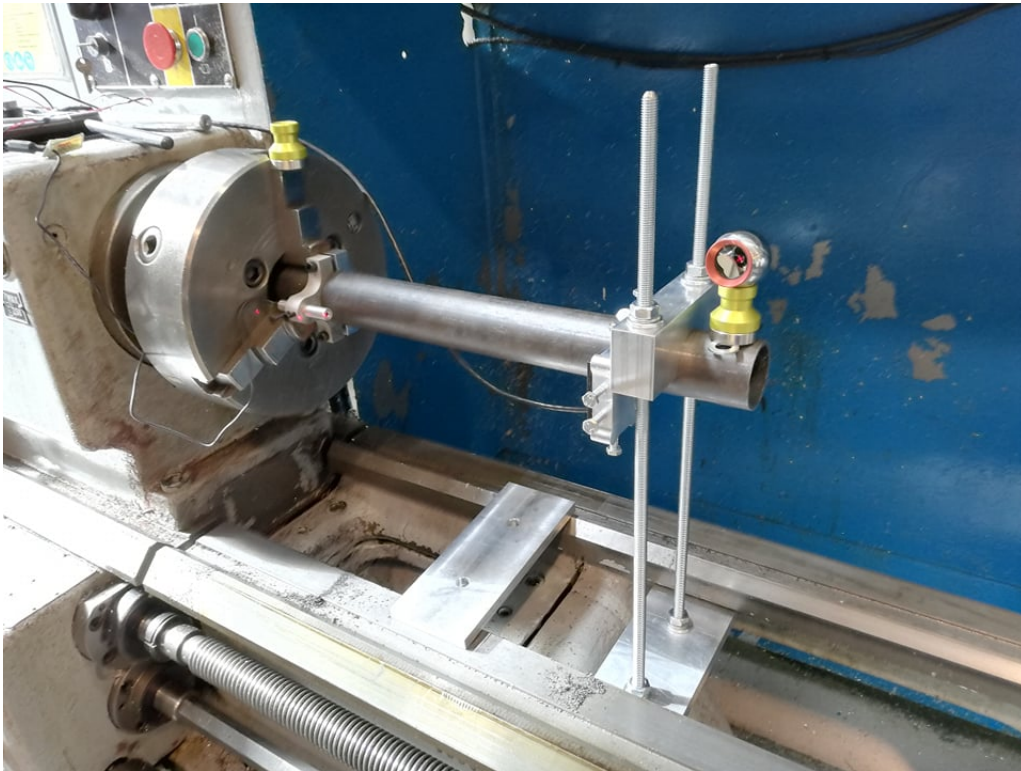
Figur 6.17: Forsøk 2, dynamisk

Med utgangspunkt i at man allerede ved 5000Hz ser konturene av spenningskurven i figur 6.17 vil en frekvens på opp mot 48000Hz være mer enn godt nok, som er den maksimale plottfrekvensen for denne enheten. Det vil ved videre praktiske forsøk ved høyfrekvente svingninger være svært viktig med en god innfestning av både laser og sensor for å unngå og komponentene har egne svingninger i forhold til borstangen.



### 6.3 Dreiebenkens påvirkning på resultatet

Det er ønskelig å vurdere stivheten i dreiebenken og om dette kan påvirke maskinert resultat. I de statiske forsøkene med mekanisk nedbøyning beskrevet i kapittel 3.3 ble det plassert en reflektorkule på oversiden til en av de tre bakkene i chucken, se figur 6.18. Disse målingene finnes i tabellene 6.3 og 6.4, som er de målingene som ble gjennomført ved forflytning av reflektorkule.



Figur 6.18: Plassering av sokler for reflektorkule

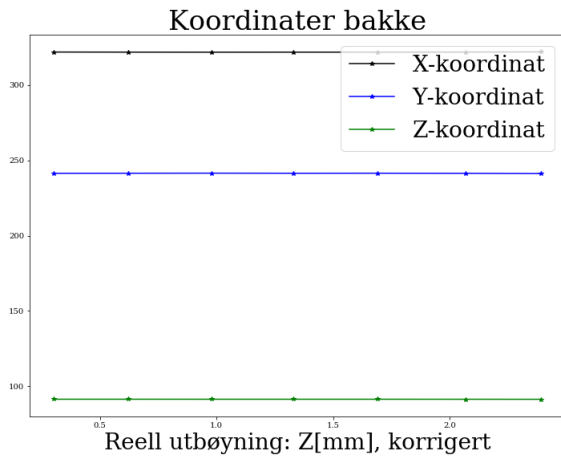
I tabell 6.5 er målingene ved reflektorkulen plassert på en av bakkene representert med faktisk utbøyning målt av lasertrackeren, og resultatene er fremstilt i figur 6.19-6.22. Dette er konstruert ved bruk av tall fra tabell 6.4, som er det forsøket med tvungen nedbøyning med flest målepunkter.

Tabell 6.5: Utvalgte verdier fra tabell 6.4

$Y_{avg}$	Z[mm] Reell/ Korrigert	Z[mm] målt	Avvik målt/reell	X-koordinat	Y-koordinat	Z-koordinat
0	0	0	0	321.903	241.514	91.339
0.44018	-0.304	-0.317	0.013	321.984	241.412	91.317
0.72857	-0.623	-0.613	-0.01	321.924	241.458	91.319
0.95187	-0.978	-0.962	-0.016	321.88	241.515	91.308
1.15969	-1.33	-1.317	-0.013	321.92	241.449	91.311
1.34613	-1.691	-1.674	-0.017	321.906	241.477	91.311
1.51072	-2.069	-2.05	-0.019	321.967	241.397	91.303
1.67405	-2.392	-2.362	-0.03	322.078	241.235	91.282
1.77357	-2.649	-2.598	-0.051	322.351	240.874	91.261

X, Y og Z-koordinatene følger formatet i figur 6.1. Hensikten med målingene hvor reflektorkulen plasseres på overkant av bakken slik som i figur 6.18 er å danne en oversikt om punkt 3 i oppgaveteksten i kapittel 1.2 delvis kan besvares. Ut fra dataene i tabellen observeres det et avvik ved at ingen av koordinatene er konstante fra måling til måling. I fjerde kolonne er det listet opp avvik mellom målt og reell utbøyning av enden til røret. Med reell er det som beskrevet i kapittel 6.2 i teksten under figur 6.13 tatt måling før og etter forflytning av reflektorkulen, for så å trekke fra eller legge til endringen i koordinat som følge av menneskelig unøyaktighet. Med målt gis verdien som ble avlest rett etter utbøyning for hver posisjon.

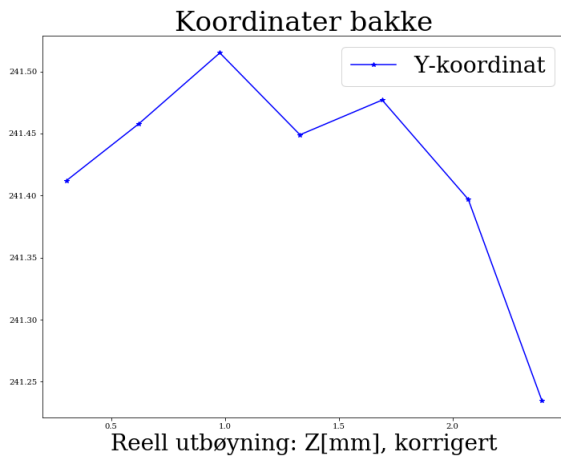
Den reelle og målte verdien kan ikke benyttes direkte for koordinatene på bakken, men det sier noe om hvor stor endring man kan forvente ved forflytning av reflektorkulen. Den største endringen i Z-koordinat har et avvik på 0.051 millimeter. Gjennomsnittlig endring ligger for målingene på cirka 0.021 millimeter, mens medianen ligger enda lavere. Det er nærliggende å tro at feilmarginen vil ligge i dette området ved forflytning av reflektorkulen for målingene ved bakken.



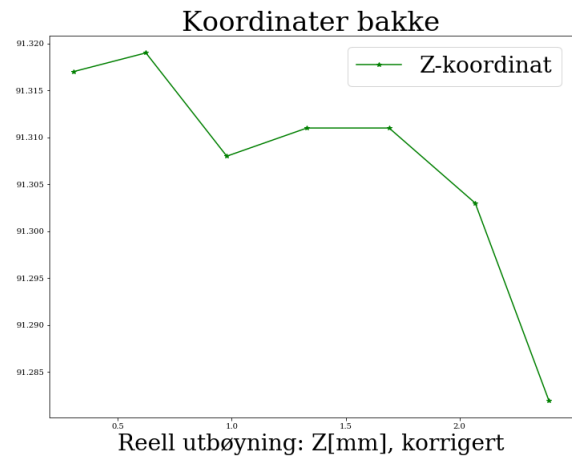
Figur 6.19: Bakkens posisjon ved utbøyning



Figur 6.20: Bakkens posisjon ved utbøyning



Figur 6.21: Bakkens posisjon ved utbøyning



Figur 6.22: Bakkens posisjon ved utbøyning

Fra tabell 6.5 er forskjellen på maksimal og minimal X-, Y- og Z-koordinat henholdsvis 0.448, 0.64 og 0.078 millimeter. Dersom man ser bort fra første og siste måling, som også er utelatt i figur 6.19-6.22, er forskjellene henholdsvis 0.094, 0.177 og 0.035 millimeter. Forskjellene er betydelig større enn lasertrackerens egne anslag for feilmargin i målingene. Forflytning i Y-aksen fra figur 6.1 viser at røret bøyes ut sideveis, og må betraktes som en feil. Det er antydning til symmetri mellom samtlige grafer, og derfor er det nærliggende å anta at samme feilkilde også forårsaker feil for X- og Z-aksen. Dette kan betraktes som et resultat av rotasjon, og dermed lar det seg ikke gjøre å kommentere stivheten ved opplagringen i chucken. Det er en naturlig forskjell i størrelsesorden mellom forflytning i X- og Z-aksen ved den type last som er påført, og dermed er det også nærliggende å anta opplagringen har slark som kan påvirke et maskinert resultat.

En nedbøyning på nærmere tre millimeter må kunne betegnes som både ekstrem og unaturlig slik det kommer frem av beregningene i kapittel 4.1. Det er ikke utenkelig at chucken og bakkene opplever en translasjon i Z-aksen lik 5-7  $\mu\text{m}$ , da den registrerte forflytningen på 35  $\mu\text{m}$  kommer av nedbøyning som er cirka seks ganger forventet nedbøyning.

## 6.4 Tester i Giana hos Sandvik Coromant

### 6.4.1 Testkjøring $X_g$ -akse

I tabell 6.6 finnes avleste verdier for forsøk 13, som var en testkjøring på 250 mm i positiv retning i  $X_g$ -aksen. Verdiene er korrigert med nullpunkt i posisjon 1. Disse verdiene benyttes i kapittel 4.3 for å definere forholdet mellom koordinatsystemet til lasertrackeren og Gianaen. Det er kun i det horisontale planet det er nødvendig med en rotasjon. I den vertikale aksens erstatter  $Y_g$ -aksen Z-aksen fra lasertrackeren.

Tabell 6.6: Forsøk 13, Testkjøring  $X_g$ -akse

Posisjon	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	U(95) [mm]	U(95) X [mm]	U(95) Y [mm]	U(95) Z [mm]
1	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.001
2	-167.023	186.017	3.663	0.002	0.001	0.001	0.001

Ved å benytte seg av tall fra tabell 6.6 er det i kapittel 4.3 gjort rede for at den kjørte distansen i  $X_g$ -aksen er målt til 249.998 mm. I Gianaen ble det innstilt en kjøring på 250 mm, dermed er det et avvik på 2  $\mu\text{m}$ , eller 0.00079%. Dette er et resultat som må anses å være lavt. Det er ikke gjort rede for om det ved innkjøring til posisjon 1 ved forsøk 13 i  $X_g$ -aksen ble gjort med en forflytning i negativ eller positiv retning, noe som kan påvirke resultatet.

Dersom operatøren som opererte maskinen ved forsøkene kjørte seg inn ved å kjøre i negativ  $X_g$ -retning, vil eventuell slark i sleiden og/eller mateskruen kunne bidra til unøyaktigheten som

er oppdaget. Derfor er det interessant å se på resultatene fra forsøk 11 som tar for seg nettopp dette. Forsøk 12, som var en kjøring i  $Z_g$ -akse for å oppdage slark, vil også kunne bidra med å besvare dette. Dersom operatøren kjørte seg inn til posisjon 1 ved å kjøre både  $X_g$ - og  $Z_g$ -akse vil slark i  $Z_g$ -aksen kunne påvirke resultatet.

Det er bemerkelsesverdig at det er en nivåforskjell på hele 3.663 mm i  $Z$ -/ $Y_g$ -aksen, altså vertikalt. Denne forskjellen burde maksimalt ligge innenfor feilmarginen som lasertrackeren selv oppgir med et 95% konfidensintervall. Nivåforskjellen kan betraktes som et bevis på at dreiebenken ikke er montert riktig, og at den har en helning som ved kjøring av  $X_g$ -sleiden. Likningene 6.2 og 6.3 beregner målte distanser hvor nivåforskjellen er den eneste variabelen.

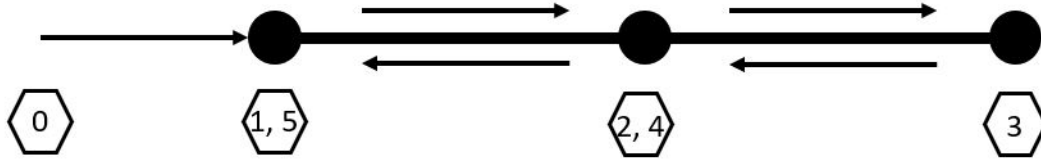
$$\Delta X_g = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^3} = \sqrt{(-167.023)^2 + 186.017^2 + 3.663^2} = 250.02485 \quad (6.2)$$

$$\Delta X_g = \sqrt{X^2 + Y^2} = \sqrt{(-167.023)^2 + 186.017^2} = 249.99801 \quad (6.3)$$

Likningene viser at dersom man tar høyde for den vertikale nivåforskjellen vil den målte distansen bli relativt mye lengre, og man får et avvik på 0.025 mm. Dette er langt utenfor feilmarginen estimert fra lasertrackeren, dermed er det lite trolig at avviket skyldes målingene.

#### 6.4.2 Sjekk av helning grunnet feilmontering

Måledataene for alle målingene i forsøk 1 til 13 inneholder et avvik i  $Z$ / $Y_g$ -aksen, slik det er beskrevet i forrige delkapittel. For forsøk 11 og 12 er avleste verdier rotert i henhold til rotasjonsmatrisen og nullpunkt satt i henhold til det første avleste målepunktet. Verdiene finnes i tabellene 6.7 og 6.8. Ved disse forsøkene er det kommunisert med operatøren at ved innkjøring til posisjon 1 i de respektive forsøkene, er sleiden kjørt i samme retning som det er kjørt for å komme til posisjon 2. Det er kjørt to lengder langs den aktuelle aksen. Etter den tredje avlesningen endres retningen, dermed vil en eventuell slark i mateskrue og sleide kunne oppdages. Se figur 6.23 for forklaring.



Figur 6.23: Kjøremønster forsøk 11 og 12

Tabell 6.7: Forsøk 11, Testkjøring  $X_g$ -akse

Posisjon	$X_g$ [mm]	$Y_g$ [mm]	$Z_g$ [mm]	U(95) [mm]*
1	0	0	0	0.002
2	-5,007	-0.075	-0.0028	0.003
3	-10.0001	-0.145	-0.0027	0.003
4	-5.001	-0.071	0.0043	0.002
5	-0.0015	0	0.0013	0.003

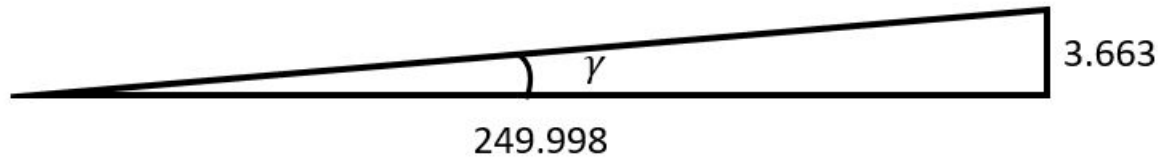
\*Kalkulert feilmargin gjelder før rotasjon

Tabell 6.8: Forsøk 12, Testkjøring  $Z_g$ -akse

Posisjon	$X_g$ [mm]	$Y_g$ [mm]	$Z_g$ [mm]	U(95) [mm]*
1	0	0	0	0.002
2	0.0018	-0.064	9.9961	0.001
3	0.0018	-0.124	19.9991	0.002
4	0.0016	-0.069	9.9868	0.003
5	-0.0022	-0.001	0.0006	0.002

\*Kalkulert feilmargin gjelder før rotasjon

Ved å benytte seg av verdiene fra forrige delkapittel vil man for forsøk 13 kunne beregne hvilken vinkel dreiebenken står feilmontert med med hensyn på  $X_g$ -aksen. Vinkelen finnes ved hjelp av skissen i figur 6.24 og likning 6.4.

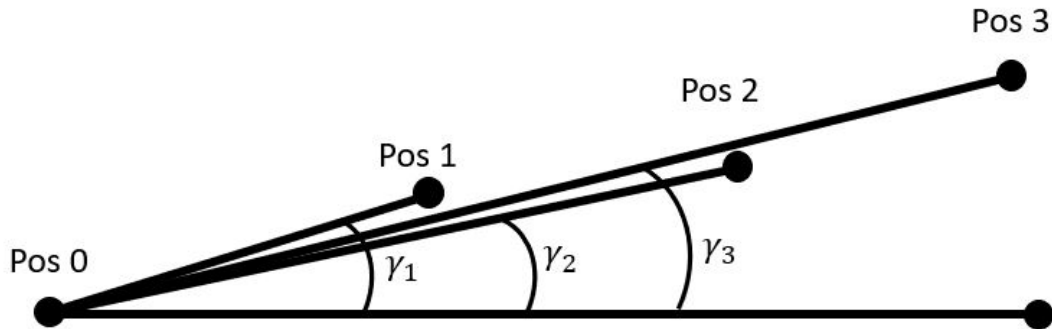


Figur 6.24: Observert helning i forsøk 13

$$\gamma_1 = \tan^{-1} \frac{3.663}{249.998} = 0.839444^\circ \quad (6.4)$$

Ved å benytte seg av verdiene fra forsøk 11 og 12 kan man gjøre flere beregninger for samme vinkel, samt. vinkelen som dreiebenken er feilmontert med i lengderetningen. Det er antatt at sleidene og selve dreiebenken er stiv nok over området som testene foregår i, slik at det dermed ikke er lokale vinkler som blir funnet. Over dreiebenkens totale lengde på flere meter, er det nærliggende å anta at det vil være større lokale forskjeller som ikke kan beskrives med måledata fra et mindre område.

For beregning av samme vinkel med større talldatabase beregnes vinkelen som oppstår under forflytningen fra posisjon 1 til den respektive posisjonen under hvert enkelt av de to forsøkene. Totalt danner dette grunnlaget for tre vinkler for hvert forsøk. Posisjon 5 benyttes ikke da avviket vil være mindre enn lasertrackerens feilmargin. I tillegg vil et så lavt tall under brøkstreken som beskriver forflytning, gi store utslag for vinkelen ved ubetydelige nivåforskjeller. Se figur 6.25 for forklaring, og tabell 6.9 for beregnede vinkler. Det er utregnet en gjennomsnittlig vinkel av disse som benyttes videre.  $\theta$  indikerer helningen som gir utslag ved kjøring i  $Z_g$ -aksen, og  $\gamma$  om helningen som gir utslag ved kjøring i  $X_g$ -aksen.



Figur 6.25: Visualisering av fremgangsmåte

Tabell 6.9: Forsøk 12, Beregnede vinkler

Forsøk	Vinkel	Startposisjon	Sluttposisjon	Helningsvinkel [°]
11	$\gamma_2$	1	2	$0.859355^\circ$
11	$\gamma_3$	1	3	$0.830813^\circ$
11	$\gamma_4$	1	4	$0.813458^\circ$
12	$\theta_2$	1	2	$-0.366840^\circ$
12	$\theta_3$	1	3	$-0.355252^\circ$
12	$\theta_4$	1	4	$-0.395865^\circ$ *
13	$\gamma_1$	0	1	$0.839444^\circ$
11 og 13	$\gamma_{snitt}$	-	-	$0.840768^\circ$
12	$\theta_{snitt}$	-	-	$-0.361046^\circ$

\*Avvik i målt  $Z_g$ -verdi 0.0132 mm, noe som er langt utenfor feilmarginen til lasertrackeren. Dermed er måleverdien å anse som uriktig og blir ikke benyttet ved utregning av gjennomsnittlig vinkel.

For å få et større nedslagsfelt langs dreiebenkens lengde benyttes også enkelte avleste verdier fra forsøk 4. Verdiene som finnes blir benyttet for å bedre danne seg et bilde av dreiebenkens helning og for å få en mer riktig verdi for faktisk posisjon. Det har ingen praktisk betydning hvorvidt vinkelen som benyttes samsvarer med virkeligheten, da det er den relative forskjellen mellom en faktisk maskineringsprosess og tomgangskjøring som danner grunnlaget for data som benyttes for å finne faktisk påvirkning. Det vil derimot være mer tydelig ved sammenligning av data dersom vinkelen som benyttes i større grad samsvarer med faktisk vinkel. I tabell 6.10 finnes avlesningene fra forsøk 4 som benyttes.



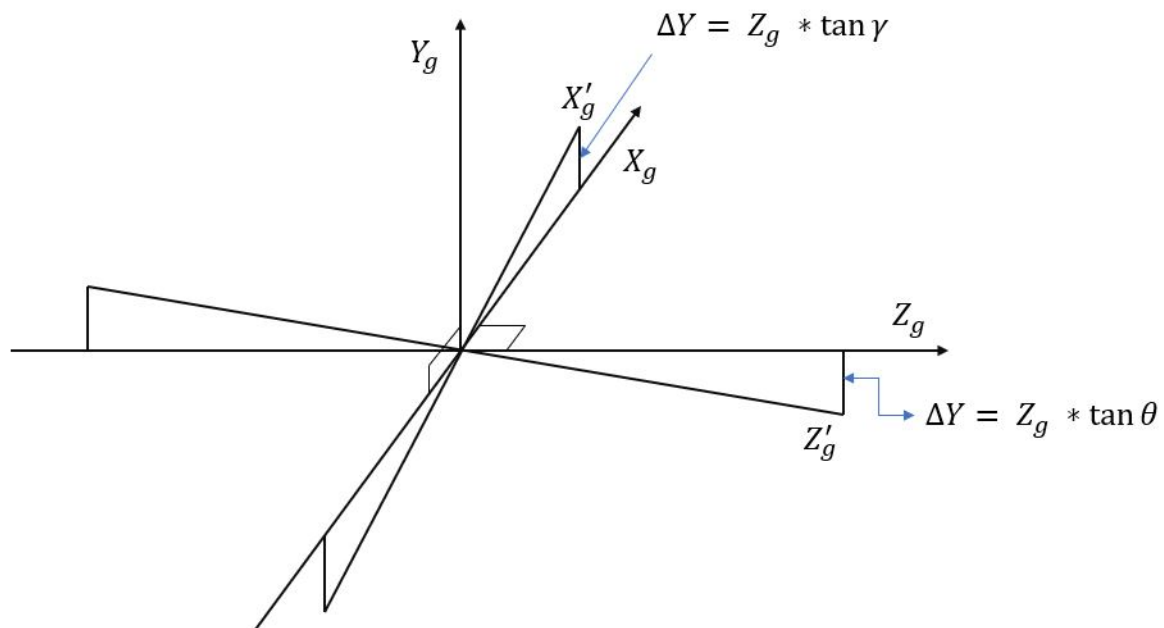
Tabell 6.10: Forsøk 4, Vilka'rlige punkter

Pkt.	$X_g$	$Z_g$
1	0.081	-19.818366
2	0.074	-18.7502283
3	0.065	-17.680772
4	-0.533	78.900122
5	-0.536	79.9691985

Tabell 6.11: Forsøk 4, Beregnede vinkler

Pkt.	Helningsvinkel $\theta$ [°]
1, 4	0.35635832°
1, 5	0.35426307°
2, 4	0.35614916°
2, 5	0.35403350°
3, 4	0.35416057°
3, 5	0.35204351°
$\theta_{snitt}$	0.35450135°

Ved kjøring i positiv  $Z_g$ -retning er det dermed identifisert en helning ned, og ved kjøring i positiv  $X_g$ -retning er det identifisert en helning opp. Se figur 6.26. Fra operatørens stilling vil dermed dreiebenkens høyeste punkt ligge bak til venstre, og det laveste frem til høyre. Dette gjelder for det området testene foregår i. I figur 6.26 er det faktiske koordinatsystemet til Gianaen tegnet inn sammen med det teoretiske, hvor det faktiske koordinatsystemet er merket.



Figur 6.26: Helning på Giana

### 6.4.3 Sjekk av slark i sleider og mateskruer

Hvis det er slark i sleiden som tilsvarer 0.1 mm, vil en kjøring fra posisjon 2 til 3 gi et utslag på 10 eller 5 mm, avhengig av lengden det kjøres. Fra posisjon 3 til 4 vil derimot det målte utslaget være på henholdsvis 9.9 eller 4.9 mm, med bakgrunn i at det kjøres tilbake mot retningen sleiden kom fra. Se figur 6.23

Fra tabellene 6.7 og 6.8 kan man se at det er avvik ved samtlige koordinater ved samtlige posisjoner, med unntak av den vertikale aksens ved kjøring av  $X_g$ -aksen. At  $Y_g$ -aksen avviker fra 0 ved forsøkene er ikke nødvendigvis grunnet slark i sleidene, da det er antatt at dreiebenken er montert med en helning slik det er beskrevet i forrige delkapittel. Det vil derimot i et perfekt tilfelle være samme avleste verdi for  $Y_g$  ved posisjon 1 og 5, og posisjon 2 og 4 ved forsøkene. Det er det ikke, dermed er det et avvik også her.

De avvikene som registreres er av relativt lave verdier, og stort sett lavere enn lasertrackerens feilmargin. Derfor vil det ikke være grunnlag for å konkludere med at avviket skyldes slark i sleidene. Det er i forsøk 12 registrert et avvik på 13.2  $\mu\text{m}$  i posisjon 4 som det høyeste. Dette i  $Z_g$ -aksen. Det er også registrert et avvik på 3.9  $\mu\text{m}$  i samme forsøk ved posisjon 2 for  $Z_g$ -aksen. I samme forsøk er det i kjøringen fra posisjon 4 til posisjon 5 en endring på 3.8  $\mu\text{m}$  i  $X_g$ -aksen, men avviket fra forventet posisjon og målt posisjon ligger maksimalt på 2.2  $\mu\text{m}$ . Til sammenligning oppgir lasertrackeren en usikkerhet på henholdsvis 2  $\mu\text{m}$  og 3  $\mu\text{m}$  ved målingene i posisjon 4 og 5 i forsøk 12.

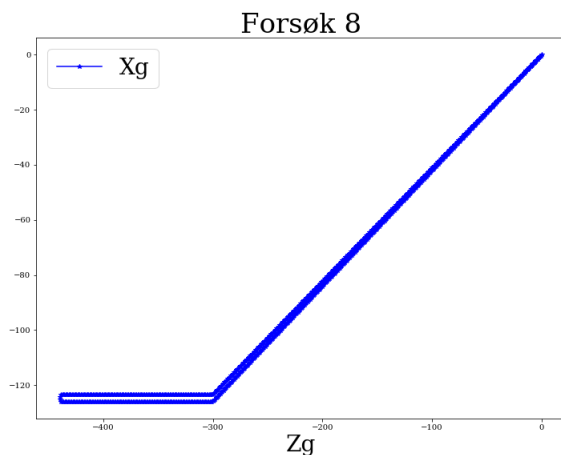
Det kan konkluderes med at det ikke er nevneverdig slark i sleidene som lar seg fange opp av lasertrackeren. Det er dermed akseptabelt å gå videre med verdiene som er avlest fra tomgangskjøring og maskinering ved samme posisjon for å se om det er grunnlag til å gjennomføre enda flere målingen i Gianaen med større borstang. Avviket for posisjon 4 på forsøk 12 ligger utenfor et 95% konfidensintervall og dermed vil måleverdien typisk fjernes.

#### 6.4.4 Maskinerings påvirkning på toppsleiden

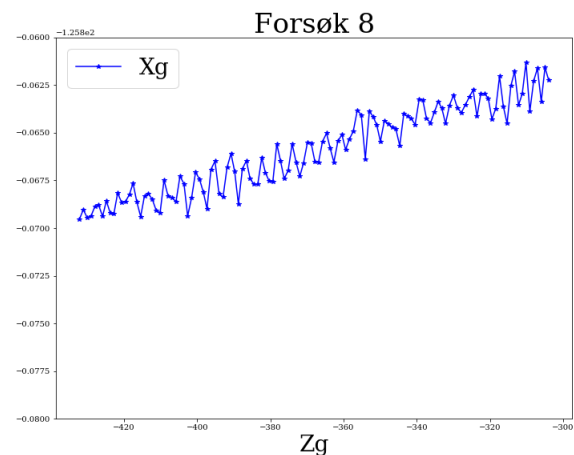
I forsøk 1-10 ble det gjennomført en ulike kjøring, både med og uten fjerning av materiale. Det er ingen tvil om at mangel på et konsekvent kjøremønster påvirker resultatene. Tillegg B representerer fremstillingen av de faktiske kjøremønstrene sett ovenfra. Forsøk 3 og 10 blir neglisjert i vurderingen da kjøremønstrene avviker fra hva som er hensiktsmessig for å kunne foreta en vurdering. I forsøk 1 og 2 er innkjøringen annerledes, slik det fremgår av tillegg B. Forsøkene foregitt uten fjerning av materiale og derfor også et godt stykke utenfor chucken og området for de andre forsøkene. Det er korrigert for helningen funnet i kapittel 6.4.2 ved bruk av gjennomsnittsverdiene for de respektive vinklene funnet i tabell 6.9 og 6.11. Ved vurdering er det kun tatt hensyn til det området av kjørebanelen hvor skjærebittsen enten er i inngrep, eller ved kjøring hvor det simuleres ett inngrep. Dette tilsvarer de områdene på fremstillingen i tillegg B hvor  $X_g$ -verdien er konstant, og i de tilfeller hvor det er to slike området benyttes det med lavest verdi.

#### $X_g$ -aksen

Det er korrigert ytterligere for vinkelendring mellom lasertrackeren og dreiebenkens koordinatssystem ved å se på den konstante endringen for  $X_g$  som følger av en bevegelse i  $Z_g$ -aksen over det hensyntatte området. Med reflektorkulen i posisjon 3 bak på toppsleiden på dreiebenken, som er det antatt mest stabile målepunktet kan figur 6.27 plottes for hele kjøremønsteret, og figur 6.28 for området som er hensyntatt ved vurdering. Dette området har en oppløsning på 0.02 mm, og cirka halvparten av intervallet benyttes.



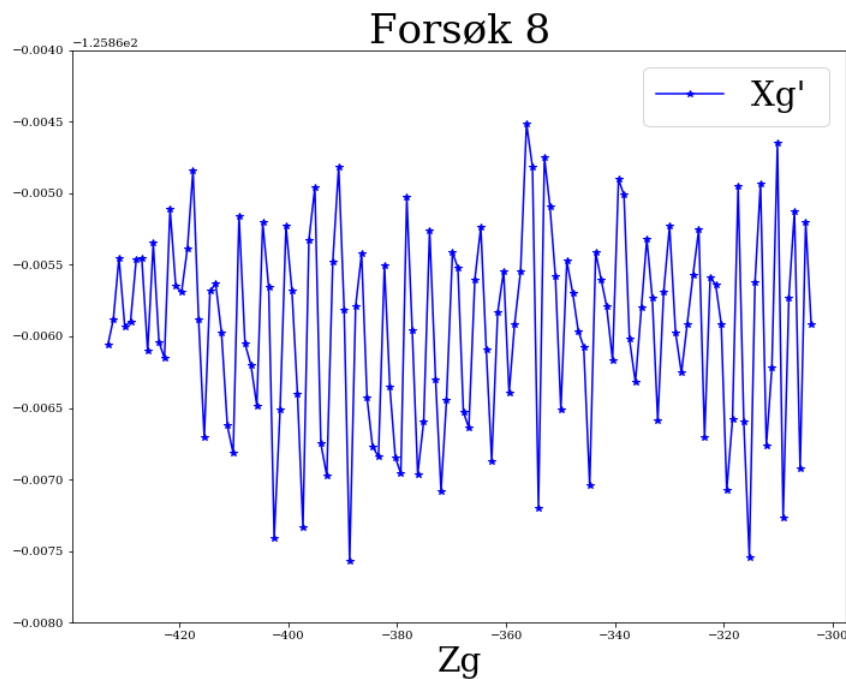
Figur 6.27: Forsøk 8



Figur 6.28: Forsøk 8

Slik det går frem av figurene er det ved rotasjon av matrisen dannet av likningene 4.7 og 4.8 en liten unøyaktighet å korrigere for. Formel brukt for korrigering av måledata til grafen i figur 6.28 er beskrevet nedenfor, der  $\Delta Z$  er avstandsforskjellen mellom gjeldende punkt og utvalgrommets gjennomsnittlige punkt som ligger ved  $Z = -368.385023$ . I figur 6.29 er det korrigert for unøyaktigheten. I forsøk 9 er resultatene svært lik resultatene for forsøk 8, se tillegg B.

$$X_g' = X_g - \Delta Z * 5.712^{-5} \quad (6.5)$$



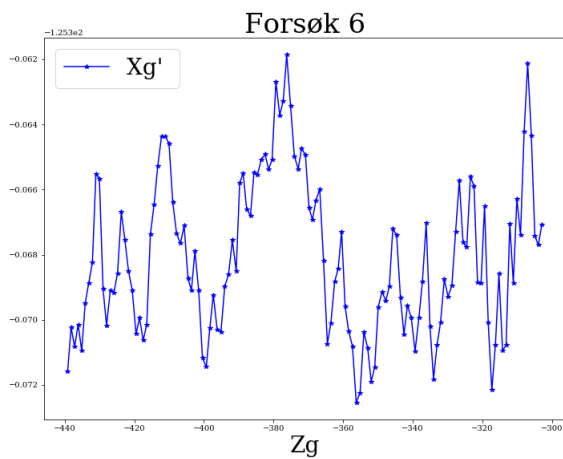
Figur 6.29: Forsøk 8,  $X_g$  korrigert

Oppløsningen på figuren er  $4 \mu\text{m}$ , hvor cirka  $3 \mu\text{m}$  av intervallet benyttes. Det er ikke mulig å bekrefte at den bakre delen av toppsleiden på dreiebenken påvirkes av maskineringsprosessen, siden utslaget ligger innenfor konfidensintervallet til lasertrackeren. En nærliggende antagelse vil være at den bakre delen av toppsleiden ikke påvirkes. Dersom sleiden som går i  $X_g$ -aksen på dreiebenken ligger vertikalt ned fra posisjon 3 for reflektorkulen, benyttet i forsøk 8, vil ikke en utbøyning eller påvirkning i  $X_g$ -aksen på enden av borstangen kunne blitt observert. I figur 6.30 kan man imidlertid se at dette ikke er tilfelle, og at sleiden ligger under posisjon 2 for reflektorkulen. Dermed er det nærliggende å anta at dreiebenken har stor grad av stivhet ved opplagringen.

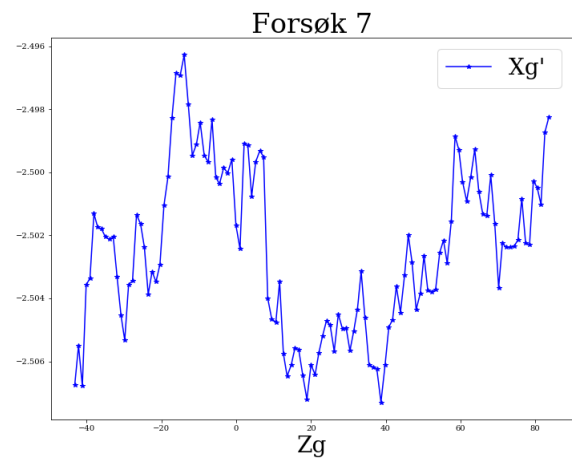


Figur 6.30: Sleide for  $X_g$ -akse under posisjon 2 for reflektorkule

I forsøk 6 og 7, hvor det kjøres et kutt og en frikjøring, er det observert større utslag for  $X_g$ -verdier ved kjøring i  $Z_g$ -aksen. Ved disse forsøkene er reflektorkulen plassert i posisjon 2. For området som er hensyntatt ved vurdering er det etter en korrigering tilsvarende korreksjonen fra figur 6.28 til figur 6.29 fremstilt følgende figurer;



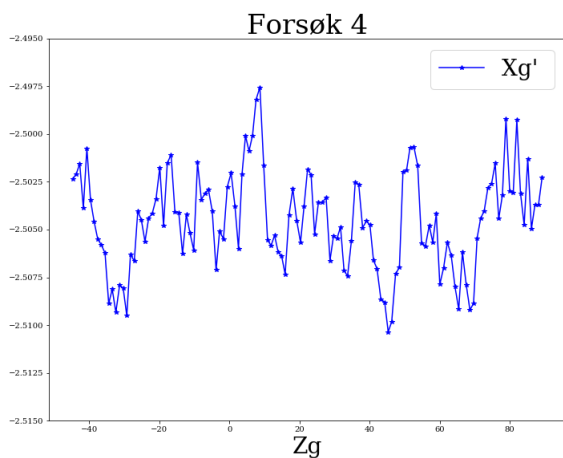
Figur 6.31: Forsøk 6,  $X_g$  korrigert



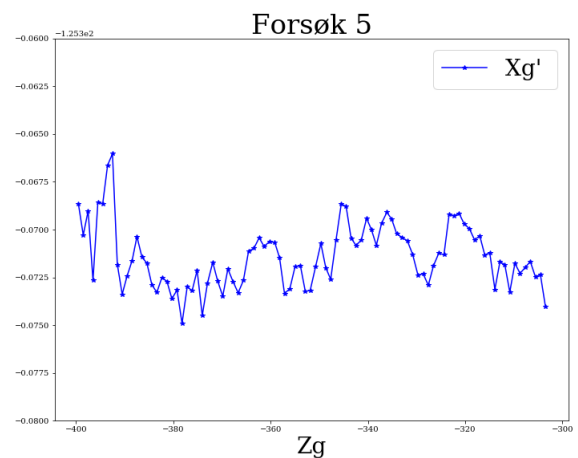
Figur 6.32: Forsøk 7,  $X_g$  korrigert

Oppløsningen på figur 6.31 og figur 6.32 er 0.01 mm. Dermed er det over tre ganger så stor variasjon mellom den høyeste og laveste verdien for  $X_g'$  når reflektorkulen er plassert i posisjon 2, sammenlignet med forsøkene hvor kulen er plassert i posisjon 3.

For figur B.11 til B.18 i tillegg B er oppløsningen på samtlige y-akser for  $X_g$ -verdier lik 0.02 mm. Plot for forsøk 1, 2 og 4 er relativt lik og dermed vil kun forsøk 4 bli benyttet for videre vurdering. I forsøk 4 og 5 er tilnærmet samme kjørebane benyttet, og den eneste forskjellen er at i forsøk 5 så foretas det et kutt. Ved å gjennomføre samme prosess for måledataene i det hensyntatte området for forsøk 4 og 5, som det er gjennomført ved plassering av reflektorkulen både i posisjon 2 og 3, kan følgende figurer fremstilles.



Figur 6.33: Forsøk 4,  $X_g$  korrigert



Figur 6.34: Forsøk 5,  $X_g$  korrigert

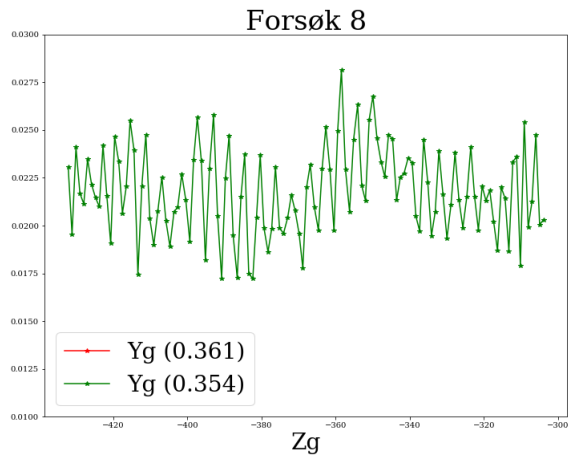
Resultatene viser at det for forsøkene ved reflektorkulen i posisjon 3 er størst stabilitet med tanke på bevegelse i  $X_g$ -aksen i dreiebenken. Oppløsningen i figur 6.33 og 6.34 er 0.02 mm. Den bevegelsen som lar seg fange opp av lasertrackeren ligger da i samme størrelsesorden feilmarginen på utstyret. Det er ikke gjennomført nok forsøk ved reflektorkulen i posisjon 1 til å konkludere med at maskinens stivhet vil være utslagsgivende for maskineringsresultatet. Ut fra måledata som foreligger vil det være nærliggende å anta at en eventuell mangel på stivhet i maskinen kan neglisjeres med tanke på maskinert resultat, da vibrasjoner og utbøyninger på borstang og annen type verktøy overdøver denne.

Felles for  $X_g$ -plottene ved de tre ulike plasseringene for reflektorkulen er at det ikke er bestemte utbøyninger, men svigninger. Svigningene er av en størrelsesorden som indikerer vibrasjoner ut fra hvilken posisjon reflektorkulen er plassert på. Ved posisjon 3 var utslaget cirka en tredjedel av utslaget ved plassering i posisjon 2. Dette tyder på at det trolig er vibrasjoner ved kjøring som står for utslagene i måledataene, og ikke utbøyning. Det indikerer også at det ikke er manglende stivhet i dreiebenken som står i veien for maskineringsprosesser med ekstremt fine toleransekrav.

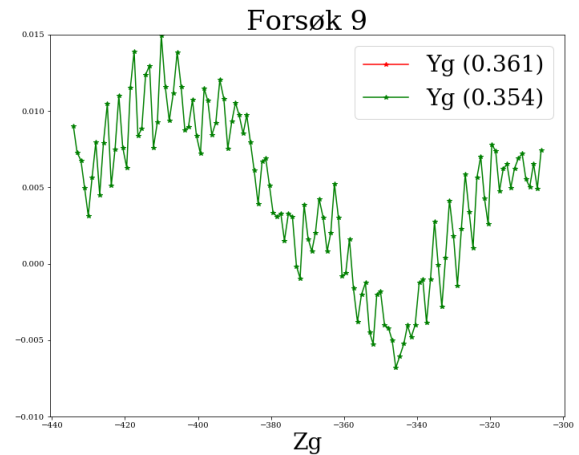
### **$Y_g$ -aksen**

Det er for samtlige kjøring observert en større vandring mellom minste og høyeste avleste verdi for  $Y_g$  sett opp mot  $X_g$ -verdier. I figur 6.30 visualiseres det at sleiden for  $X_g$ -aksen ligger omtrent like under posisjon 2 for reflektorkulen. Ved en vertikal belastning i enden av borstangen vil dette punktet fungere som en leddet opplagring gitt at det er noe slakk i sleiden. Det vil nødvendigvis være noe, men ikke nevneverdig mye, for å kunne kjøre sleiden. En naturlig konsekvens av dette ville vært at utslagene i forsøk 6 og 7, hvor reflektorkulen er i posisjon 2, ville vært de laveste.

Ved sammenligning av resultatene fra kjøring 8 og 9 kommer det frem at maskinering produserer en del støy også ved posisjon 3 for reflektorkulen. Oppløsningen på figur 6.35 og figur 6.36 er henholdsvis 0.02 og 0.025 mm i y-aksen. I figurene er det for vinkel  $\theta$  benyttet helningsvinkel fra tabell 6.11. For forsøk 8 er verdiene stort sett stabile, og plottet holder seg innenfor intervallet  $Y_g = [0.0175, 0.0275]$  mm. Amplituden er 5.5  $\mu\text{m}$ , noe som ikke er langt fra lasertrackerens nøyaktighet. Til sammenligning er amplituden i figur 6.36 på 0.0109 mm. I begge forsøkene er det hensyntatte området i intervallet  $Z = [-430, -300]$ . Utslagene i grafen er derfor relativt små sammenlignet med distansen toppsleiden har kjørt. Det er ingen tvil om at det er maskineringsprosessen som fører til svigningene, men det kan ikke konkluderes med at det er utpregede utbøyninger som kommer som en følge av disse. Ved å studere lokale områder for forsøk 9 i figur 6.36 vil amplituden være relativt lik amplituden i forsøk 8. Det kan tenkes at ved en konstant vertikal kraft på borstangen, følger resten av toppsleiden eventuelle ujevnheter i sleiden og at det er dette som kommer frem av figuren.



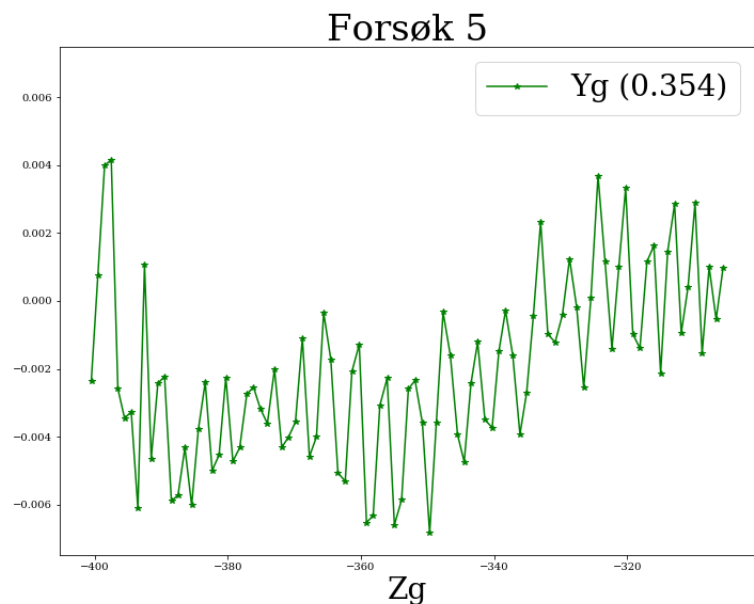
Figur 6.35: Forsøk 8, frikjøring



Figur 6.36: Forsøk 9, kutt

Ved plassering av reflektorkulen i posisjon 2, er måleresultatene motstridende. Her er de største variasjonene funnet i forsøk 7, som er frikjøring. I motsetning til forsøkene med reflektorkulen plassert i posisjon 3, hvor testområdet lå i området  $Z = [-440, -300]$ , ligger testområdet for forsøk 7 i området  $Z = [-44, 84]$ . Testområdet for forsøk 6 er det samme som for forsøk 8 og 9. Lokale forskjeller på dreiebenkens sleider kan dermed påvirke resultatet. I figur B.16 er intervallet for y-aksen lik 0.04 mm, noe som kan betraktes som mye.

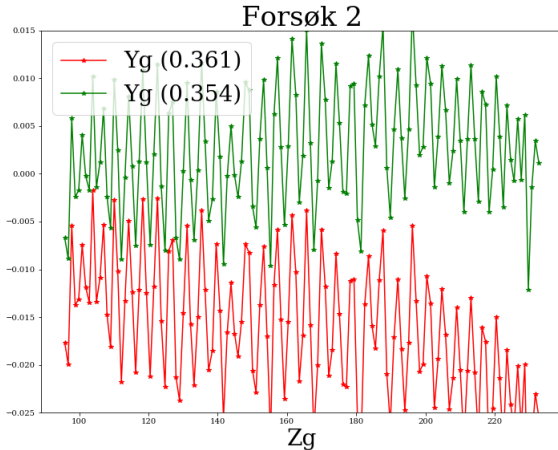
Måledata fra maskineringen i forsøk 5 viser at det er svært liten bevegelse i enden av borstangen. Ved en konstant belastning på borstangen holdes en eventuell utbøyning som kommer av skjærkreftene konstant, mens det ved frikjøring ikke er noen kraft som holder borstangen nede og dermed tillater disse vibrasjonene. I figur 6.37 er det for forsøk 5 plottet bevegelsene på  $Y_g$ -aksen ved kutt. Skaleringen i figuren ligger på 1.5  $\mu\text{m}$ , som er ekvivalent med pre-



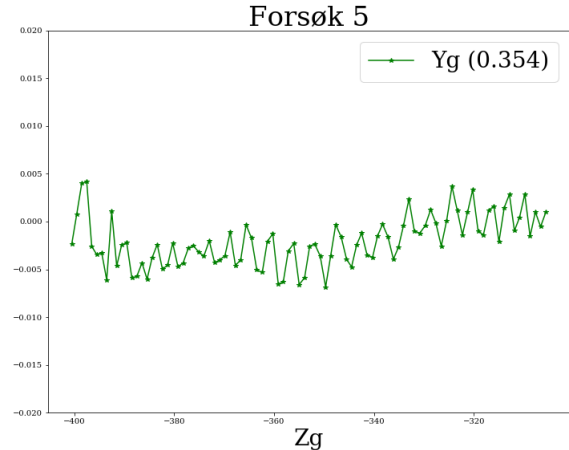
Figur 6.37: Forsøk 5, kutt



sisjonen på lasertrackeren. Til sammenligning er skaleringen i figur 6.38 og 6.39 begge lik 0.04 mm. Derfor er det ikke mulig å konkludere med at bevegelsene som er observert er faktiske bevegelser, eller unøyakighet i målingen fra lasertrackeren.



Figur 6.38: Forsøk 2, frikjøring



Figur 6.39: Forsøk 5, kutt

## 6.5 Test av NI USB-6009

Måledataene fra testen tilsier at det kan komme støy av DAQ-enheten. Av de 70 000 avlesningene ble det funnet totalt ni ulike spenninger, opplistet i tabell 6.12. Dersom man neglisjerer den høyeste og laveste verdien, som forekommer svært sjeldent, gir DAQ-enheten en usikkerhet i avlesningene på 0.0015311V. Med utgangspunkt i likning 6.1 tilsvarer dette 0.75  $\mu\text{m}$ , noe som gir grunnlag for maskineringsresultat godt innenfor de aller fleste toleransekrav, til tross for at systemet er tenkt til maskineringsprosesser for komponenter med toleransekrav utenfor det vanlige.

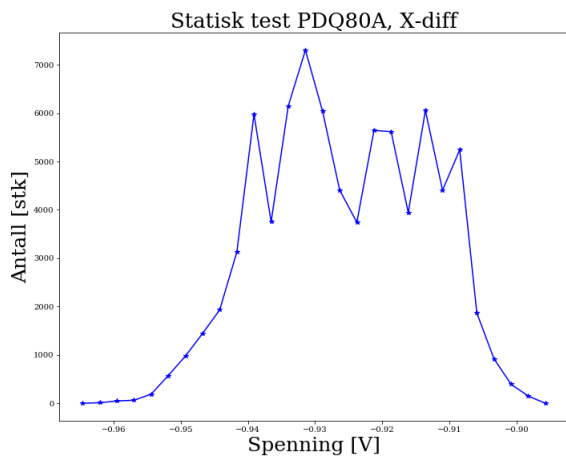
Tabell 6.12: Avleste spenninger NI USB-6009

Verdi [V]	Antall [stk]	Andel [%]
-0.011567	5	0.01
-0.009015	8781	12.55
-0.006463	8536	12.19
-0.003911	3018	4.31
-0.001359	26246	37.49
0.001193	6427	9.18
0.003745	8965	12.81
0.006296	7972	11.39
0.008848	50	0.07

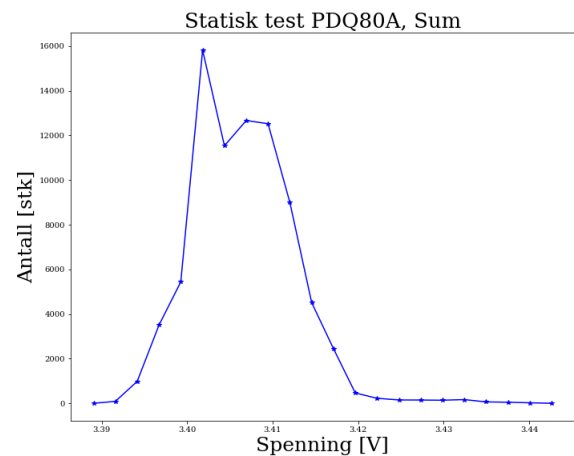
## 6.6 Test av sensorer

### PDQ80A

For PDQ80A-sensoren ligger målte verdier i intervallet fra  $-0.964607\text{V}$  til  $-0.895714\text{V}$ , som tilsvarer en differanse på  $0.068894\text{V}$ . Dersom man ser bort fra de verdiene som forekommer mindre enn i 1% av avlesningene, vil målingene variere fra  $-0.949297\text{V}$  og  $-0.903368\text{V}$ , noe som gir en differanse på  $0.045929\text{V}$ . Differansen i spenning vil derfor for sensoren være 30 ganger høyere enn differansen for DAQ-enheten, og tilsvarende målt utbøyning vil variere med  $0.0225\text{mm}$  i henhold til likning 6.1. Fordelingen av de avleste spenningene finnes i figur 6.40, som viser at de fleste avlesningene ligger i området fra  $-0.94\text{V}$  til  $-0.908\text{V}$ . I dette området vil målt utbøyning variere med  $0.016\text{mm}$ . Det er derfor ved bruk av PDQ80A-sensoren mulig å legge inn i software en begrensning som tillater å maskinere med en presisjon på  $0.016\text{mm}$ . Det er totalt avlest 28 forskjellige verdier for X-diff, som en følge av oppløsningen til sensoren og DAQ-enheten.



Figur 6.40: Statisk test PDQ80A, X-diff



Figur 6.41: Statisk test PDQ80A, Sum

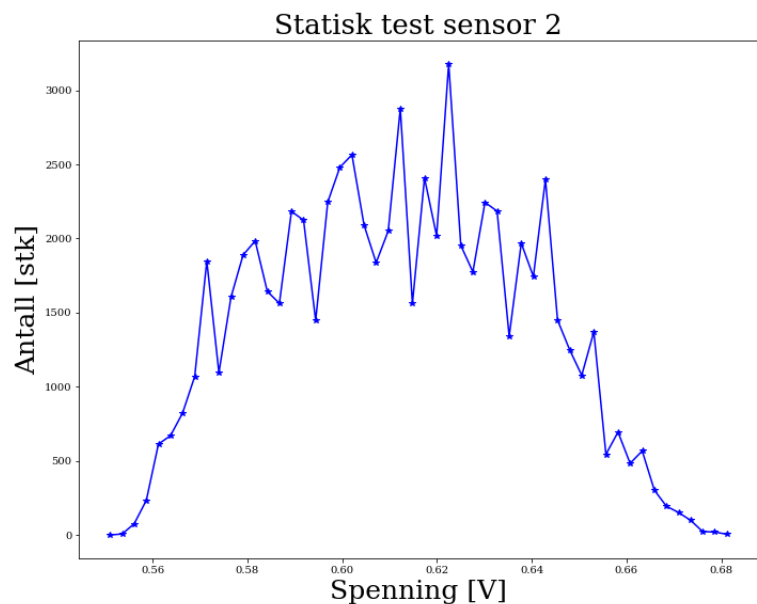
For sum-verdien som genereres av den totale strålingen sensoren blir utsatt for, er målingene mer konsekvente og variasjonen mindre. Det er totalt avlest 22 forskjellige verdier, hvorav fire av verdiene står for 65.69% av avlesningene. Denne avlesningen forteller ikke noe om nøyaktigheten til sensoren når det sender et signal om hvor laserstrålen treffer, men avlesningen forteller noe om hvor mye av laserlyset som oppfattes. Det kan tenkes at resultatene for X-diff ikke nødvendigvis er påvirket av laserstrålen varierer over tverrsnittet, men at de evnen til de fire ulike områdene på sensoren til å fange opp lyset varierer. Dersom denne evnen og laserstrålen hadde

vært konstant, ville det ikke vært mulig å oppdage noen endring i avlest spenning utover det som allerede er avdekket for DAQ-enheten.

Den høyeste avleste verdien er 3.442629V, mens den laveste avleste verdien er 3.389062. Dette tilsvarer en spenningsforskjell på 0.053567V. Dersom man ser på de verdiene som har minst 1% av avlesningene vil tilsvarende tall være 3.394163V, 3.417121V og spenningsforskjellen 0.022957V, noe som er betydelig lavere. Dersom man kun ser på de fire verdiene som gir 65.69% av avlesningene, er tilsvarende tall 3.401816V, 3.409469V og spenningsforskjellen 0.007653V. Denne spenningsforskjellen er forsvinnende liten og derfor er det nærliggende å anta at både strålen fra lasermodulen og sensorens evne til å fange opp denne er stabile. Verdiene er illustrert i figur 6.41

## Sensormodul fra Sandvik Coromant

For sensoren produsert av Sandvik Coromant er det avlest totalt 52 ulike spenninger, som varierer fra 0.55104V til 0.681171V. Dette gir en variasjon på 0.130131V, noe som er betydelig mer enn for X-differansen for PDQ80A-sensoren. Verdiene er ikke direkte sammenlignbare i og med at disse verdiene gjelder for en av de fire cellene i sensoren, mens X-diff leser av forskjellen mellom de cellene til venstre og de to cellene til høyre i PDQ80A-sensoren. Det er likevel grunnlag for å benytte seg av avlesningene da variasjonen i et sta-



Figur 6.42: Statistiske målinger, sensor fra Sandvik Coromant

tisk tilfelle som det disse testene er gjennomført under skal være lik null for begge sensorene. Fordelingen mellom de avleste verdiene finnes i figur 6.42.

## Tolkning av resultatene

Det fremgår av figur 6.40 og 6.42 at PDQ80A-sensoren gir mer stabile målinger. Det er et tydeligere skille mellom verdier som blir avlest ofte sett opp mot de som sjeldent blir avlest, men forekommer. Derfor er det også lettere å konkludere ved bruk av PDQ80A-sensoren på hvilke verdier som fremstår som riktige, sett opp mot sensoren utviklet hos Sandvik Coromant. Det er viktig å legge til at sensoren utviklet hos Sandvik Coromant, som minner veldig om QD50-0-SD-sensoren som OSI Optoelectronics forhandler, bare er en sammensetning av ulike komponenter på lik linje med PDQ80A-sensoren. Derfor vil det til tross for resultatene som er gitt ved de enkle testene være grunnlag for å videreutvikle modulen ved bruk av andre komponenter. Sensorcelens overflate er også svært små i forhold til PDQ80A-sensoren, og det er ikke mulig å få samlet hele laserstrålen med en dimensjon på  $\text{\O}2.9$  mm i sensoren. Dette medfører at sensorens sensitivitet øker betraktelig for støy under testing, noe som gjenspeiler seg i forskjellen i kvaliteten på målingene.

Resultatene underbygger også tidligere funn fra kapittel 6.2 som har variasjoner på linje med de i figur 6.40. Derfor vil det for dynamiske forsøk bli riktig å benytte seg av en høyere plottfrekvens enn 5000Hz, og tilhørende software for å få ut nøyaktig posisjon til enhver tid. Det er fullt mulig å benytte seg av en sensormodul med egenskapene til PDQ80A-sensoren for overvåkning av maskineringsprosessen, dersom man får bygd en modul i samme størrelsesorden som den fra Sandvik Coromant.

# Kapittel 7

## Innbygging

Oppgavetekstens punkt 2 og 4 i kapittel 1.2 omhandler i sin helhet vurdering av plassering for elementer i en borstang, i tillegg til design og bygging av et system for implementering. Det skal diskuteres omkring robusthet og nøyaktighet. Det er ikke tatt hensyn til strømkilde og avlesning av posisjon ved dette punktet av oppgaven, da det ved forespørsel ved Sandvik Coromant ble opplyst om at det viktige var hensynet til komponenters plassering i borstang. Det var heller ingen vilje fra Sandvik Coromant om å gå til innkjøp av nevnte strømkilde. Strømforsyning, eventuell DAQ-enhet og annet utstyr som ikke *må* stå i borstangen, ble derfor anbefalt å utelate. Vurderingen omkring strømkilde vil uansett være den samme. Det anbefales å benytte seg av kretsen som er presentert i kapittel 2.13 og å finne en praktisk plassering for denne.

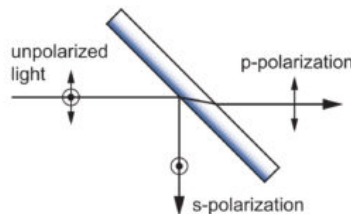
### 7.1 Antall komponenter

Det er i de forsøkene som er gjennomført funnet eksempler på at jo flere faktorer som spiller inn i de ulike forsøkene, jo flere feilkilder er det. Dette kan relateres til antallet personer som var involvert i forsøkene på Gianaen hos Sandvik Coromant. Der var undertegnede og fire andre personer involvert med hver sin oppgave, det være seg kjøring av dreiebenk, logging av lasermåling, innspill til kjøremønstre og lignende. I ettertid er det erfart at dette øker sannsynligheten for feil som følge av dårlig kommunikasjon mellom de involverte partene. Det samme kan tenkes om et system for lasertbasert måling. Jo flere komponenter som er involvert i byggingen av systemet, jo flere feilkilder vil det være.

Ved bruk av kun en enkelt laser og en sensor vil avlesninger kun avhenge av presisjon på komponentene, og nøyaktigheten ved utførelsen av kalibreringen som ble gjennomført da komponentene ble installert. Slik det fremgår fra tester med kvadrantsensoren er avleste verdier lineære såfremt hele lysstrålen fra laseren treffer sensorflaten, og derfor vil det ved kalibrering ikke være nødvendig at laserstrålen treffer sensoren midt i senter. Dette gjør det mulig å gjennomføre en effektiv kalibrering av et system bestående av kun to komponenter. Det er derfor ønskelig å designe et system bestående av så få komponenter som det lar seg gjøre.

## Beamsplitter

Ved bruk av flere komponenter, som beamsplitteren presentert i kapittel 2.3, vil det stilles krav til presisjon ved maskinering av brakett for å holde komponentene i riktig posisjon som er helt på høyde med de strengeste toleransekrav som omsettes i dag. En liten skjevhet i vinkel eller en innfestning som er for rom, kan føre til at strålen enten treffer feil eller varierer over tid som en konsekvens av vibrasjoner. Dette er det vanskelig å korrigere for, og dermed bør det unngås i den grad det lar seg gjøre.



Figur 7.1: Visualisering av eksentrisitet, hentet fra [AccuCoatInc \(2019\)](#)

Den delen av strålen som passerer beamsplitteren er eksentrisk i forhold til aksene den fulgte inn mot beamsplitteren, se figur 7.1. Andelen av laserstrålen som reflekteres gjennom beamsplittere ligger ofte i området 30-70%, og dermed vil det i tilfeller der strålen treffer beamsplitteren to ganger kun være 9-49% igjen av strålens originale styrke. Det er viktig å merke seg at det ved en rekke forsøk og oppsett benyttes beamsplittere for samling av signal og data, men det anbefales ikke å benytte seg av dette i et tenkt verktøy da det kun er ett signal som er nødvendig.

Bruk av beamsplitter åpner for å ha både sensor og laser i samme ende av verktøyet. Dette medfører at det ikke vil være nødvendig å plassere komponenter som er sensitive for vibrasjoner i den enden av borstangen som dreiehodet er plassert på. Det er heller ikke nødvendig med gjennomføring av kabler ut i verktøyet, noe som er plassbesparende. Det åpner for at systemet kan brukes i borstenger med en ytre diameter som er lav, dersom det er behov for dette.

## Speil

Det er i kapittel 2.4 presentert to typer speil som blir benyttet ved forslag til innbygging. I figur 7.5 er speilet benyttet for å returnere strålen tilbake mot beamsplitteren, slik at lyset kan brytes av og inn mot sensormodulen. Ved en skjevhet i laserstrålen inn mot speilet, eller ved en skjev opplagring av selve speilet, vil strålen treffe beamsplitteren på en så måte at selv en liten utbøyning av borstang kan medføre at deler av laserstrålen ikke treffer sensorcellen på modulen. En løsning med to speil vil bli presentert i kapittel 7.4.

## 7.2 Robusthet

### 7.2.1 Sensor

Det opplyses fra de fleste leverandører av posisjon- og kvadrantsensorer at de er ømfintlige for fukt. Av naturlige årsaker bør sensoren plasseres innvendig i en konfigurasjon ved implementering i verktøy. Borstanger har en eller flere kanaler for å lede kjølevæske ut til skjæret. Det må sørges for god tetning mellom kjølevæskens kanaler og kanalen hvor laserstrålen går.

Det gjøres også oppmerksom på at sensorer bygd opp av kvarts eller silikon må rengjøres med isopropanol og fiberklut. Det må tas hensyn til renhet ved installering. Et ujevnt fettsjikt på sensorens overflate grunnet kontakt med hud vil forstyrre signalene og dermed kan verktøyet være ødelagt allerede før det blir tatt i bruk.

Sensorene vil også være ømfintlige for enkelte temperaturer, og bør ikke oppbevares verken kaldt eller varmt, og driftstemperaturen vil typisk være fra 0°C-70°C. [OSIOptoelectronics \(2019\)](#)

### 7.2.2 Beamsplitter og speil

Beamsplitter og speil er passive komponenter og ikke noe som blir påvirket av vibrasjoner og temperaturendringer. Det gjøres oppmerksom på at overflaten til beamsplitteren kan bli påvirket på lik linje med sensoren, og derfor bør dette unngås. Det er også viktig å påse at overflatene som blir utsatt for laserstrålen er rene slik at strålen brytes jevnt over hele overflaten. Små sår i overflaten og annen forurensning vil gi utslag på strålens videre retning og styrke, og må derfor unngås.

### 7.2.3 Lasermodule

Lasermodule CPS635R har som det fremgår av tabell 2.1 et temperaturintervall fra  $-30^{\circ}$ - $70^{\circ}$  for lagring, og  $-10^{\circ}$ C- $50^{\circ}$ C ved bruk. Ved plassering av laser i den ytre enden av borstangen vil det være relativt høye temperaturer ved maskinering uten bruk av kjølevæske, maskinering ved bruk av utslitte skjærebiter eller ved dype kutt og store matehastigheter. Det er ikke utenkelig at det oppnås temperaturer på mer enn  $50^{\circ}$ C. Temperaturen når flere hundre grader i overgangen mellom skjærebiter og emnet som maskineres, og uten avkjøling vil denne energien gå videre inn i verktøyholderen. [El Hakim et al. \(2015\)](#)

Det er lite informasjon å hente angående utmatting av lasermoduler. Lasermodule er som beskrevet i kapittel 2.1 bygd opp av linser som er plassert med høy nøyaktighet i tillegg til selve diodelaseren. Ved høyfrekvente vibrasjoner, slag og annen påvirkning som verktøyet kan og vil bli utsatt for, er det fare for at posisjoneringen til en av komponentene blir forskjøvet. Dette medfører at laserstrålen som modulen sender ut ikke lengre er som tiltenkt, og det vil bli avlest andre verdier enn hva som forventes ved en gitt utbøyning. Derfor vil det være interessant å gjennomføre en utmatningstest på lasermodulen hvor den utsettes for vibrasjoner over en lengre periode, typisk forventet levetid for en borstang med streklapper, for å se hvordan modulen blir påvirket. Det kan også være interessant å påføre slag likt det som kan forventes dersom verktøyholderen kræsjer i emnet grunnet feil innmåling av verktøy eller en feil i g-kodene for maskineringen.



### 7.3 Målenøyaktighet

Uten å ha gjennomført en rekke forsøk med en prototype som inneholder både et laserbasert målesystem og strekkklapper, vil det være uriktig å trekke slutninger om målenøyaktigheten til et slikt system. Det er allerede kjent at frekvensen på DAQ-enheten som er benyttet vil være god nok for måling av dynamiske bevegelser. Ved bruk av kvadrantsensor lik QD50-0-SD er det oppgitt i datablad en frekvens i området 120-250kHz [OSIOptoelectronics \(2019\)](#). Det er derfor ingen grunn til å anta annet enn at målefrekvensen er god nok.

Det er observert i de praktiske forsøkene at enhver påvirkning på systemet i form av svake slag og små bevegelser gir et utslag i avlest verdi fra kvadrantsensoren. Ved å stramme en av de to mutterne ved forsøk i TOS-dreiebenken med mekaniske nedbøyning bare noen grader, ble det observert utslag. Det er ikke grunnlag for å påstå at utstyret benyttet i prosjektet er godt nok for å måle med en presisjon ned mot 1-2  $\mu\text{m}$ , men det er tilstrekkelig grunnlag for å påstå at prinsippet vil være godt nok for målinger med en nøyaktighet på cirka 20  $\mu\text{m}$ . Enda bedre nøyaktighet bør være oppnåelig ved bruk av andre komponenter, da komponentene benyttet i oppgaven er å anse som budsjettvennlige.

For å kunne anslå nøyaktigheten i målingene bør det gjennomføres nye forsøk i mer kontrollerte former. Eksempler på dette kan være ved bruk av CMM-maskinen hos NTNU Valgrinda hvor både laser og sensor opplagres uten mulighet for forflytning. Det ble gjort liknende forsøk i prosjektoppgaven i høstsemesteret 2018, men forsøkene var ikke repeterbare på grunn av utilstrekkelig innfestning.

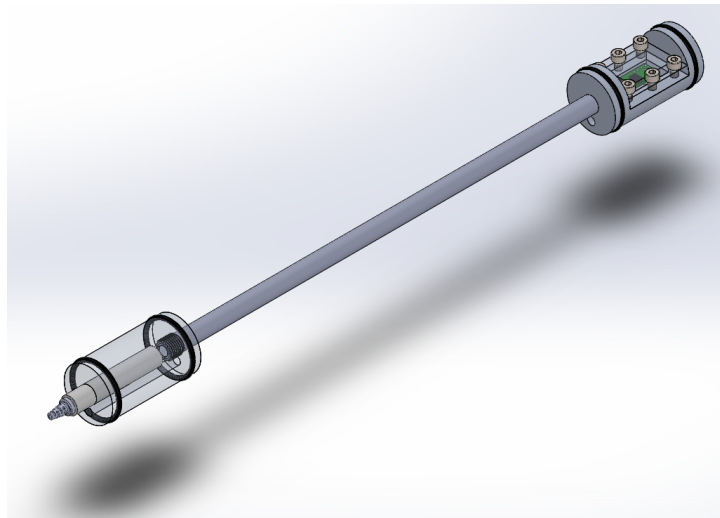
### 7.4 Design og plassering av komponenter

Ulike plasseringer av laser og sensorelement påvirkes av flere faktorer, hvor de mest utpregede vil være kjølevæske, vibrasjoner, temperatur og fysisk størrelse. Det er modellert opp tre ulike forslag til plasseringer av sensor og lasermodul. De er bestående av ulike komponenter og har egenskaper deretter. Det er ikke gitt noen anbefaling for hvilke system som bør prøves og hvilke som bør skrinlegges, da det ikke er gjennomført noen praktiske forsøk. På generelt grunnlag

kan det nevnes at innretninger med flere komponenter har flere mulige feilkilder, og dermed en antatt lavere nøyaktighet. Det er også rimelig å anta at prisen på innretninger med flere komponenter er høyere, både i innkjøpspris og monteringskostnad hos en eventuell produsent av det ferdige produktet. Flere skisser av samtlige forslag ligger i tillegg [D](#). Samtlige forslag inneholder egen kanal for kjølevæske, og samtlige forslag er ment å festes innvendig i borstang slik det er beskrevet for forslag 2 i figur [7.6](#).

#### 7.4.1 Forslag 1 - Laser og sensorcelle i senter

Den enkleste konfigurasjonen vil være å ha både laser og sensoren plassert i senter av borstangen. Det er tenkt at laser plasseres i den ytre enden av borstangen, slik det er skissert i figur [7.2](#). Systemet kalibreres likt for utbøyning over begge akser, og forenkles noe ved at aksens som går gjennom både sensoren og laseren vil være den aksens som borstangen bøyer seg om.

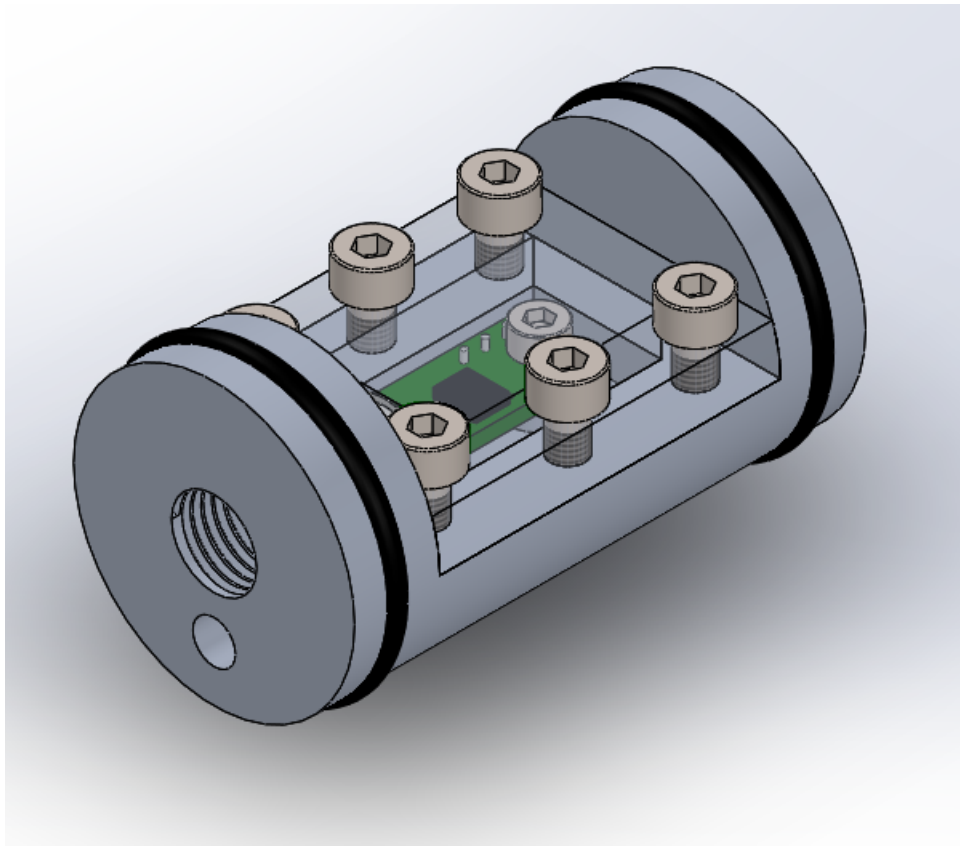


Figur 7.2: Forslag 1

En løsning av denne sorten har ingen mulighet til å fange opp rotasjon eller vridning av borstangen, noe som er tilfelle i en maskineringsprosess. Det vil for en gitt borstang være et lineært forhold mellom utbøyning og vridning av borstang, og dermed vil det være mulig å ta høyde for dette ved behandling av avlest data. Det er også mulig å plassere laser og sensor utenfor sentrum

av borstangen, dersom det er en bedre løsning med tanke på kjølekanal. For å bevare symmetrien i borstangen og dermed også egenskapene bør flere, små kjølekanaler vurderes fremfor en større.

Ved denne typen løsning blir festebrakett for laser en enkel innretning uten store produksjonskostnader. Ved innledende forsøk anbefales det å feste lasermodulen ved bruk av lim i en sylindrisk opplagring maskinert med særdeles fine toleranser, slik at laserstrålens retning etter liming er bestemt. Innfestning av sensormodul vil ikke være av like stor betydning for signal som mottas, og det er antatt godt nok å maskinere et hull som selve sensoren plasseres i, for så å skru fast printeplaten. Deretter lukkes modulen med et lokk. Lokket vil ikke være støv- og væskeavstøtende da o-ringene skal holde området rent. Se figur 7.3.



Figur 7.3: Festeanordning for sensormodul i forslag 1

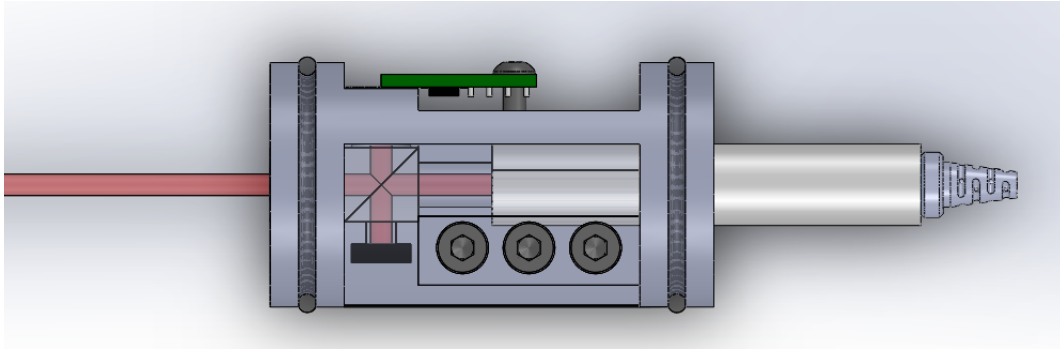
I prinsippsskissene for samtlige løsninger er den bakre enden av lasermodulen fritt eksponert mot kjølevæske. Hele innretningen bør forsegles etter montering på en slik måte at kjølevæsken ikke trenger inn. Det er valgt å la endene være åpne da det uansett må legges føringer for ledninger til og fra innretningen, noe som krever forsegling i form av silikon eller lim. Innretningen i figur 7.2 er ment å bli skyvd inn i borstangen, for så å bli festet i bakkant på tilsvarende måte som dempermassen i eksisterende Silent Tools<sup>TM</sup>-verktøy slik at den holdes i posisjon.

O-ringene fra TTP Seals har dimensjon  $\text{Ø}35 \times 2.5$  mm og som benyttes for alle forslag. Røret som er tegnet inn er av dimensjon  $\text{Ø}10 \times 1$  mm og er standard hyllevare hos Norsk Stål AS. Røret er tenkt gjenget opp med fingjenger for å bidra til en mer tettsittende forbindelse mellom komponentene, mens o-ringene er ment å holde kjølevæske og støv ute fra innretningen. Modulen lukkes med seks M4-skruer, og printeplaten holdes på plass ved hjelp av en stk M3 skrue.

#### 7.4.2 Forslag 2 - Bruk av beamsplitter og speil

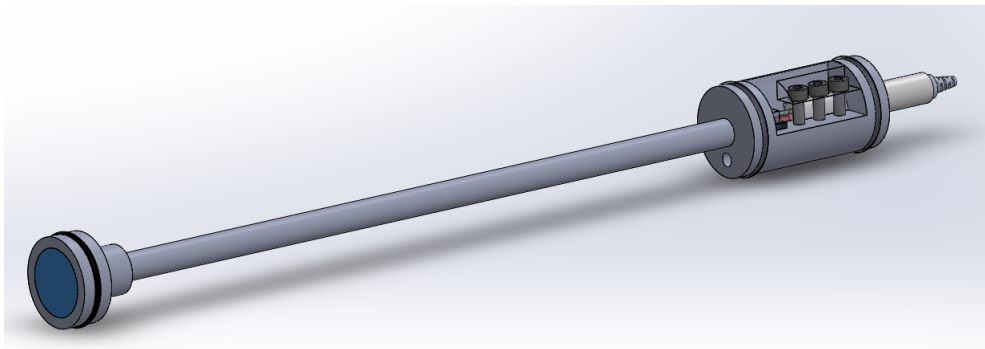
For å unngå at plassering av komponenter som krever tilkoblingspunkter, altså laser og sensor, skal plasseres i front av borstangen er det skissert et forslag hvor det er bygd et system bestående av laser, sensor, beamsplitter og et speil. Speilet er plassert i front av borstanga, og reflekterer laserstrålen som passerer beamsplitteren på vei tilbake. Deretter bøyes noe av laserstrålen av og inn på posisjonssensoren som er plassert ved siden.

I figur 7.4 og 7.5 er det illustrert forslag til et system bestående av nevnte komponenter, brakett som kan plasseres i en borstang og en illustrasjon av hvordan en slik enhet kan plasseres i en borstang. Denne løsningen åpner for bruk av mindre speil i enden, likt det som benyttes i forslag 3, som tillater bruk i borstenger av langt lavere diameter. Det er ikke skissert inn som en del av oppgaven. Det er i figur 7.5 gjenget et rør inn i enden av braketten som holder komponentene. I den andre enden av røret er innretningen som holder speilet. Speilet har en diameter på  $\text{Ø}25$  mm. Det foreslås å lime speilet til innretningens maskinerte flate for innledende forsøk.

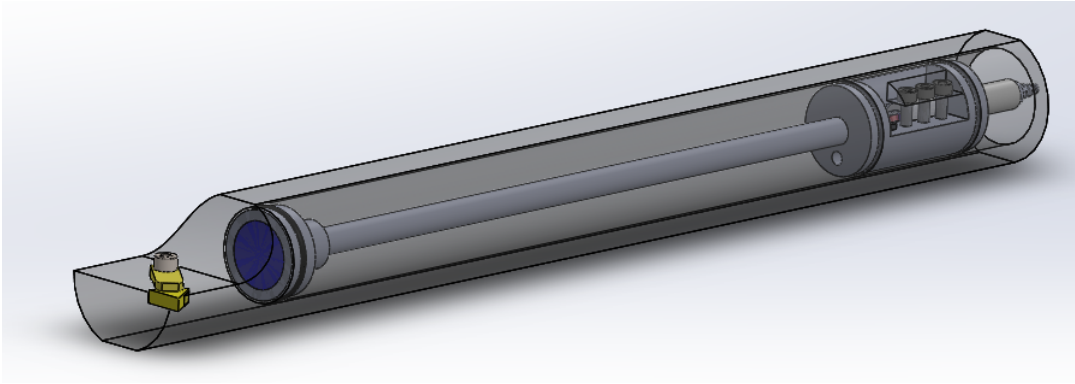


Figur 7.4: Brakett for bruk av beamsplitter, sett ovenfra

Ved montering skyves laseren inn fra enden av braketten. Sensormodulen skrues fast i braketten fra siden. I figur 7.4 er skruetaket til printeplaten på sensormodulen plassert i samme posisjon som målt på modulen produsert av Sandvik Coromant. Posisjoneringen av hullet er fleksibel og kan endres. I den andre enden av modulen er selve kvadrantsensoren plassert i et hull hvor laserstrålen treffer. Her er sensorcellen loddet til printeplaten vinkelrett i forhold til dagens plassering av praktiske årsaker. Begge løsningene lar seg bruke i praksis. Dagens plassering blir benyttet for forslag 1 og 3. Se figur 5.5 for sensormodul. Beamsplitteren senkes ned ovenfra, og et absorberende materiale plasseres også ovenfra. Modulen lukkes ved å skru på et lokk ved hjelp av tre stk M3 skruer med umbrakohode. Ved bruk av riktige toleranser vil både beamsplitter og lasermodul holdes i riktig posisjon ved montering av lokket, men også her anbefales det å lime komponentene før påsetting av lokk for å ha bedre kontroll på monteringen.



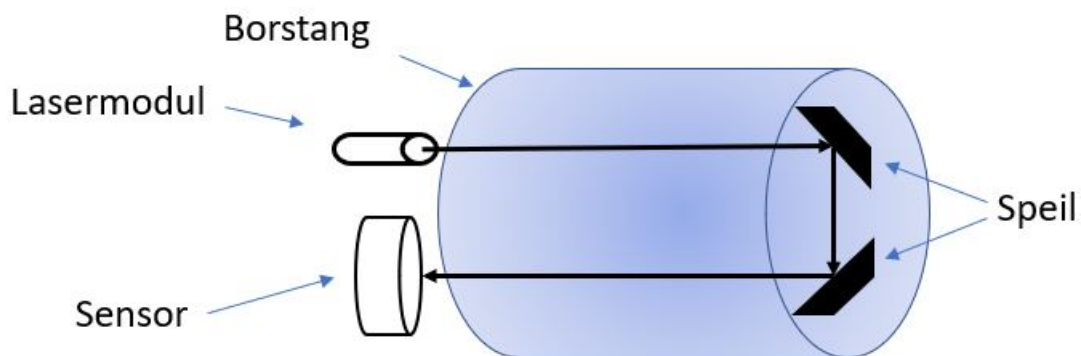
Figur 7.5: Innbygging i borstang Ø20mm, speil i enden



Figur 7.6: Plassering i borstang uten dempermasse

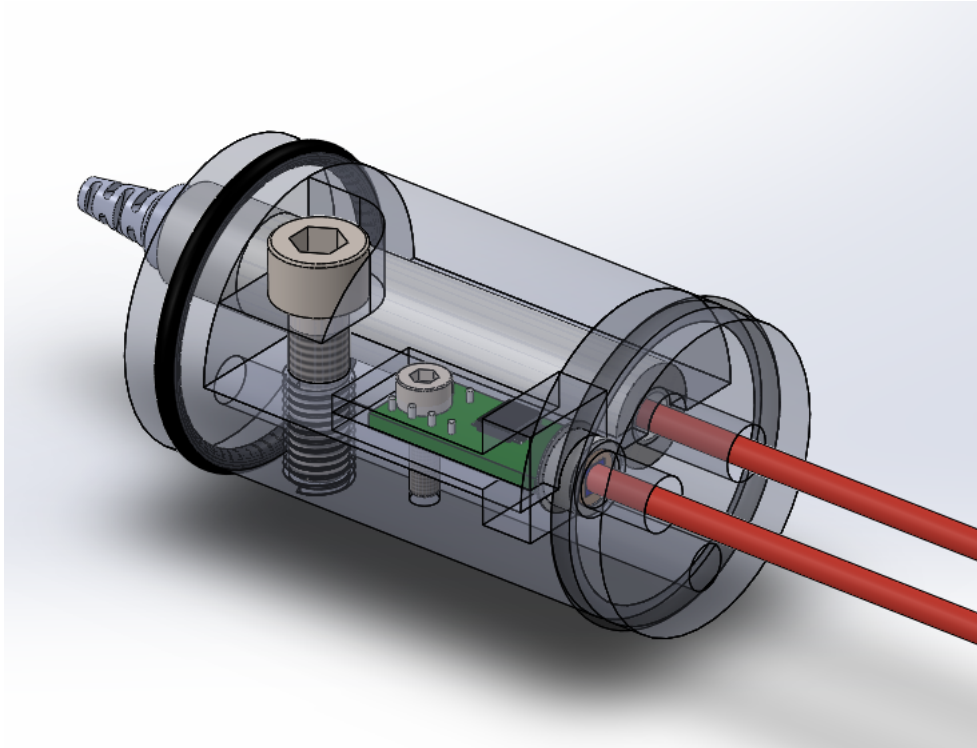
### 7.4.3 Forslag 3 - Bruk av to speil

Ved plassering av både sensorcelle og laser eksentrisk i borstangen er det mulig å ha to kanaler for å føre laserstrålen fremover i verktøyet. Ved hjelp av to speil som begge reflekterer lyset  $45^\circ$  i front vil laserstrålen komme tilbake parallelt med utgående laserstråle. Bruk av to speil vil føre til økt sensitivitet ved utbøyning av borstang avhengig av speilenes plassering, noe som kan være ønskelig. I figur 7.7 er prinsippet illustrert. Ved bruk av denne løsningen vil vridning av borstang føre til ekstra kompleksitet i de tilfellene det er ønskelig å også måle vridning ved hjelp av systemet.



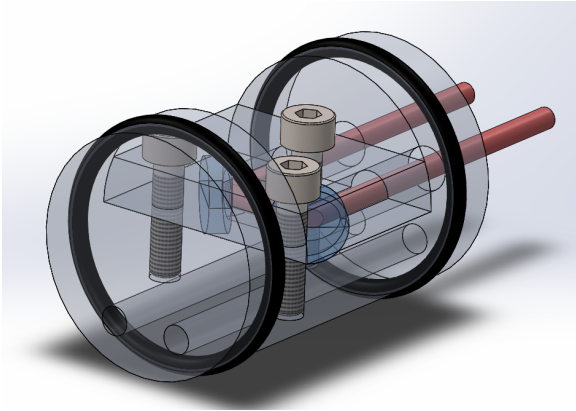
Figur 7.7: Bruk av to speil

I figur 7.8 er et forslag bestående av lasermodul og sensormodul skissert opp. Også her er det valgt å benytte seg av et lokk for å holde lasermodulen på plass, og printeplaten til sensormodulen festes ved bruk av samme hull som for forslaget ved bruk av beamsplitter. I bunn er det et hull slik at kjølevæsken får passert braketten inne i borstangen. Her er det brukt M3- og M5-skruer for festing av kretskort og lukking av innretningen.

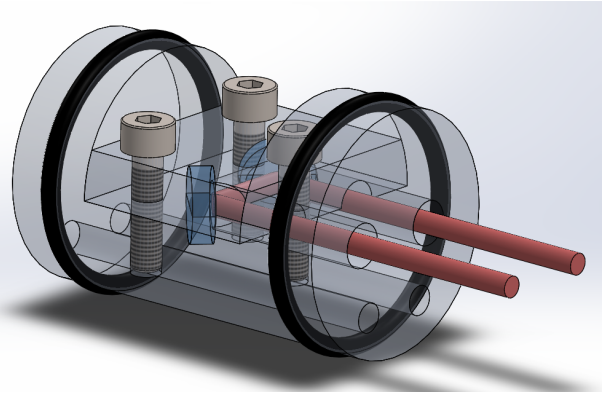


Figur 7.8: Bruk av to speil

I forslaget er det ikke valgt å benytte seg av rør for føring av laserstrålene. Det vil kreve to rør, men å legge kjølevæsken i rør krever kun ett. Røret for kjølevæsken vil i så fall bli forbindelsen mellom innretningen for modulene, og innretningen hvor de to speilene er plassert, skissert i figur 7.9 og 7.10.



Figur 7.9: Innretning for speil



Figur 7.10: Innretning for speil

Det er skissert inn 3 stk M5-skruer for festing av lokket for innretningen. Lokket vil igjen være det som holder speilene på plass. Speilene er av typen med dimensjon  $\text{Ø}10 \times 3$  mm fra kapittel 2.4. Denne typen speil kan også benyttes for forslag 2 ved innbygging i tynnere borstang. Det er anbefalt å benytte seg av lim i tillegg til lokket for feste av speilene slik at det er mulig å ha kontroll på hvordan de blir stående i modulen når den lukkes. En liten skjevhet vil være nok til at strålen ikke treffer sensorcellen, noe som er å betegne som den største svakheten til dette prinsippet. Det kreves stor presisjon ved montering å få et system med dette prinsippet til å fungere å praksis.



# Kapittel 8

## Konklusjon

Statiske forsøk hos NTNU Valgrinda beviser en linearitet i avleste verdier fra posisjonssensoren, med noe avvik. Avviket er ikke av en slik størrelsesorden at resultatene ikke kan avleses og benyttes, og dermed ble det satt opp en likning for beregning av posisjon i forhold til initialtilstand ved å basere seg på avlest spenning for PDQ80A-sensoren. Oppløsningen på sensoren viser seg å være god nok til å skille mellom posisjoner med en nøyaktighet ned mot 0.0225 mm.

Ved en enkel statistisk test av DAQ-enheten som ble benyttet i forsøkene blir det gjort oppmerksom på at avlesningene varierte mellom ni ulike verdier, hvorav to av de ble registrert henholdsvis fem og 50 ganger blant 50.000 avlesninger. Avviket tilsvarer en utbøyning på 0.75  $\mu\text{m}$  målt med PDQ80A-sensoren, og er neglisjertbart i alle tilfeller der DAQ-enheten måtte bli benyttet i kombinasjon med en sensor av denne typen for måling av posisjon. Ved dynamiske forsøk ble det gjennomført avlesninger med en frekvens på 5000Hz. Tabell 6.12 viser at 37.49% av de statiske målingene er en av de ni verdiene, mens figurene i kapittel 6.2 tilsier en frekvens på 5000Hz ikke er godt nok. Det er oppgitt en maksimal frekvens på 24000Hz i DAQ-enhetens datablad, som er godt nok ved videre testing og instrumentering.

Det ble overlevert en sensormodul fra Sandvik Coromant underveis i oppgaven, hvor formålet var å erstatte PDQ80A-sensoren med en fysisk mindre sensor med samme egenskaper. Et tilsvarende forsøk ble gjennomført på denne, hvor en av de fire lederne ble avlest. Det ble observert større variasjon enn for PDQ80A-sensoren. På generelt grunnlag kan det uttales at testresulta-

tene ikke var av samme størrelsesorden som for PDQ80A-sensoren, men overgangen mellom verdiene var mykere. Det kan konkluderes med at modulen som er bygd av Sandvik Coromant ikke er god nok for implementering i verktøy, men med små endringer og et løft i kvalitet på komponentene bør det kunne brukes uten større endringer.

Ved forsøkene gjennomført i Gianaen ble det ikke funnet nevneverdig slark i sleidene på dreiebenken. Det er funnet noe helning som er antatt å skyldes unøyaktig montering. Helningen er under  $1^\circ$  i begge aksene og uten praktisk betydning for bruken av dreiebenken. Det er funnet varierende måleresultat ved bruk av reflektorkule plassert ulike steder på Gianaen både ved frikjøring og ved maskinering. Lengst bak på dreiebenken er det liten eller ingen forskjell på kutt og frikjøringer, mens det på borstangen observeres større forskjeller i stabilitet mellom frikjøring og kutt. I figur 6.37 er det observert variasjon i  $Y_g$ -verdier med mindre variasjon en avleste verdier ved statiske tester av DAQ-enheten.

Det er kommet opp forslag til hvordan komponenter kan plasseres ved innbygging i borstang. Det er her tatt høyde for plassering i borstang med relativt liten diameter.

Det kan konkluderes med at det lar seg gjøre å overvåke posisjon av verktøy ved bruk av laserbaserte metoder, men at komponenter brukt i dette prosjektet ikke er av god nok kvalitet. DAQ-enheten tilfredsstiller kravene, men den fysiske størrelsen er for stor. Sensormodulen utviklet av Sandvik Coromant bør modifiseres før det gjennomføres tester på denne. Sensorens størrelse må økes, eller lasermodulens utgangsstråle minskes, for at komponentene skal være compatible med hverandre. Det anbefales å øke størrelsen på sensor da lasermodulen ved testing virker å være stabil med et godt lysbilde. Det bør også kjøres utmattingstester på samtlige komponenter som blir benyttet i et eventuelt produkt, for å kartlegge holdbarheten på produktet.

# Kapittel 9

## Videre Arbeid

Dersom Sandvik Coromant ønsker å benytte seg av et laserbasert system for måling av verktøyposisjon ved innvendig maskinering med utgangspunkt i det som er kartlagt i denne rapporten, vil prosessen videre bestå i å;

1. Gå til innkjøp av anbefalt strømkilde
2. Kartlegge tilgjengelige komponenter for produksjon av kvadrantsensor av lik fysisk størrelse som i figur 2.10, men med større sensorflate og bedre egenskaper
3. Gjennomføre utmattingstest på CPS625R-lasermodule
4. Foreta et valg omkring DAQ-enhet. Det kan være hensiktsmessig med integrert DAQ-enhet for enkel tilkobling mellom verktøy og maskinsenter. En tilkobling med en enkelt kontakt åpner på sikt for lagring av verktøy i magasin og automatisk bytte
5. Sammenstilling av komplett enhet for integrering og testing. Det må foretas et valg for hvilket konsept som videreføres

# Bibliografi

AccuCoatInc (2019). *Bruk av beamsplitter*. Hentet 15. Mai 2019 fra <https://accucoatinc.com/technical-notes/beamsplitter-coatings-technote/>.

Biltema (2019). *Nettadapter*. Hentet 7. Mars 2019 fra <https://www.biltema.no/kontor-teknikk/datatilbehor/nettadaptere/nettadapter-3-12-v-2000030021>.

Chun, S.-H. and Ko, T. J. (2011). Study on the response surface model of machining error in internal lathe boring. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12(2):177–182.

COŞKUN, İ., Akar, E., and ÇETİN, Ö. (2013). A new digital image steganography algorithm based on visible wavelength. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 21(2):548–564.

Custompartnet (2019). *Oppbygning dreiebenk*. Hentet 1. Mai 2019 fra <https://www.custompartnet.com/wu/turning>.

DirectIndustry (2019). *Leica Absolute Tracker AT960*. Hentet 26. Februar 2019 fra <http://www.directindustry.com/prod/hexagon-manufacturing-intelligence/product-5623-1004955.html>.

Duke, K. (2013). *Bipolar +/-10V Analog Output from a Unipolar Voltage Output DAC*. Hentet 25. September 2018 fra <http://www.ti.com/lit/ug/slau525/slau525.pdf>.

Eastec (2019). *Eastec logos*. Hentet 11. Februar 2019 fra <http://easteconline.com/showfeatures/student-day/sandvik-coromant-logo-4-5-inch-height/>.

- EdmundOptics (2019a). *0.9 mW Laser Spesifikasjoner*. Hentet 5. Februar 2019 fra <https://www.edmundoptics.com/p/09mw-635nm-micro-ldm-laser-diode/14104/>.
- EdmundOptics (2019b). *Beamsplitter 10mm Cube*. Hentet 5. Februar 2019 fra <https://www.edmundoptics.com/p/10mm-vis-non-polarizing-cube-beamsplitter/7159/>.
- EdmundOptics (2019c). *Speil Ø10*. Hentet 4. Juni 2019 fra <https://www.edmundoptics.com/p/10mm-diameter-laser-diode-mirror/5344/>.
- EdmundOptics (2019d). *Speil Ø25*. Hentet 4. Juni 2019 fra <https://www.edmundoptics.com/f/high-performance-laser-diode-mirrors/12625/>.
- Eichhorn, M. (2014). *Laser physics: from principles to practical work in the lab*. Springer Science & Business Media.
- El Hakim, M., Shalaby, M., Veldhuis, S., and Dosbaeva, G. (2015). Effect of secondary hardening on cutting forces, cutting temperature, and tool wear in hard turning of high alloy tool steels. *Measurement*, 65:233–238.
- Electrical4U (2019). *PN laser*. Hentet 2. April fra 2019 <https://www.electrical4u.com/laser-diode/>.
- Hecht, J. (2010a). The first half-century of laser development. *Laser Technik Journal*, 7(4):20–25.
- Hecht, J. (2010b). Short history of laser development. *Optical Engineering*, 49(9):091002–091002.
- HelmanCNC (2019). *Akser CNC-dreiebenk*. Hentet 1. Mai 2019 fra <http://www.helmancnc.com/cnc-program-block/>.
- Hexagon (2019a). *Leica Absolute Tracker AT960*. Hentet 26. Februar 2019 fra <https://www.hexagonmi.com/en-IN/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960>.
- Hexagon (2019b). *Leica T-Probe*. Hentet 26. Februar 2019 fra <https://www.hexagonmi.com/products/laser-tracker-systems/leica-probing-solutions/leica-tprobe>.

- Hexagon (2019c). *Red Ring Reflector*. Hentet 1. Mai 2019 fra [https://shop.hexagonmi.com/emea/en\\_GB/EUR/search?text=reflector](https://shop.hexagonmi.com/emea/en_GB/EUR/search?text=reflector).
- KhanAcademy (2015). *The periodic table, electron shells, and orbitals*. Hentet 19. Januar 2019 fra <https://www.khanacademy.org/science/biology/chemistry--of-life/electron-shells-and-orbitals/a/the-periodic-table-electron-shells-and-orbitals-article>.
- Kuster, F. and Gygax, P. (1990). Cutting dynamics and stability of boring bars. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 39(1):361–366.
- Larsen, P. K. (2007). *Stålkonstruksjoner, Profiler og Formler*. Fagbokforlaget, 3. Utg.
- Min, B.-K., O’Neal, G., Koren, Y., and Pasek, Z. (2002). A smart boring tool for process control. *Mechatronics*, 12(9-10):1097–1114.
- NationalInstruments (2019). *Spesifikasjoner NI USB-6009*. Hentet 1. April 2019 fra <http://www.ni.com/pdf/manuals/375296c.pdf>.
- OSIOptoelectronics (2019). *Spesifikasjoner QD50-0-SD*. Hentet 15. Mai 2019 fra <http://www.osioptoelectronics.com/Libraries/Datasheets/Sum-and-Difference-Modules.sflb.ashx>.
- ProductionMachining (2019). *Tooling up for Micromachining*. Hentet 26. Februar 2019 fra <https://www.productionmachining.com/articles/tooling-up-for-micromachining>.
- Python (2019). *Python*. Hentet 23. Mai 2019 fra <https://www.python.org/>.
- ResearchGate (2019). *USB-6009*. Hentet 12. Februar 2019 fra [https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-NI-USB-6009-National-Instruments-Corporation\\_fig2\\_323612935](https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-NI-USB-6009-National-Instruments-Corporation_fig2_323612935).
- Sandvik (2013). *Innovation on the move*. Hentet 28. Januar 2019 fra <https://www.home.sandvik/en/news-and-media/newslist/news/2013/06/innovation-on-the-move/>.

- SandvikCoromant (2019a). *About Us*. Hentet 28. Januar 2019 fra <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/aboutus/pages/company-facts.aspx>.
- SandvikCoromant (2019b). *What is silent tools?* Hentet 11. Februar 2019 fra [https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/silent\\_tools/pages/default.aspx](https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/products/silent_tools/pages/default.aspx).
- Schmitz, T. L. and Smith, K. S. (2008). *Machining dynamics: frequency response to improved productivity*. Springer Science & Business Media.
- Sletteboe.no (2019). *KS cylinderhoner*. Hentet 13. Februar 2019 fra <https://www.sletteboe.no/produkter/verktoy/maskiner/utstyr/kapp/slipeprodukter/honeverktoy-pasta>.
- SNL (2019). *Python - Programmeringsspråk*. Hentet 23. Mai 2019 fra [https://snl.no/Python\\_-\\_programmeringsspr%C3%A5k](https://snl.no/Python_-_programmeringsspr%C3%A5k).
- Sørby, K. and Sundseth, E. (2015). High-accuracy turning with slender boring bars. *Advances in Manufacturing*, 3(2):105–110.
- Staniek, R., Gessner, A., Zielnica, J., Ptaszyński, W., Myszkowski, A., Cizak, O., and Stoić, A. (2012). Stress and displacement analysis of a modern design lathe body by the finite element method (fem). *Metalurgija*, 51(1):51–54.
- Stover, M. (2003). The three-cut technique for finish boring. *Tooling Production*, 69(9).
- Sun, H. (2012). Laser diode beam basics, manipulations and characterizations.
- Sun, H. (2015). A practical guide to handling laser diode beams.
- Thorlabs (2019a). *CPS625R*. Hentet 2. April 2019 fra <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=CPS635R>.
- Thorlabs (2019b). *PDP90A*. Hentet 12. Februar 2019 fra [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4400](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4400).
- Thorlabs (2019c). *Quadrant Position Detector*. Hentet 5. Februar 2019 fra [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=4400&pn=PDQ80A](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4400&pn=PDQ80A).

# Tillegg A

## Forkortelser og ordforklaringer

### Forkortelser

**DAQ** Data acquisition system

**Hz** Hertz

**mm** Millimeter

**$\mu\text{m}$**  Mikrometer

**m/min** Meter per minutt

**N** Newton

**NI** National Instruments

**NTNU** Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

**V** Volt, mål på spenning

**s** Sekund

**$X_g$**  Teoretisk x-akse Giana

**$X_g'$**  Virkelig x-akse Giana

**X** X-akse lasertracker



**Y<sub>g</sub>** Teoretisk y-akse Giana

**Y** Y-akse lasertracker

**Z<sub>g</sub>** Teoretisk z-akse Giana

**Z<sub>g</sub>'** Virkelig z-akse Giana

**Z** Z-akse lasertracker

$\alpha$  Vinkel mellom Gianaen og lasertrackerens koordinatsystem

$\gamma$  Vinkel mellom faktisk og teoretisk X-akse for Giana

$\Theta$  Vinkel mellom faktisk og teoretisk Z-akse for Giana koordinatsystem

## Ordforklaringer

**Bakker** Festeforbindelse mellom emne og chuck i dreiebenk. En dreiebenk har 3 eller 4 stykker

**Chuck** Roterende festeinnretning på dreiebenken, forbinder bakkene med dreiebenken

**CNC** Computer numerical control - Automatisk styring av verktøy ved bruk av datakraft

**Emne** Del som maskineres, arbeidsstykke

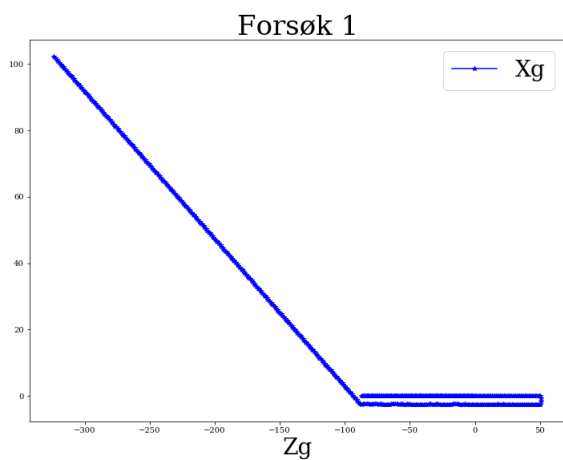
**G-koder** Programmeringsspråk for CNC-styrte maskiner

**Skjærebiter** Utskiftbar slidedel på verktøy. Er i kontakt med emnet under maskinering

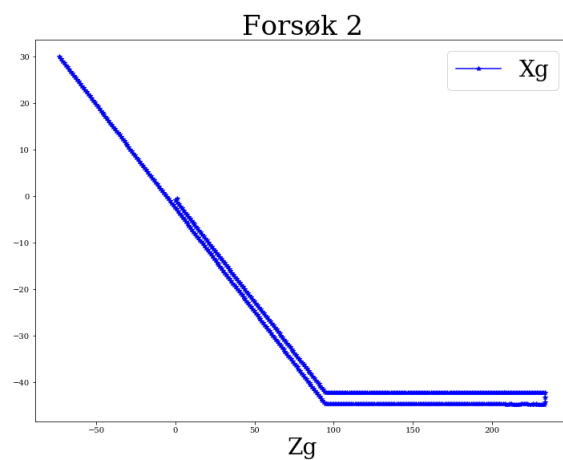
# Tillegg B

## Måledata Giana

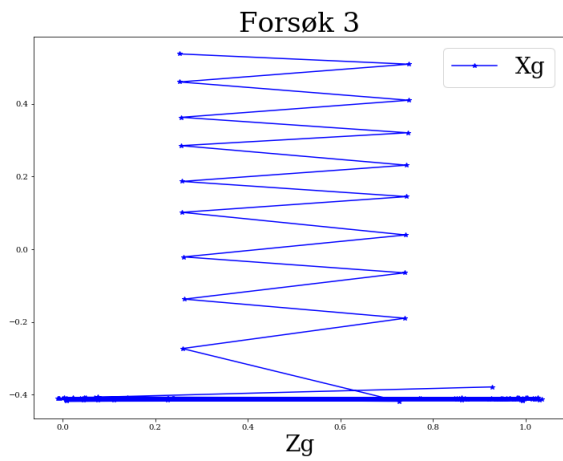
Figur B.1 til figur B.10 illustrerer kjørebanelen til toppsleiden i de respektive forsøkene. Figur B.11 til figur B.18 illustrerer  $X_g$ - og  $Y_g$ -koordinatene ved de  $Z_g$ -verdiene som er hensyntatt ved vurderinger. Forsøk 3 er utelatt på grunn av ufullstendige måleresultat.



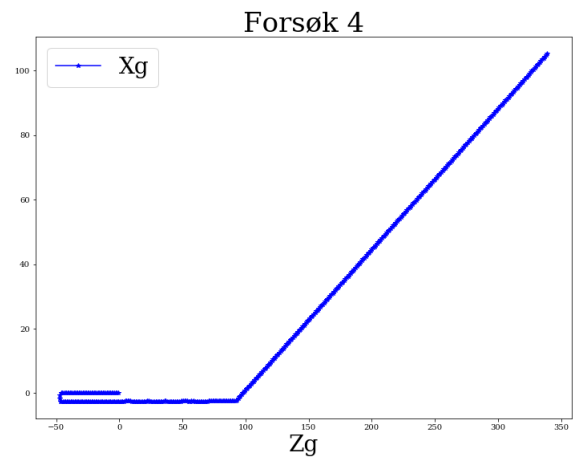
Figur B.1: Forsøk 1



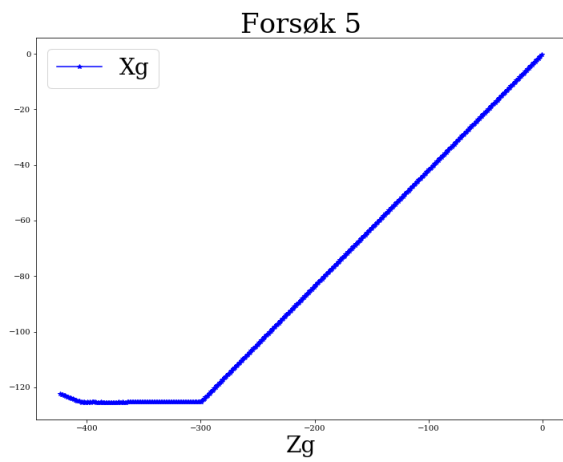
Figur B.2: Forsøk 2



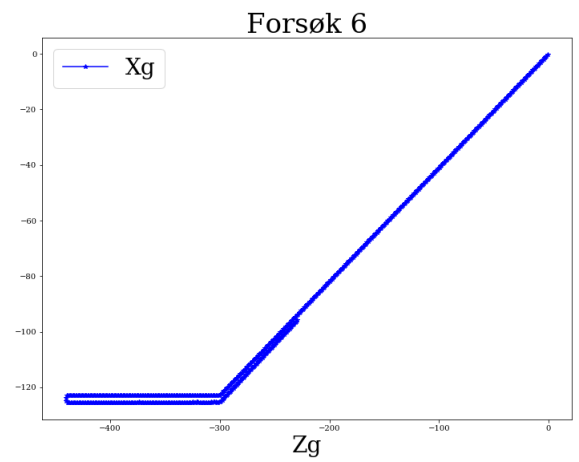
Figur B.3: Forsøk 3



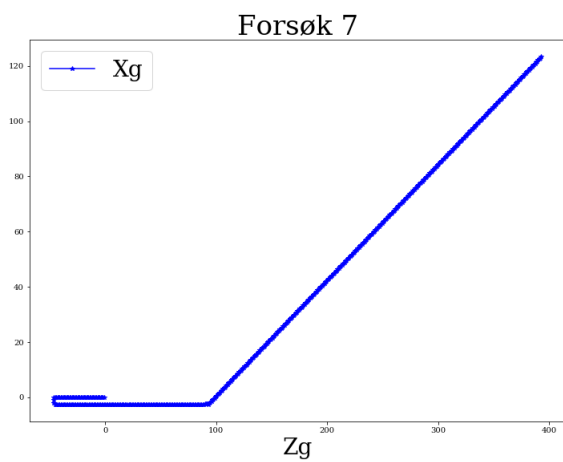
Figur B.4: Forsøk 4



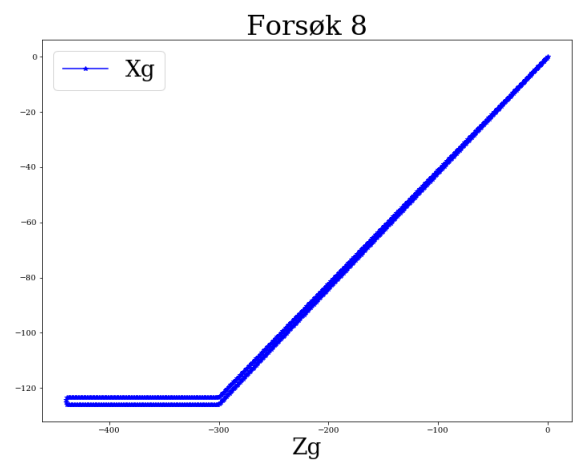
Figur B.5: Forsøk 5



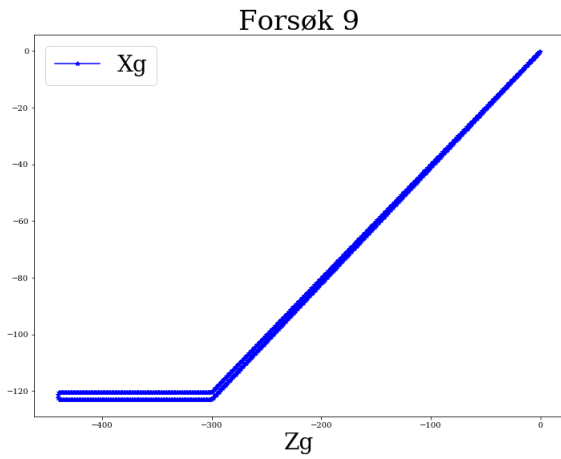
Figur B.6: Forsøk 6



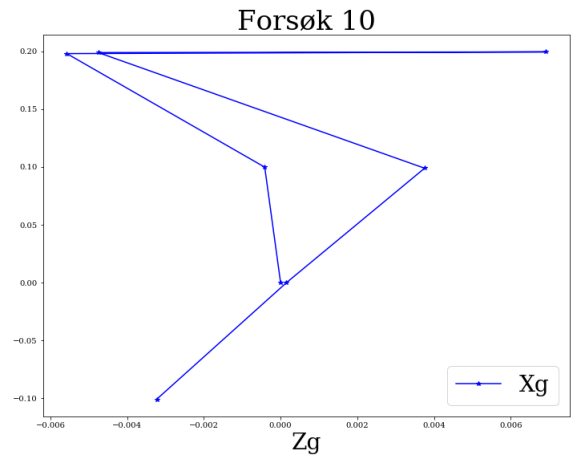
Figur B.7: Forsøk 7



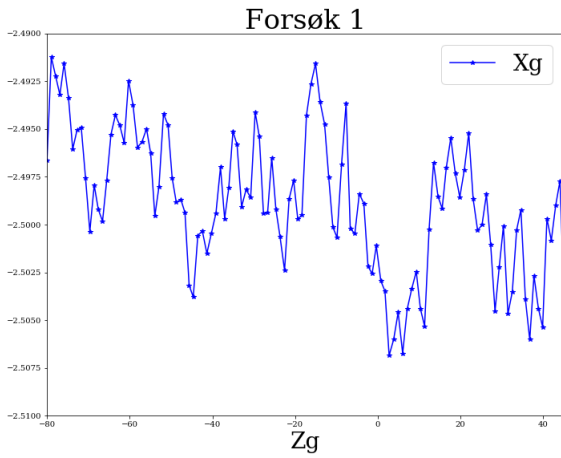
Figur B.8: Forsøk 8



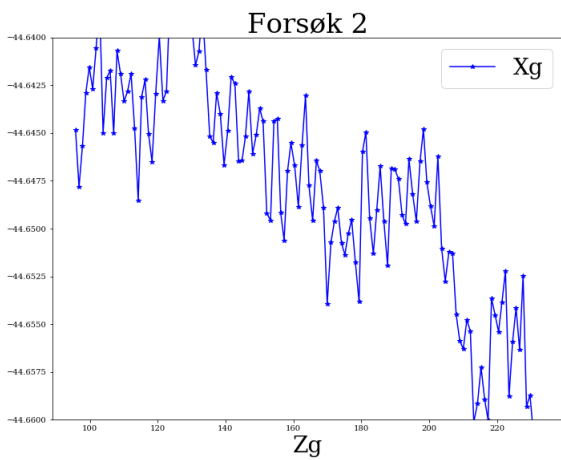
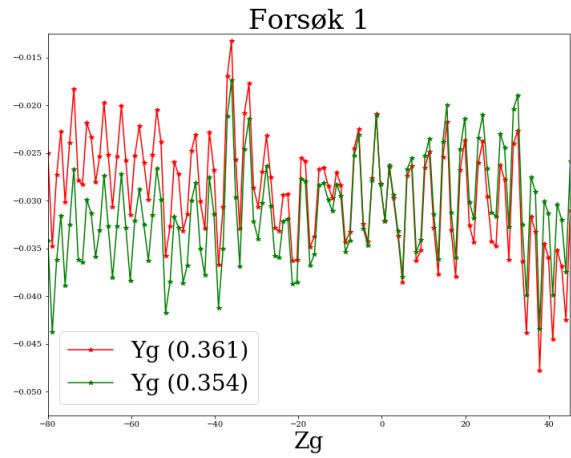
Figur B.9: Forsøk 9



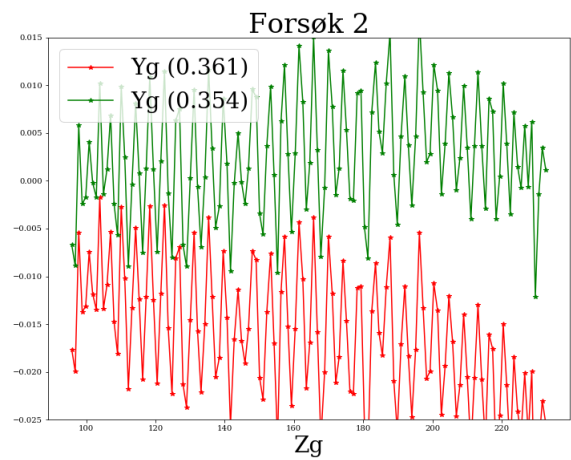
Figur B.10: Forsøk 10

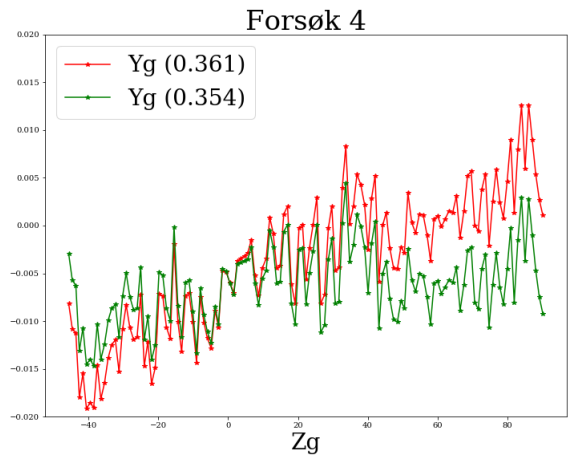
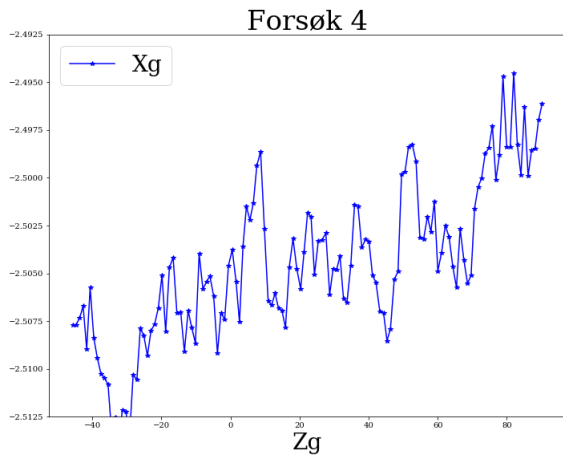


Figur B.11: Forsøk 1

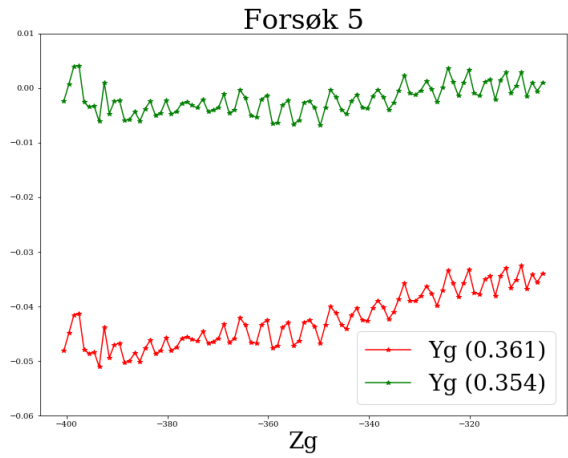
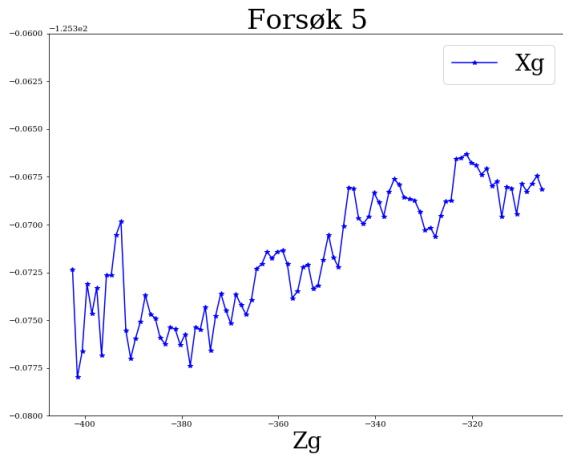


Figur B.12: Forsøk 2

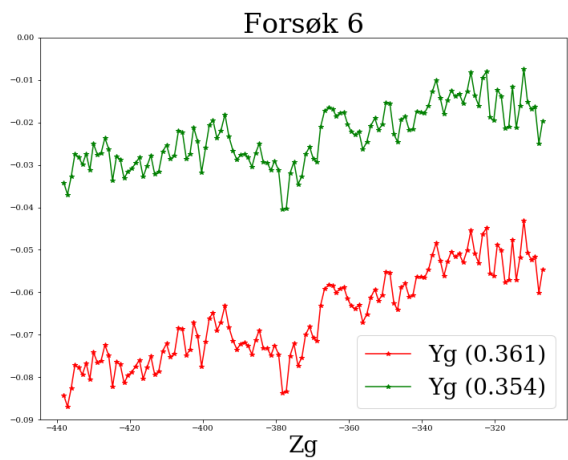
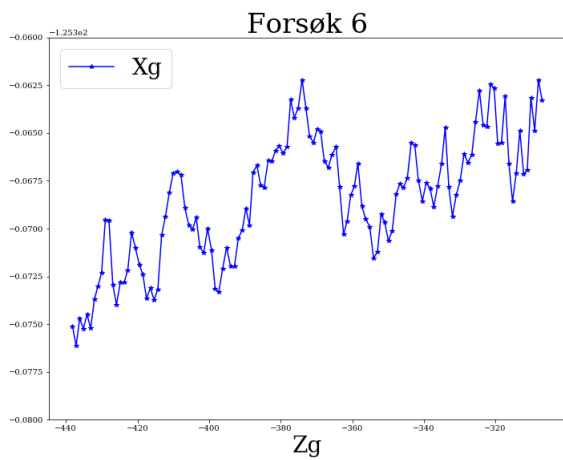




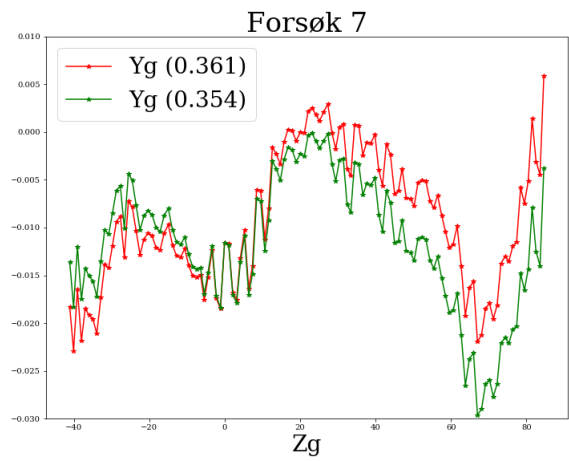
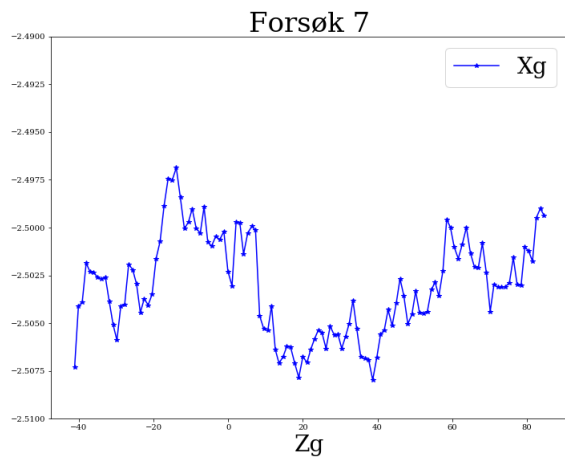
Figur B.13: Forsøk 4



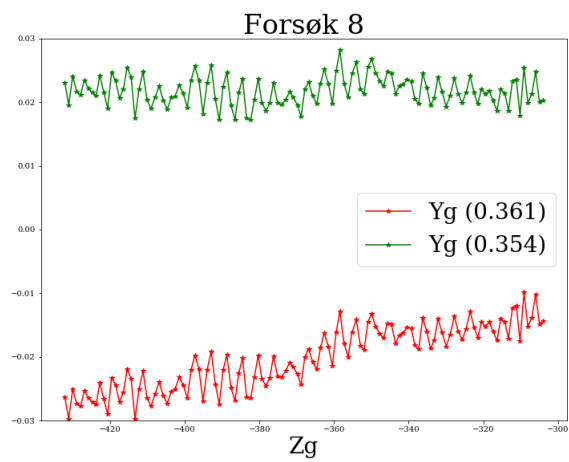
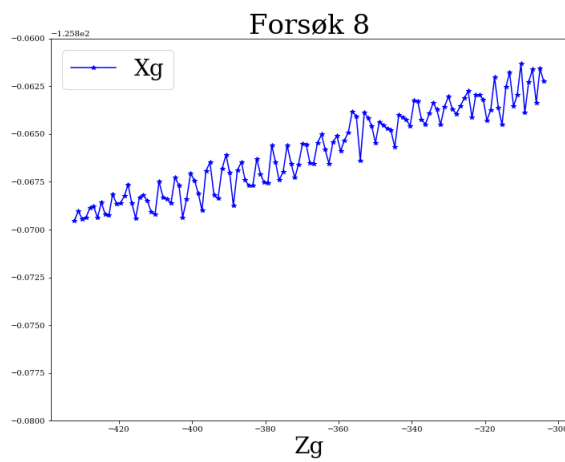
Figur B.14: Forsøk 5



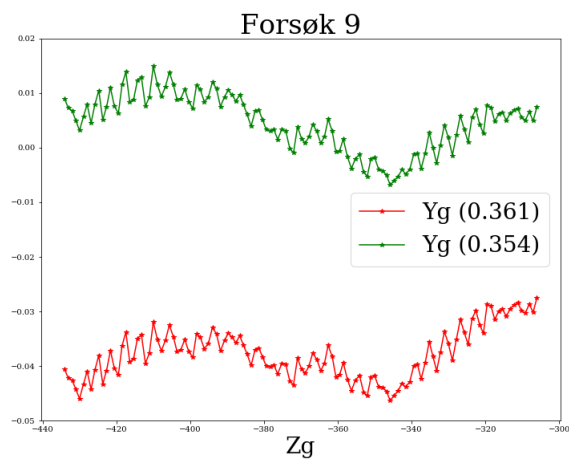
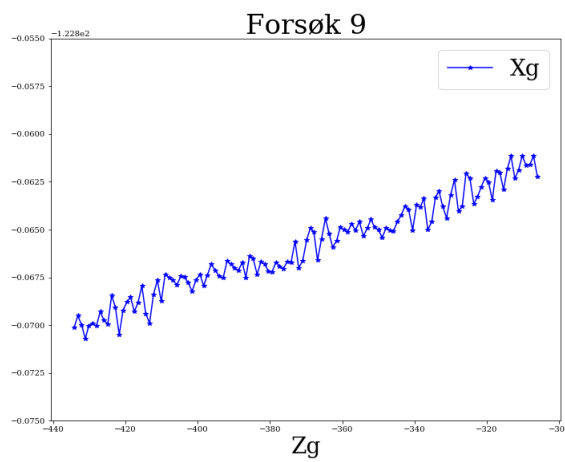
Figur B.15: Forsøk 6



Figur B.16: Forsøk 7



Figur B.17: Forsøk 8

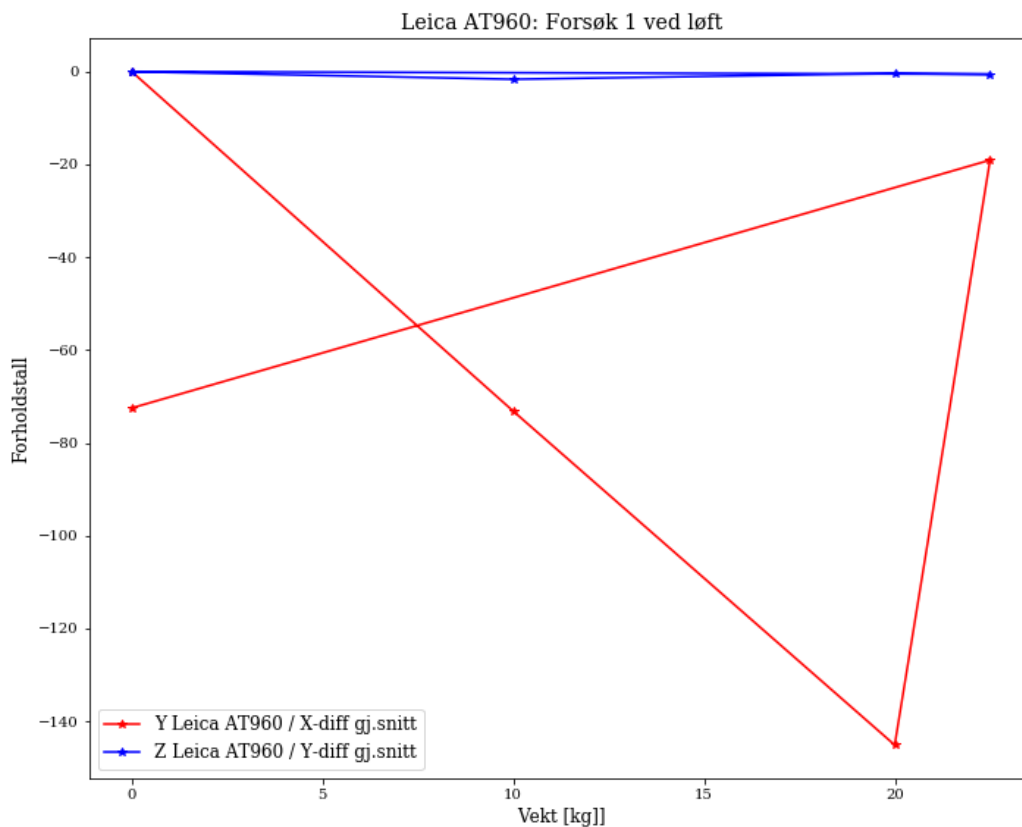


Figur B.18: Forsøk 9

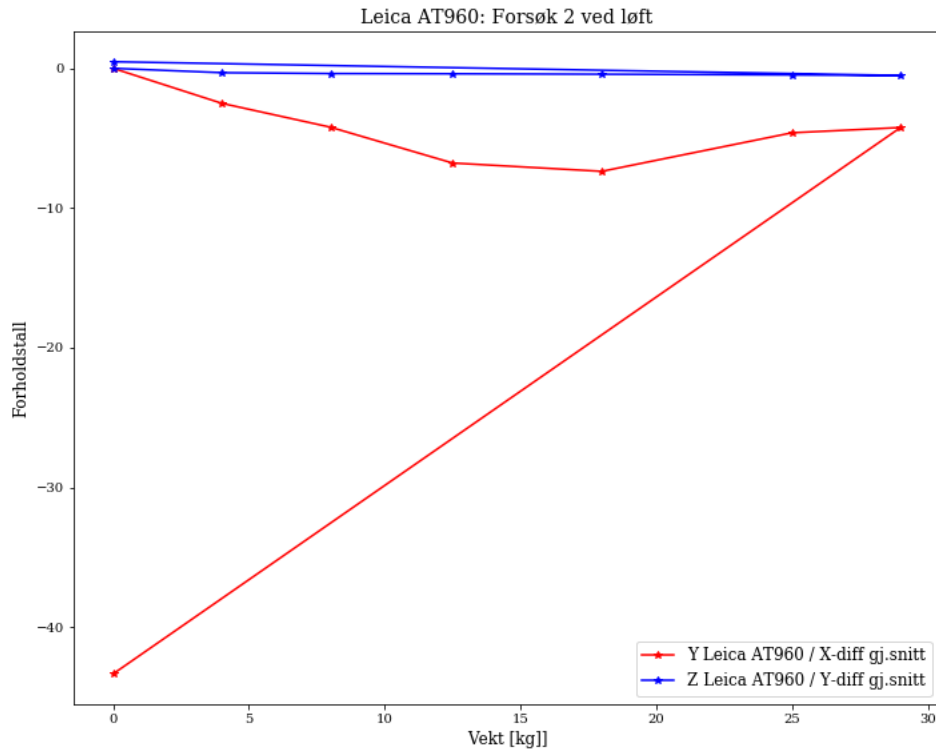
# Tillegg C

## Figurer Kapittel 6

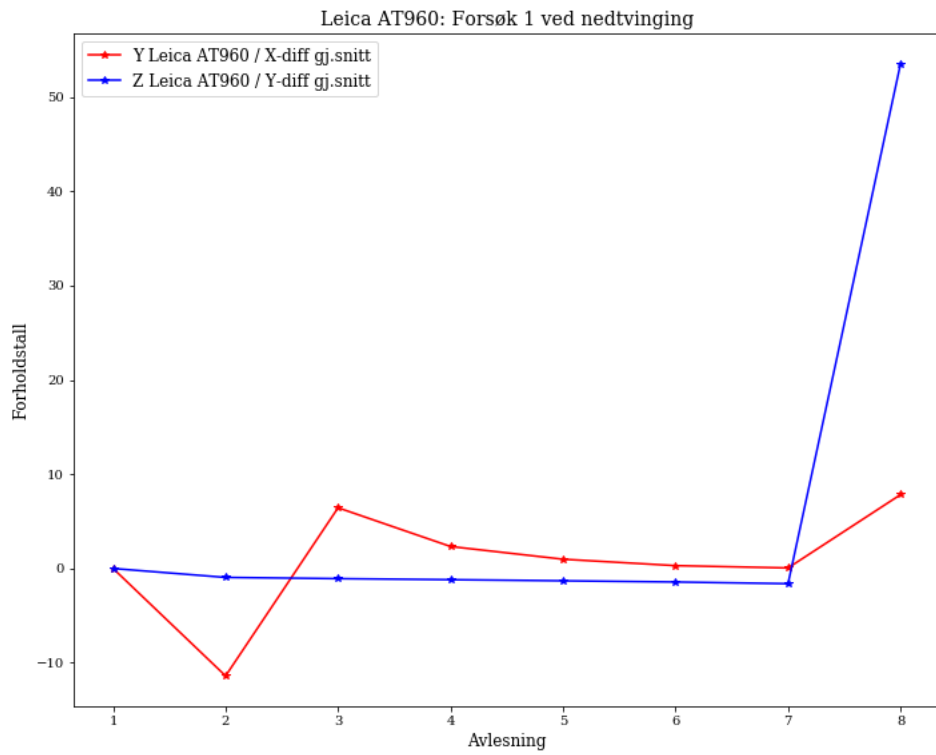
Grunnet skalering av figurer underveis i oppgaven er det avhengig av utskriftstype og format utfordrende å lese aksene på enkelte av figurene i kapittel 6. Det er derfor valgt å legge ved samtlige figurer med større skalering, dersom de ikke benytter seg av full bredde i rapporten.



Figur C.1: Tilsvarende figur 6.2

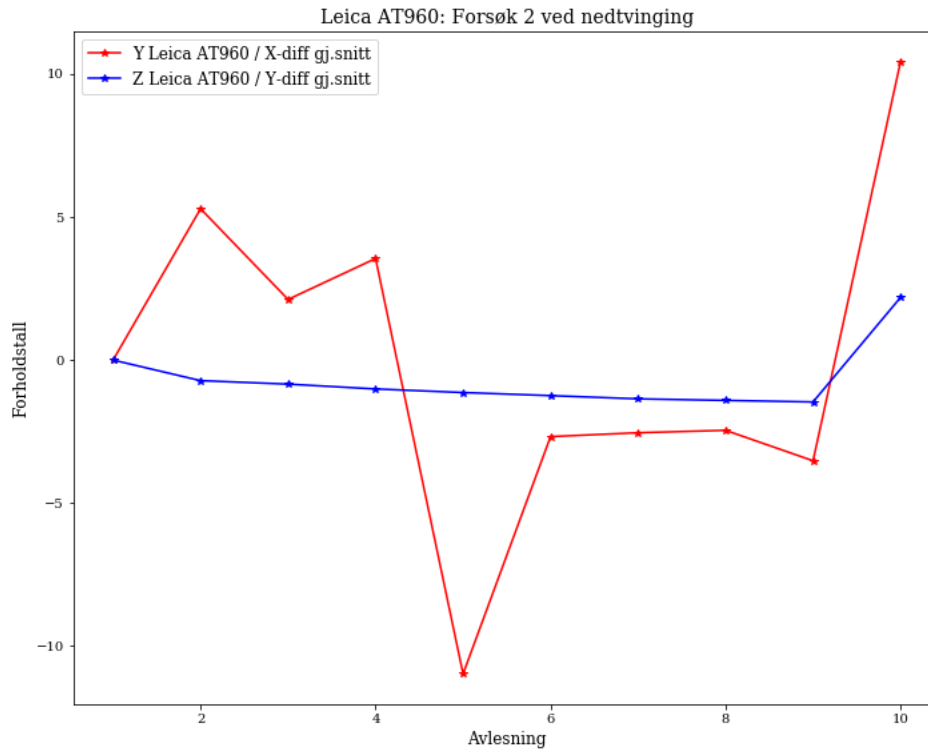


Figur C.2: Tilsvareer figur 6.3

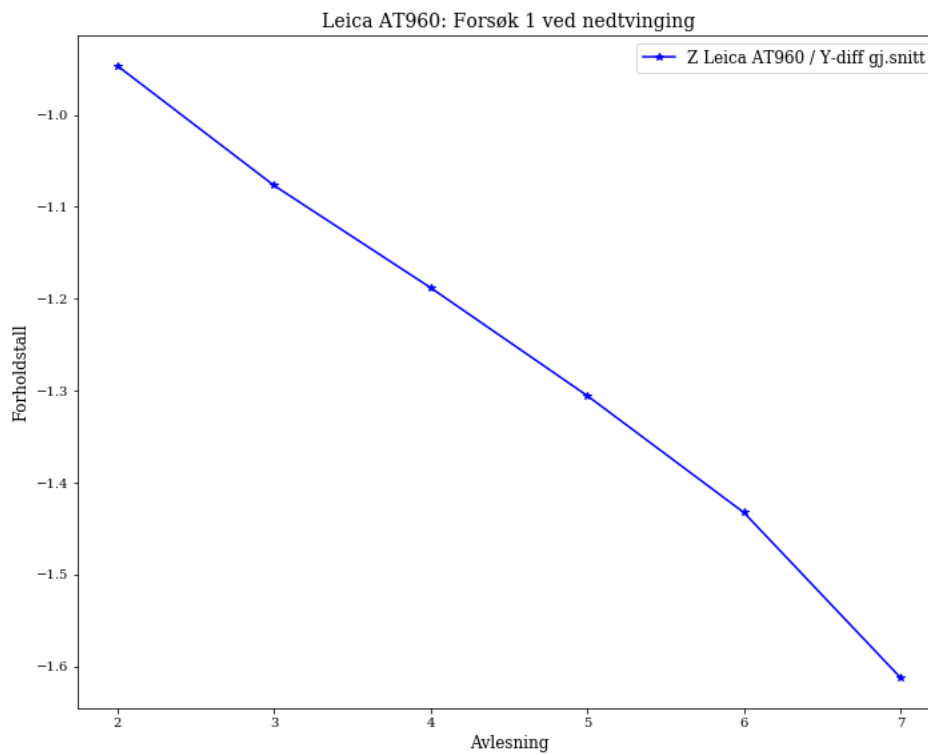


Figur C.3: Tilsvareer figur 6.5

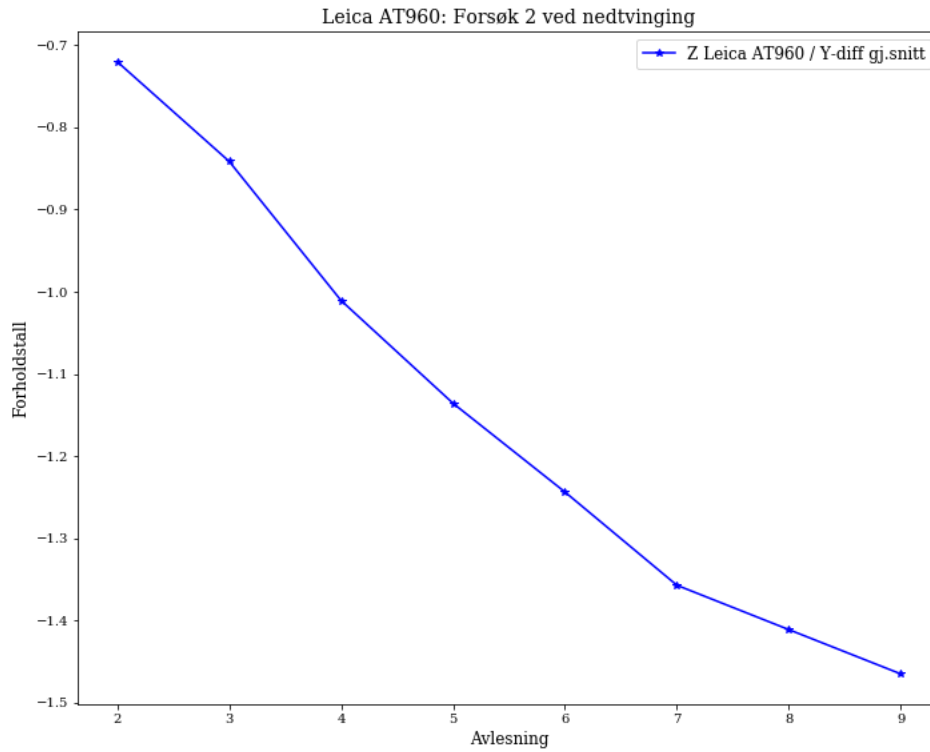




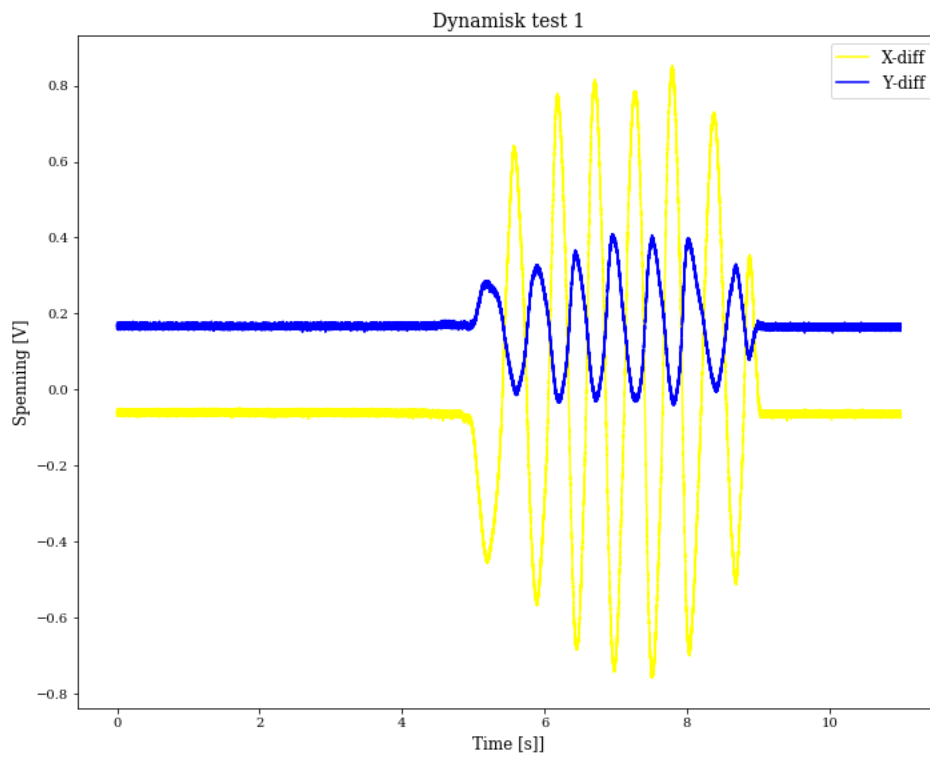
Figur C.4: Tilsvareer figur 6.6



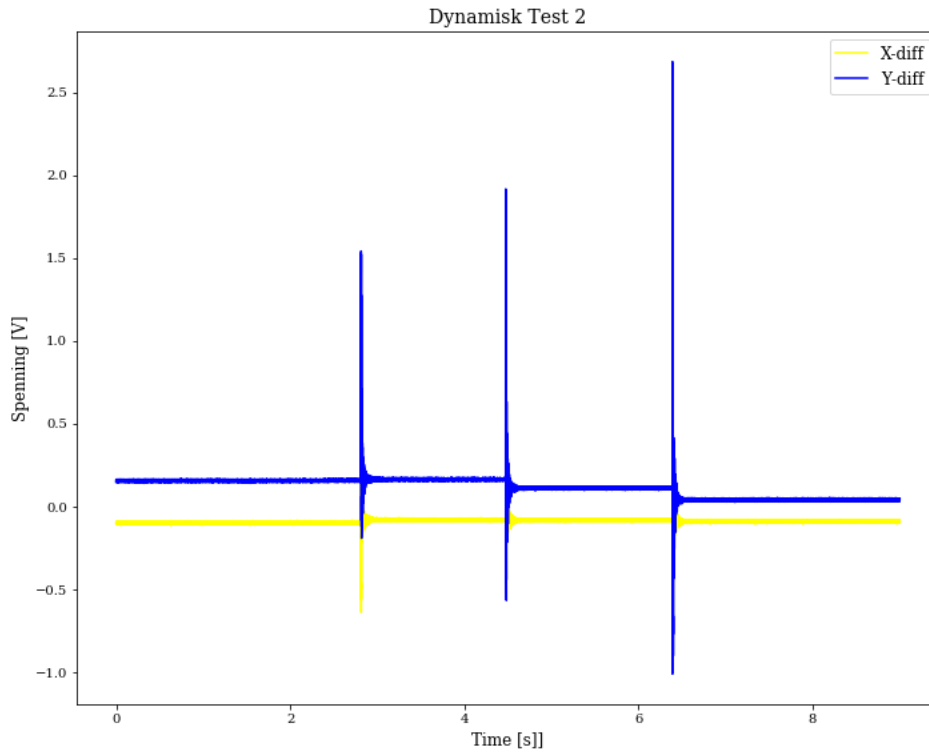
Figur C.5: Tilsvareer figur 6.7



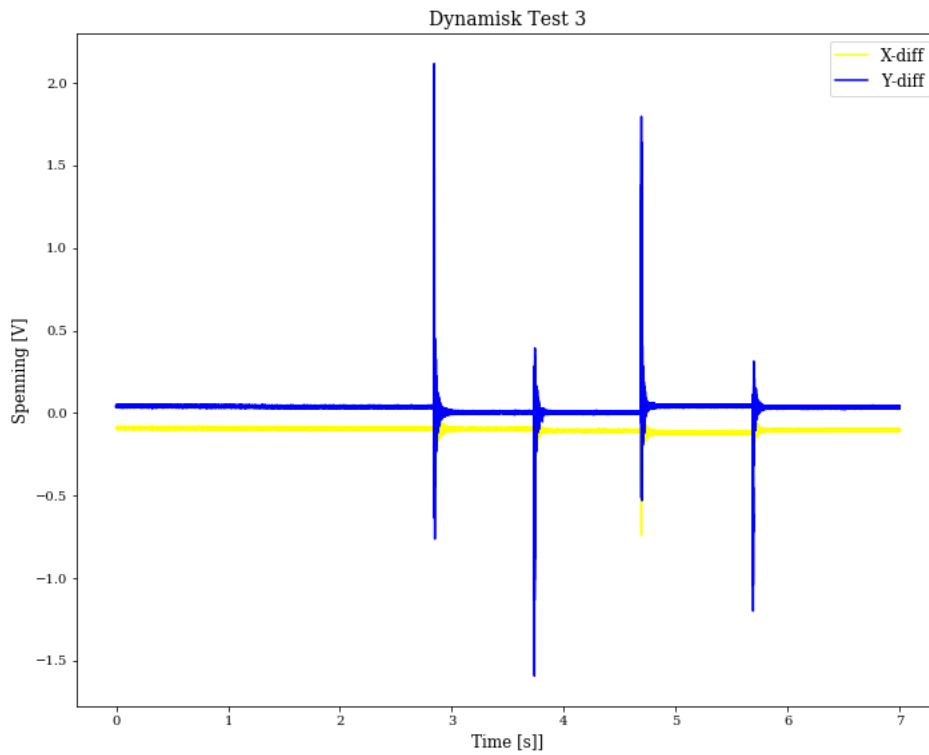
Figur C.6: Tilsvarende figur 6.8



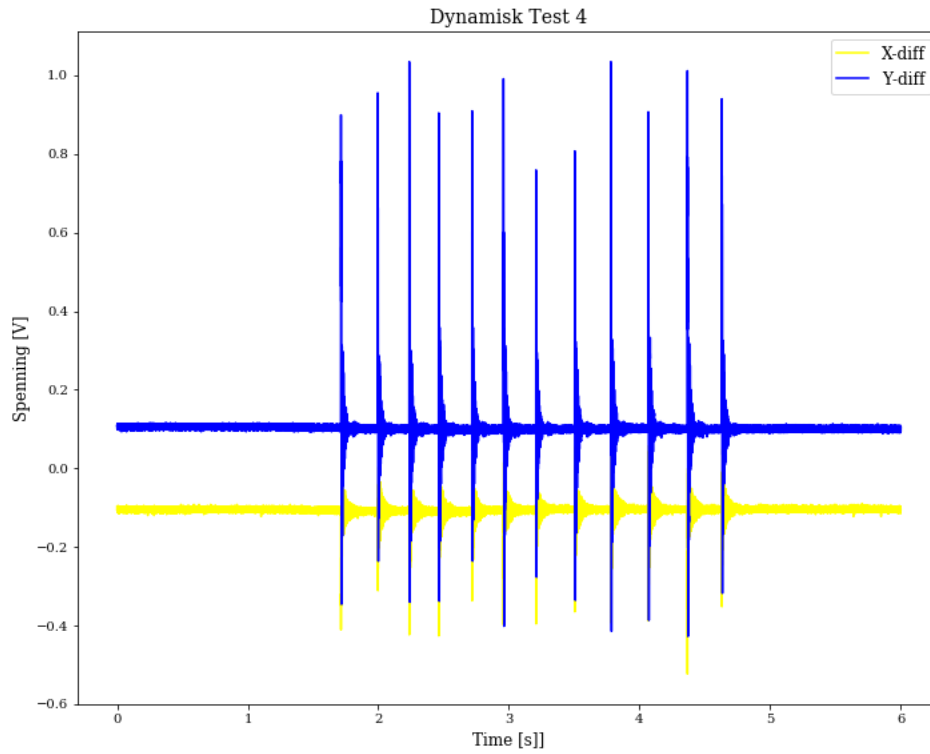
Figur C.7: Tilsvarende figur 6.9



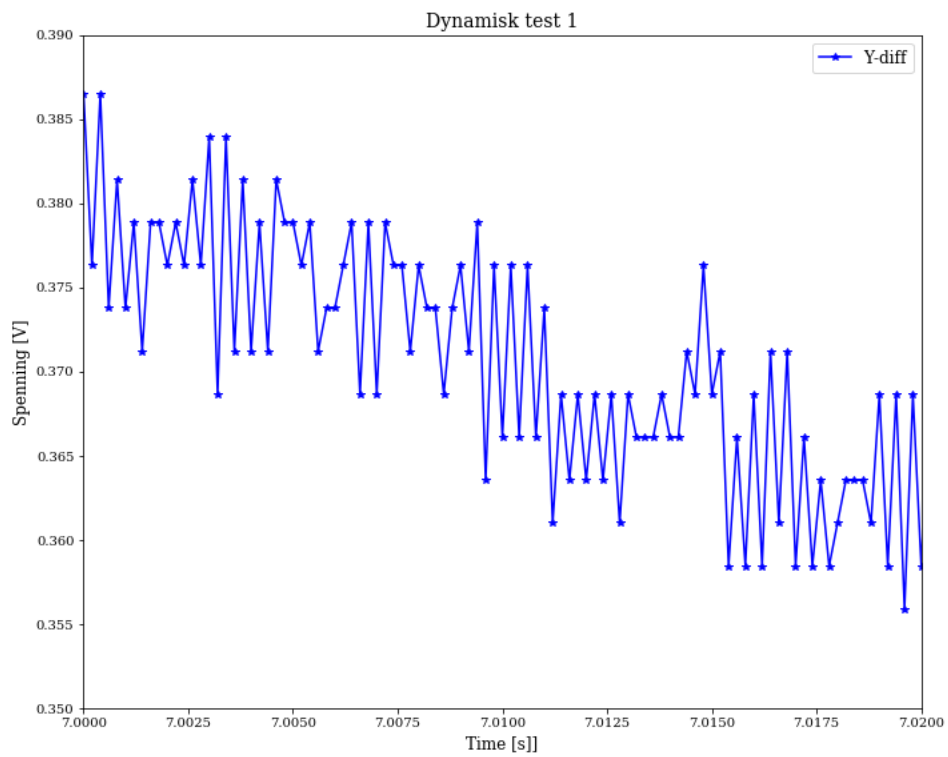
Figur C.8: Tilsvareer figur 6.10



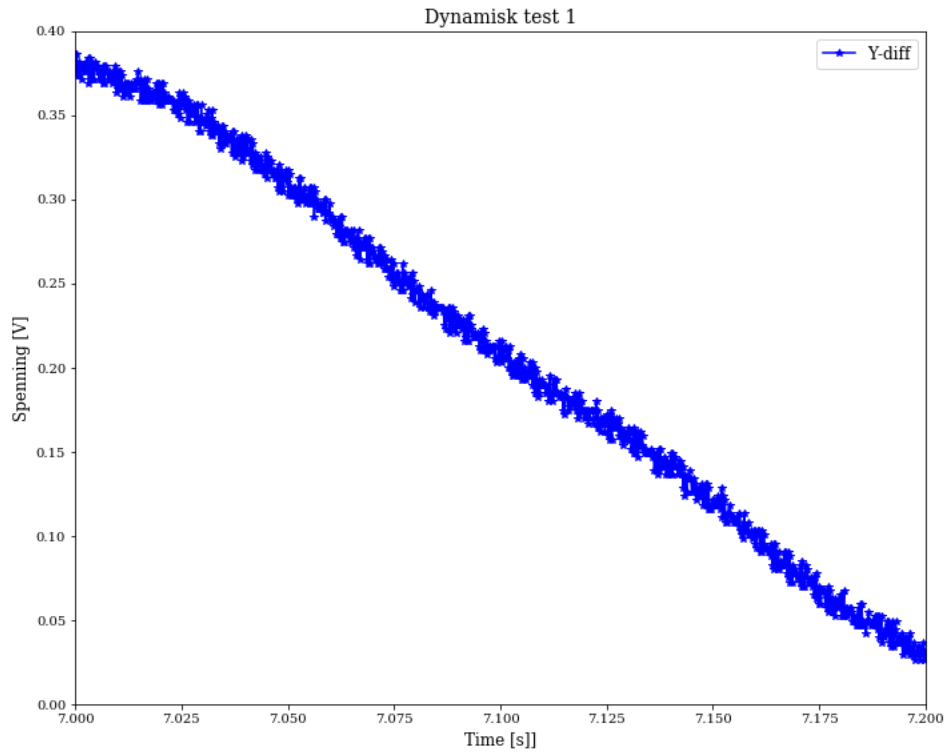
Figur C.9: Tilsvareer figur 6.11



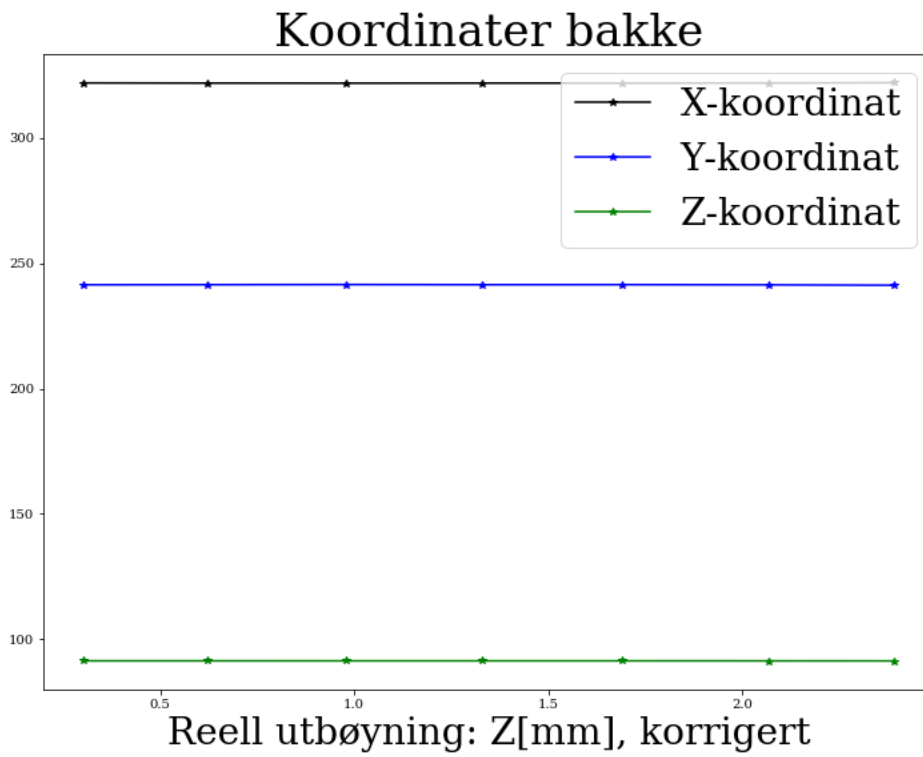
Figur C.10: Tilsvareer figur 6.12



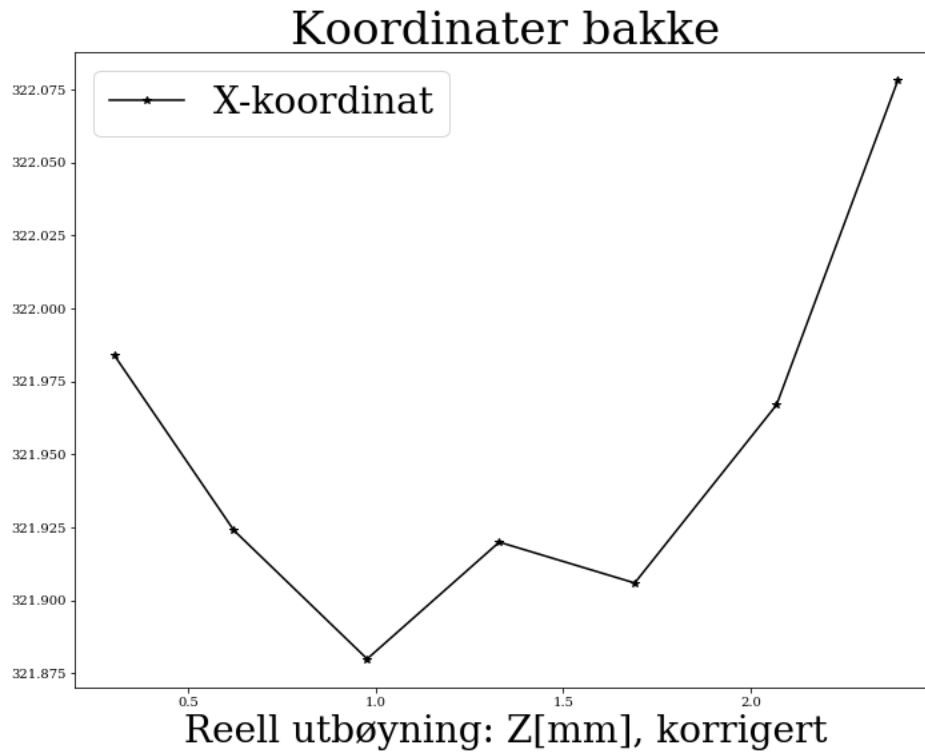
Figur C.11: Tilsvareer figur 6.15



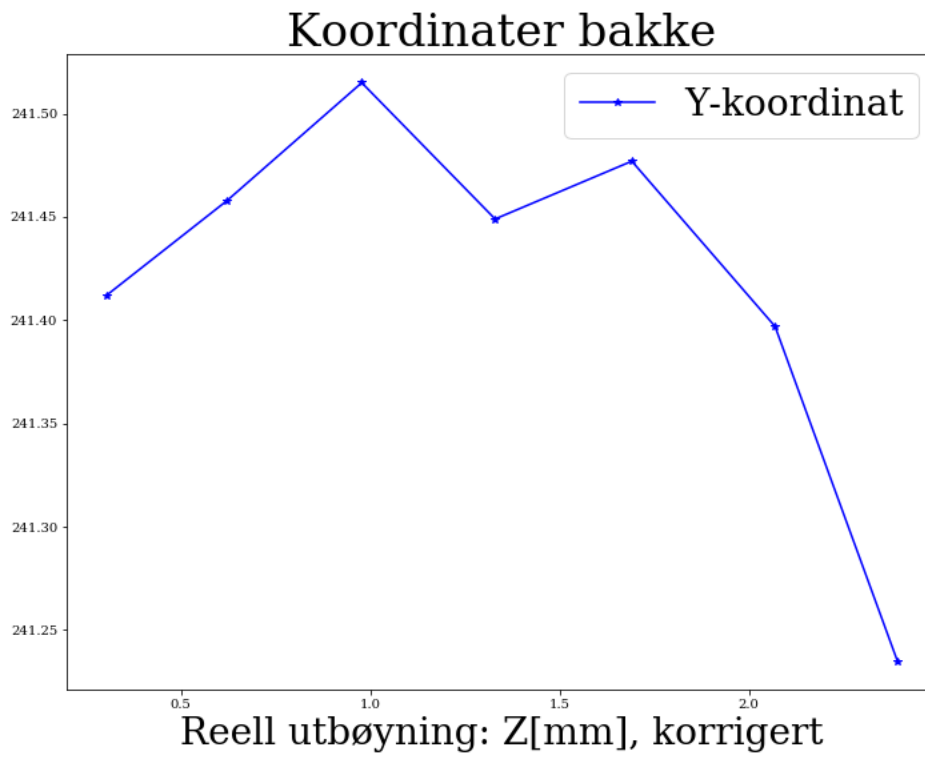
Figur C.12: Tilsvarende figur 6.16



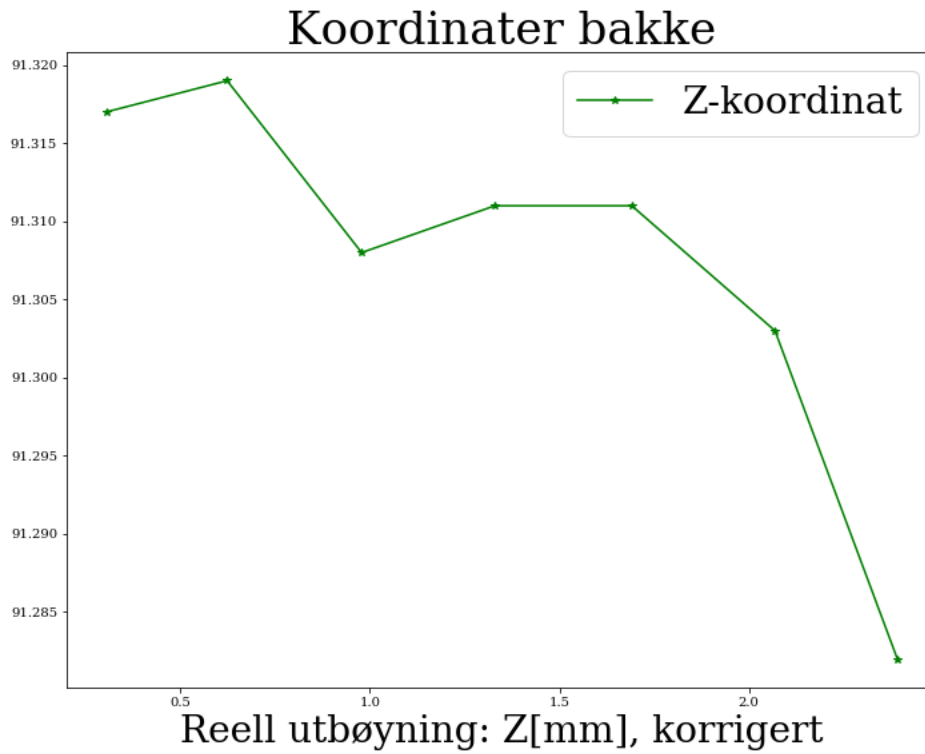
Figur C.13: Tilsvarende figur 6.19



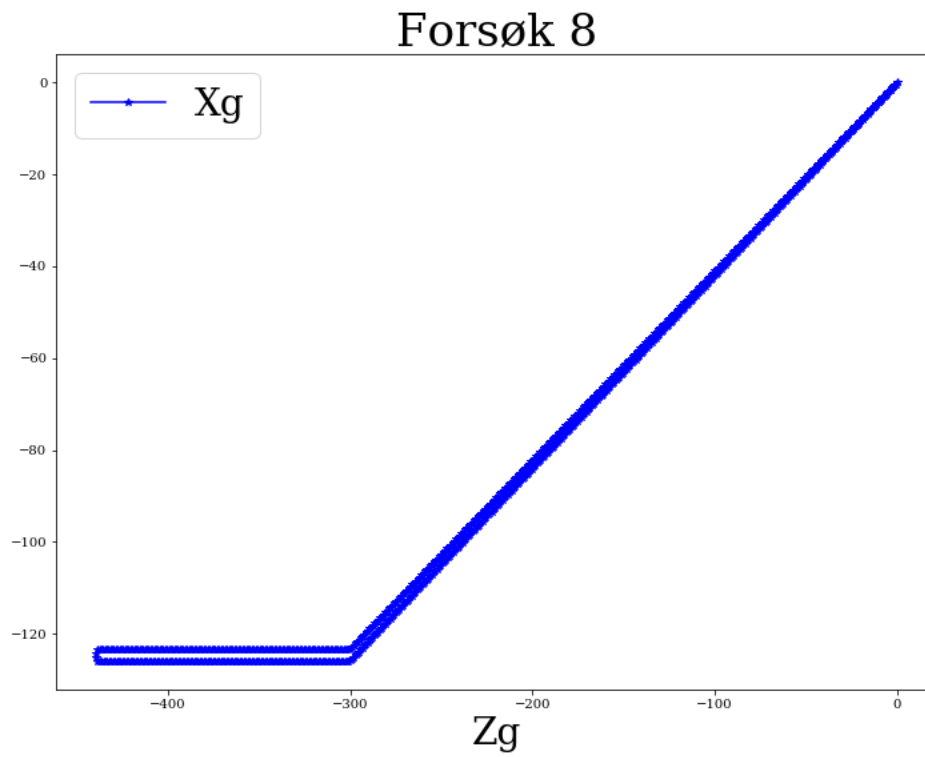
Figur C.14: Tilsvarende figur 6.20



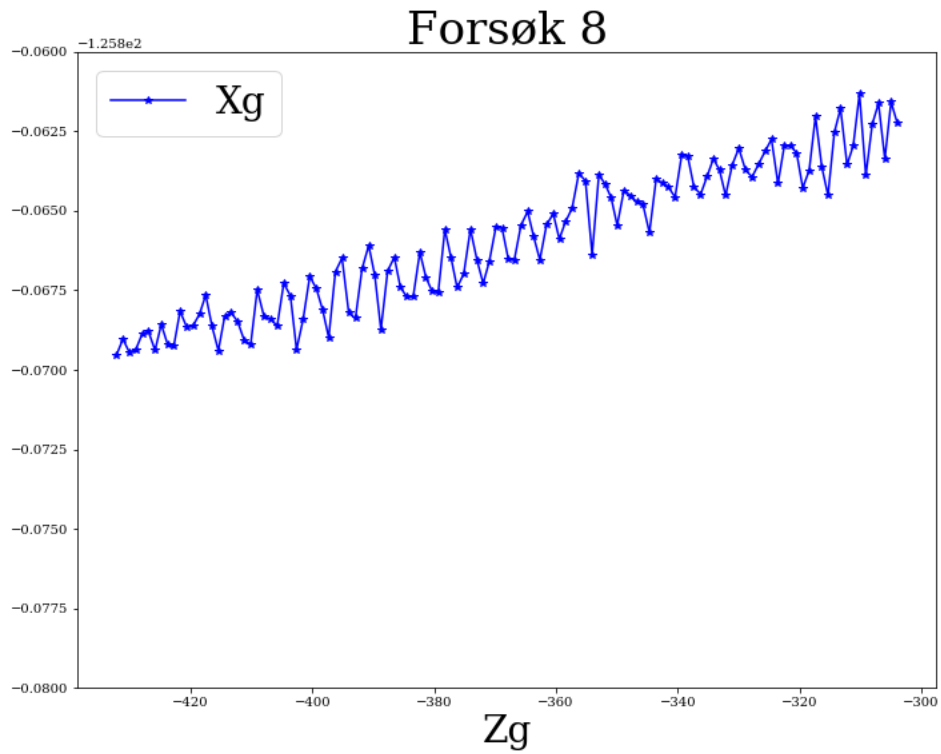
Figur C.15: Tilsvarende figur 6.21



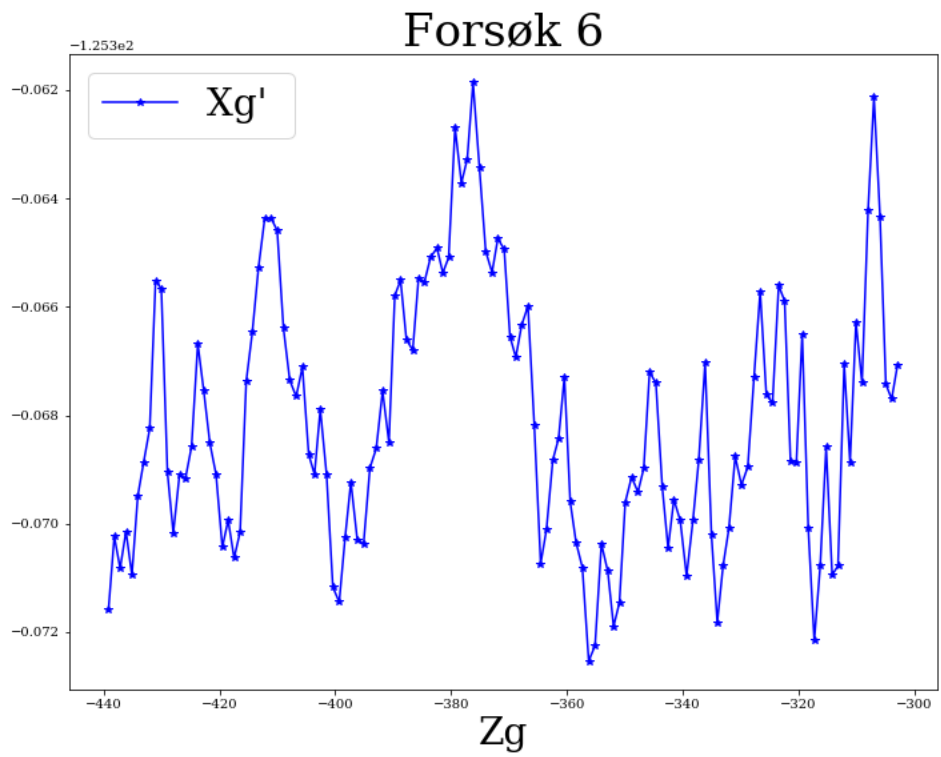
Figur C.16: Tilsvarende figur 6.22



Figur C.17: Tilsvarende figur 6.27

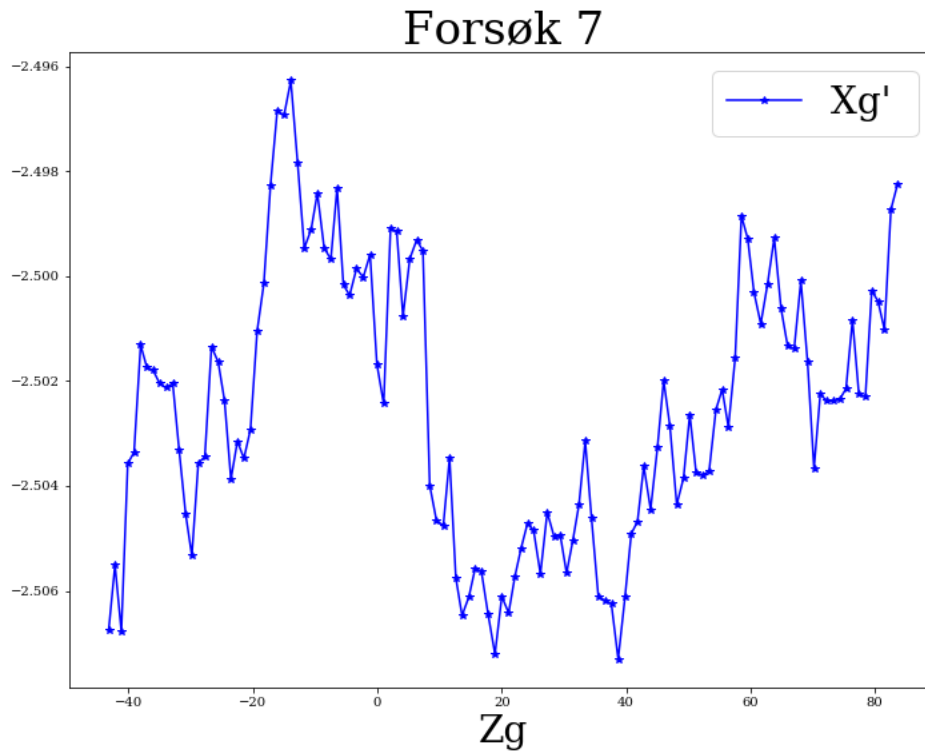


Figur C.18: Tilsvareer figur 6.28

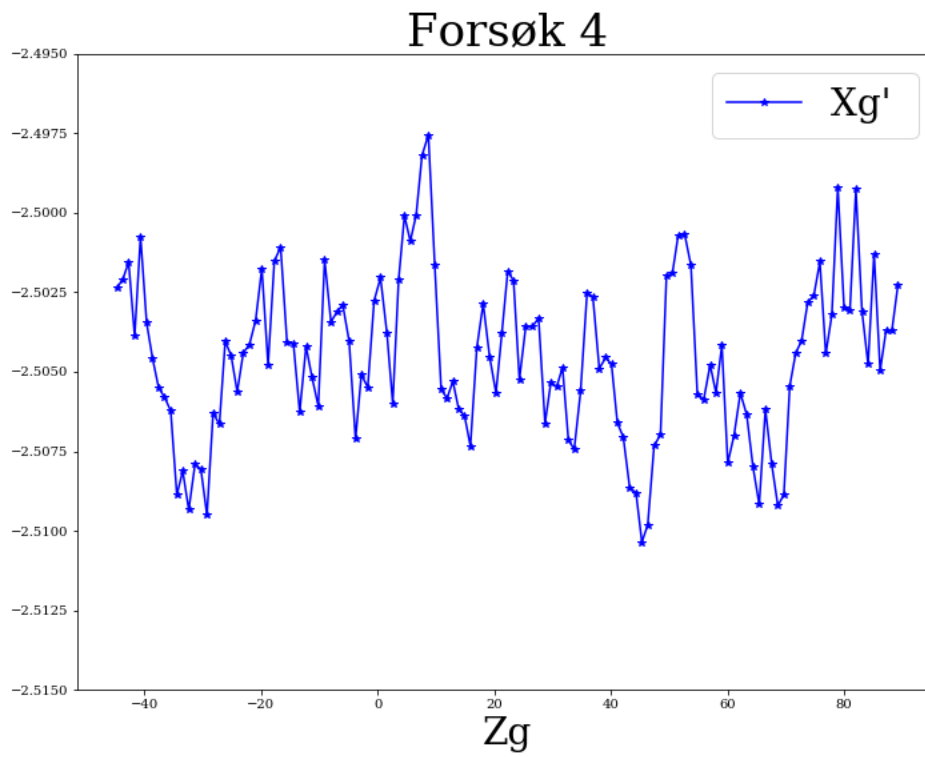


Figur C.19: Tilsvareer figur 6.31

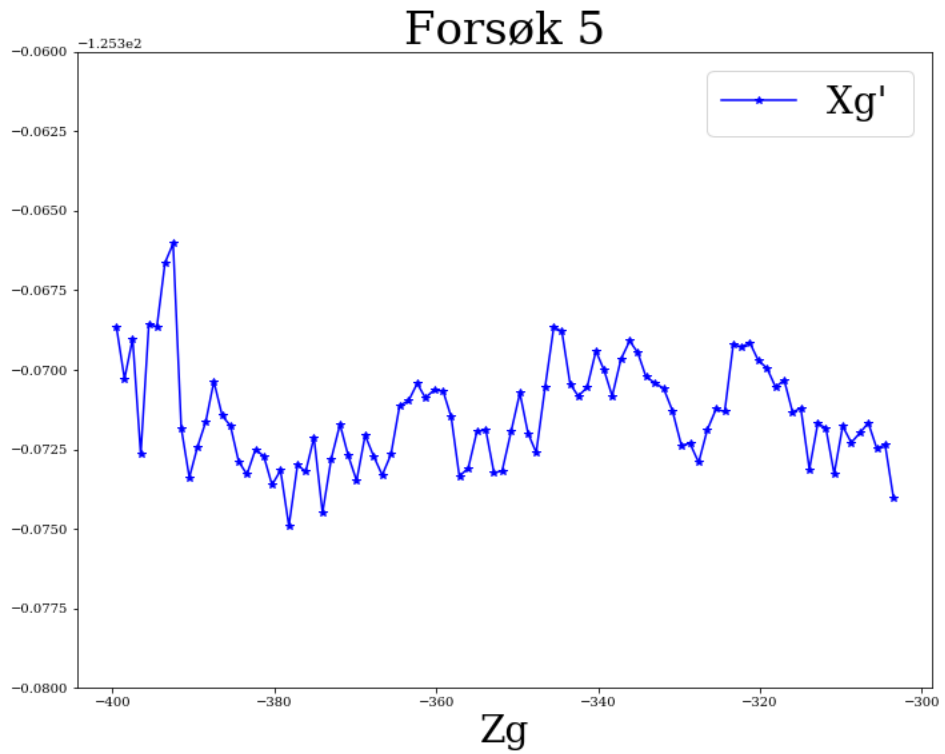




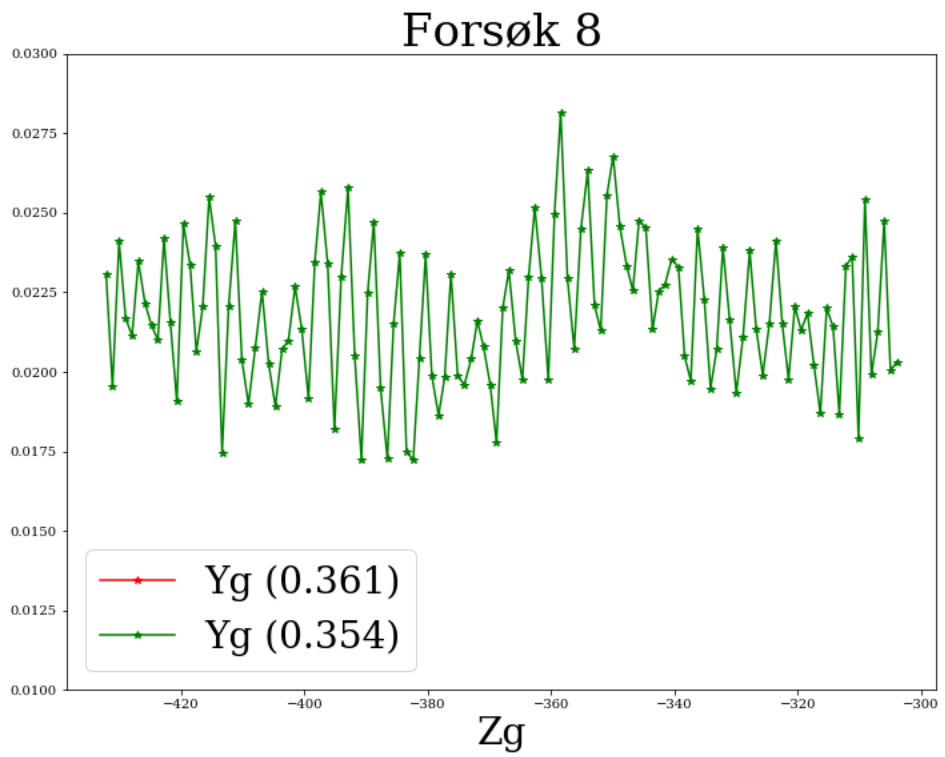
Figur C.20: Tilsvareer figur 6.32



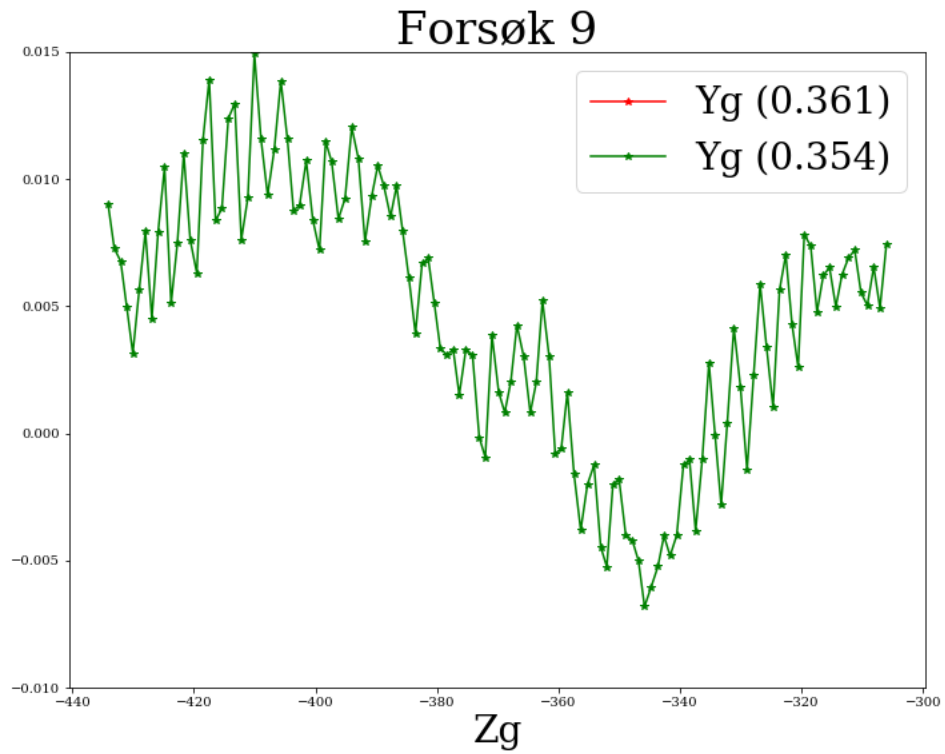
Figur C.21: Tilsvareer figur 6.33



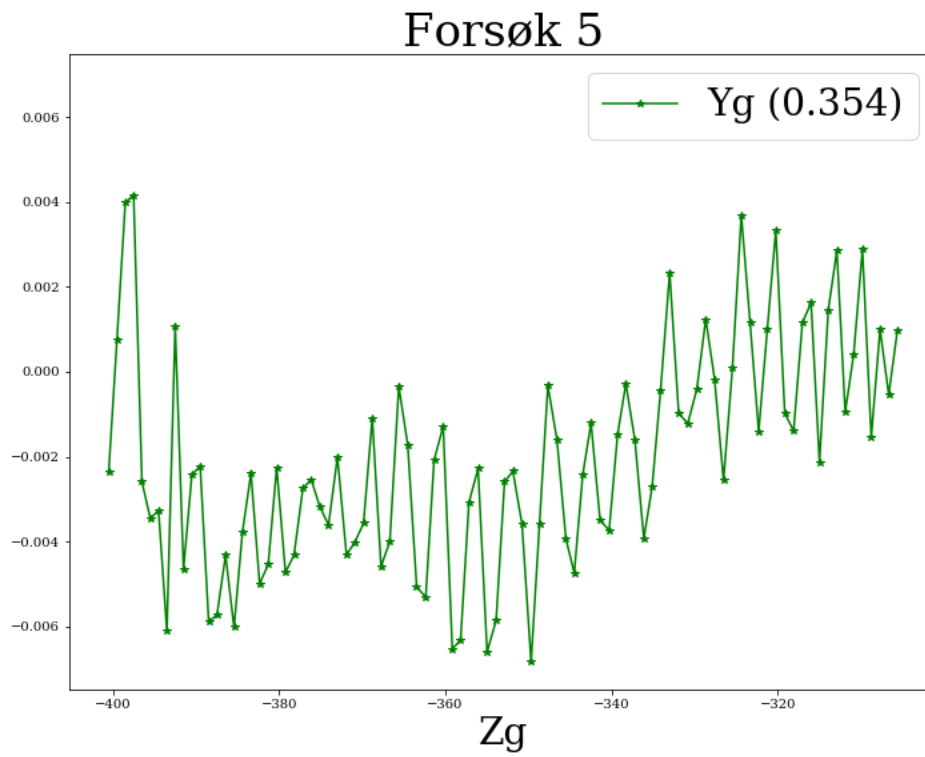
Figur C.22: Tilsvareer figur 6.34



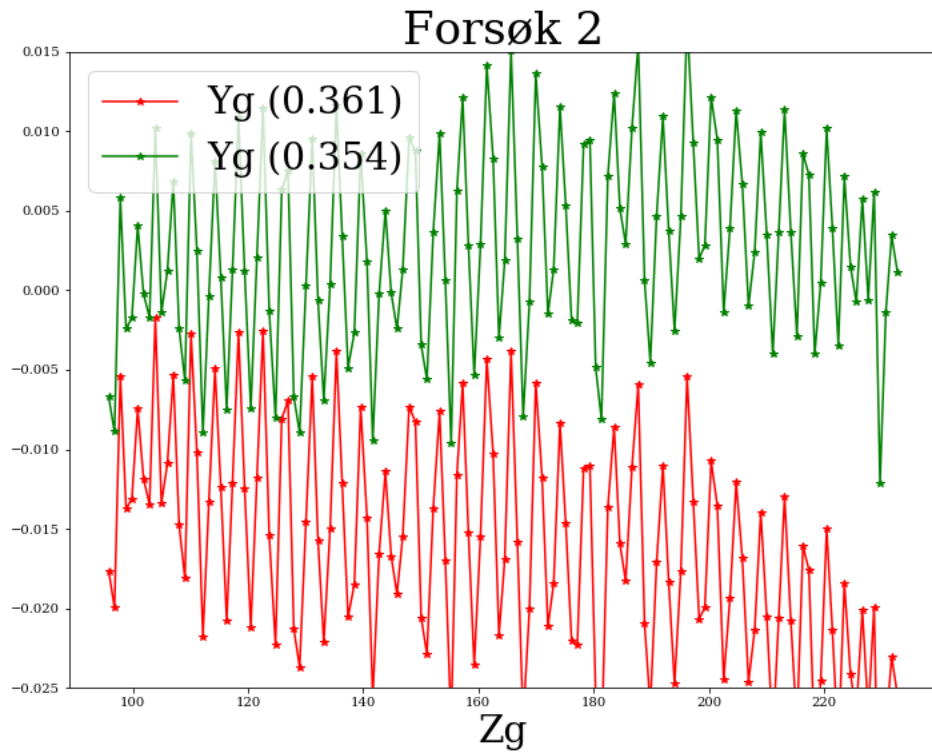
Figur C.23: Tilsvareer figur 6.35



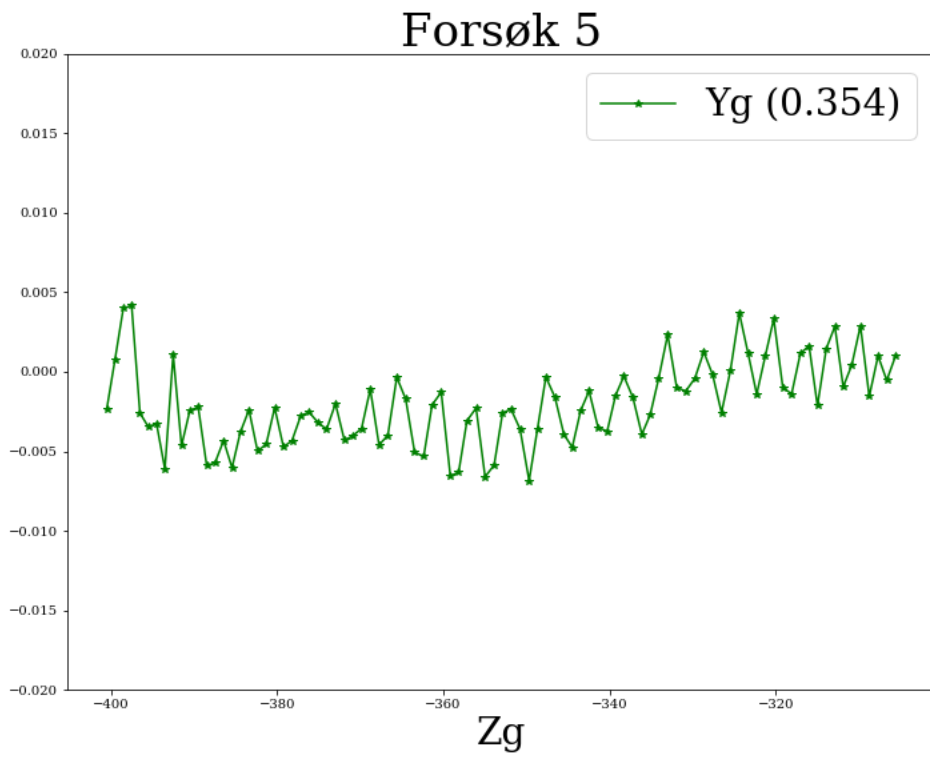
Figur C.24: Tilsvarende figur 6.36



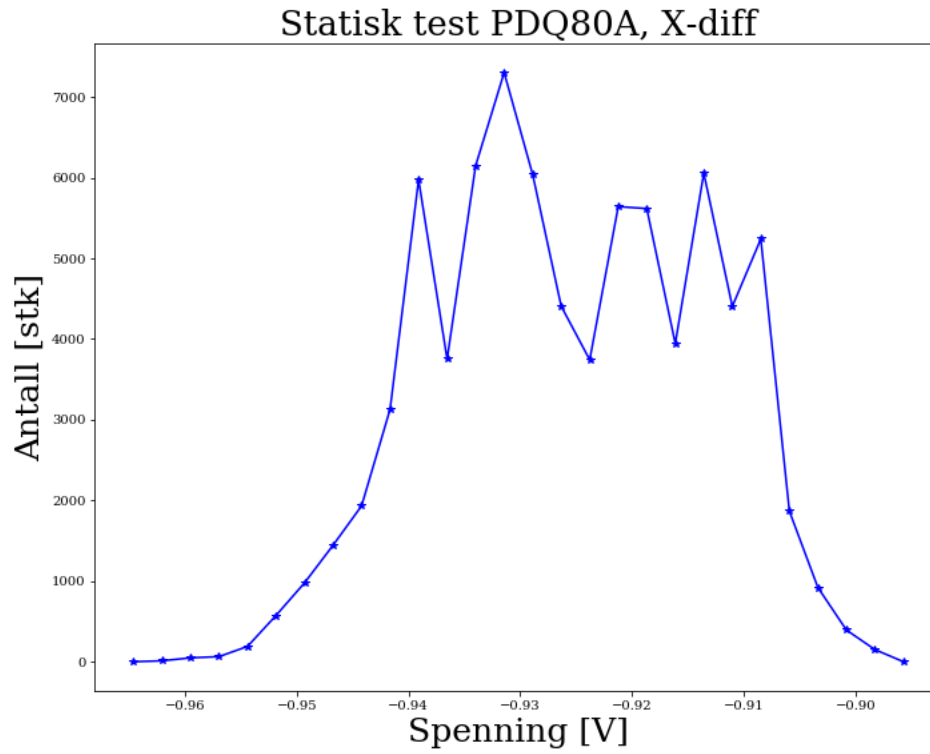
Figur C.25: Tilsvarende figur 6.37



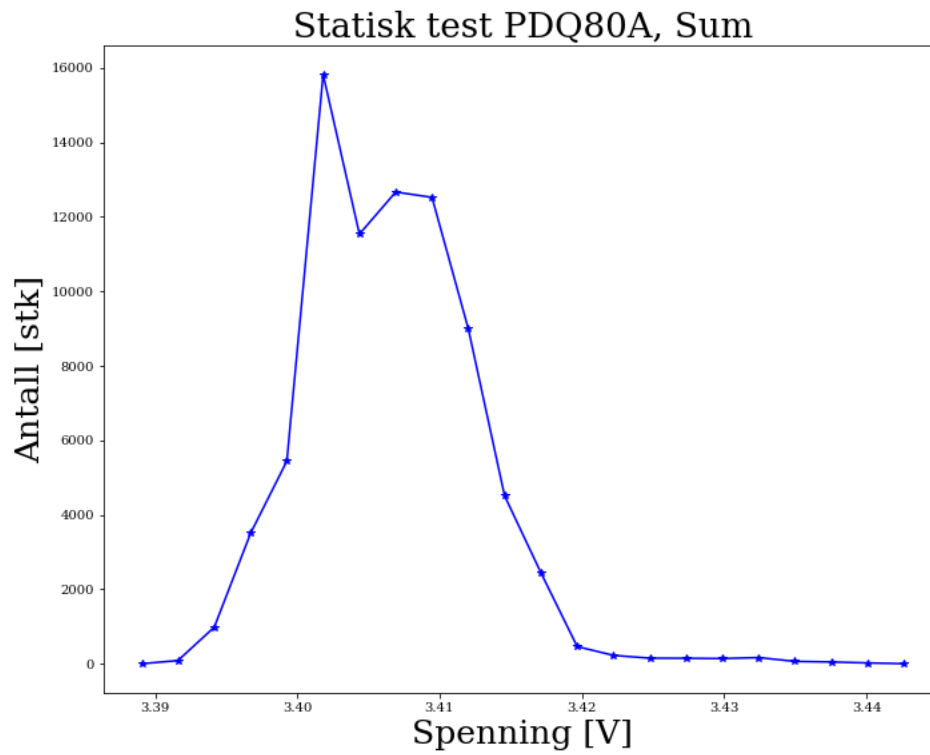
Figur C.26: Tilsvarende figur 6.38



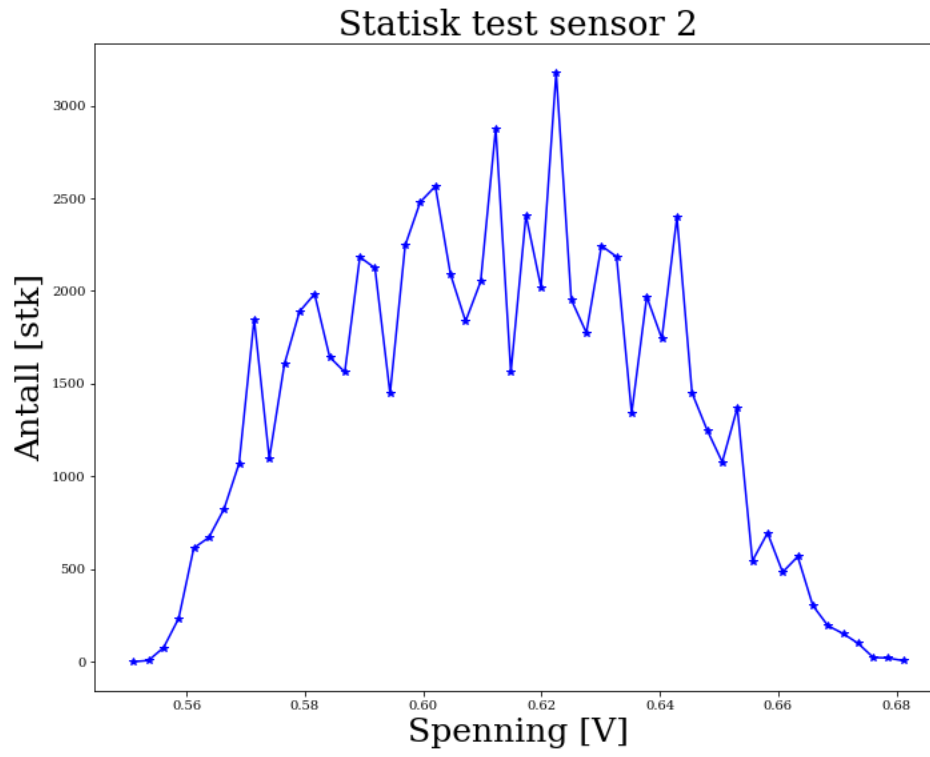
Figur C.27: Tilsvarende figur 6.39



Figur C.28: Tilsvareer figur 6.40



Figur C.29: Tilsvareer figur 6.41

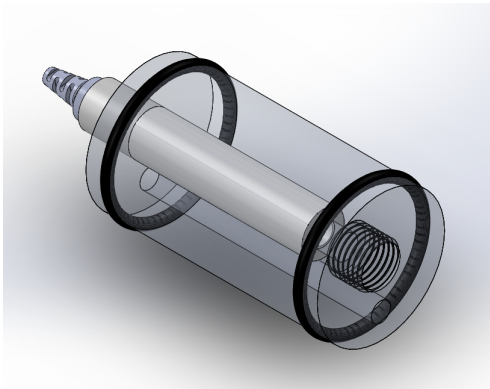


Figur C.30: Tilsvarende figur 6.42

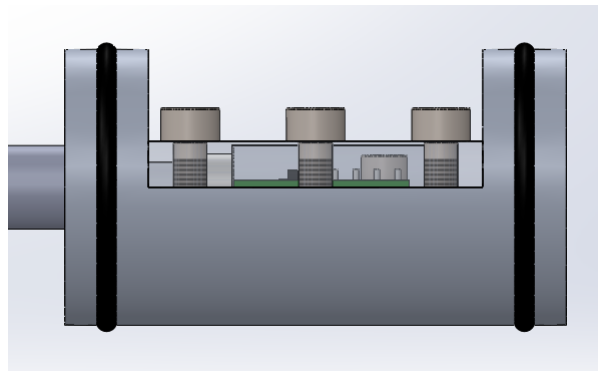
# Tillegg D

## Skisser innbygging

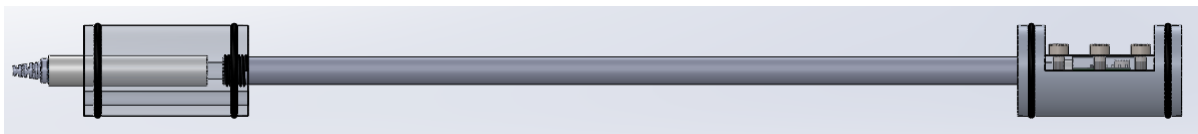
### Forslag 1



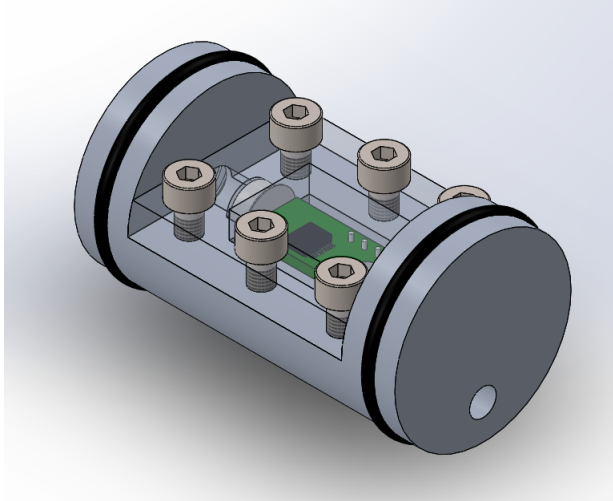
Figur D.1: Forslag 1



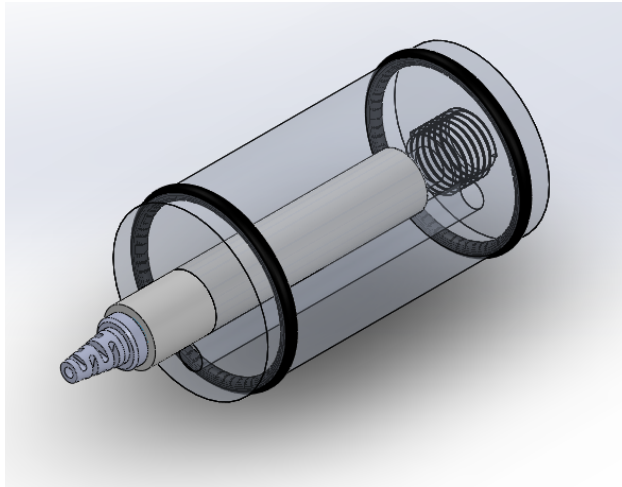
Figur D.2: Forslag 1



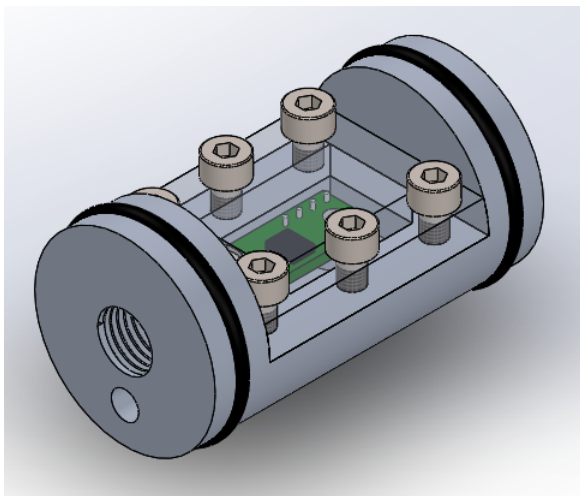
Figur D.3: Forslag 1



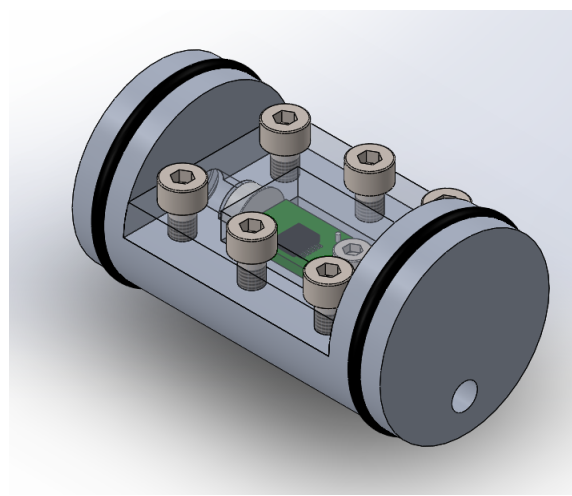
Figur D.4: Forslag 1



Figur D.5: Forslag 1



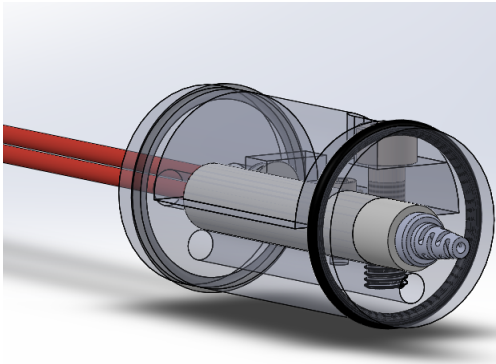
Figur D.6: Forslag 1



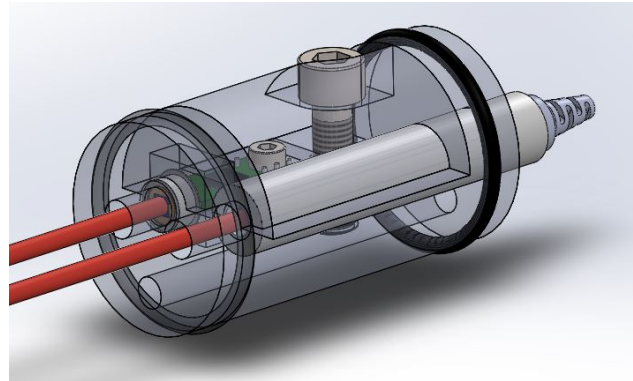
Figur D.7: Forslag 1



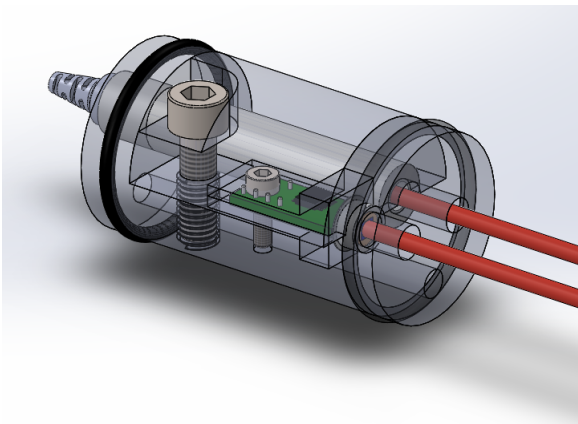
## Forslag 2



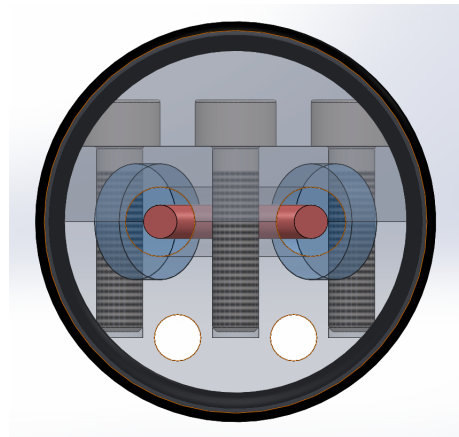
Figur D.8: Forslag 2



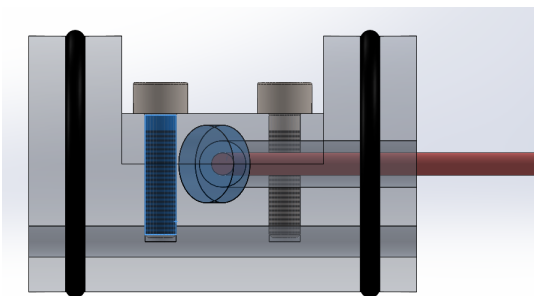
Figur D.9: Forslag 2



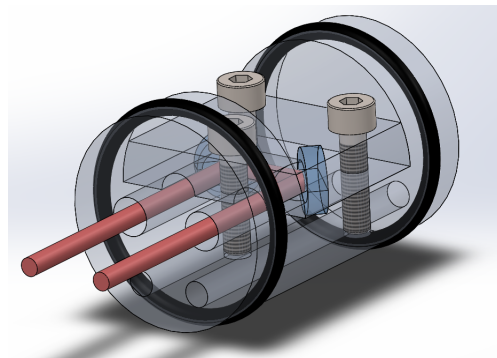
Figur D.10: Forslag 2



Figur D.11: Forslag 2

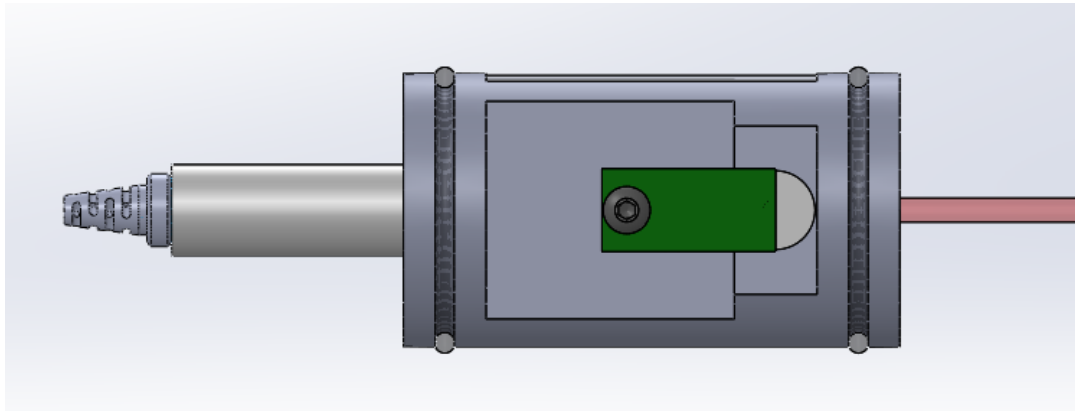


Figur D.12: Forslag 2

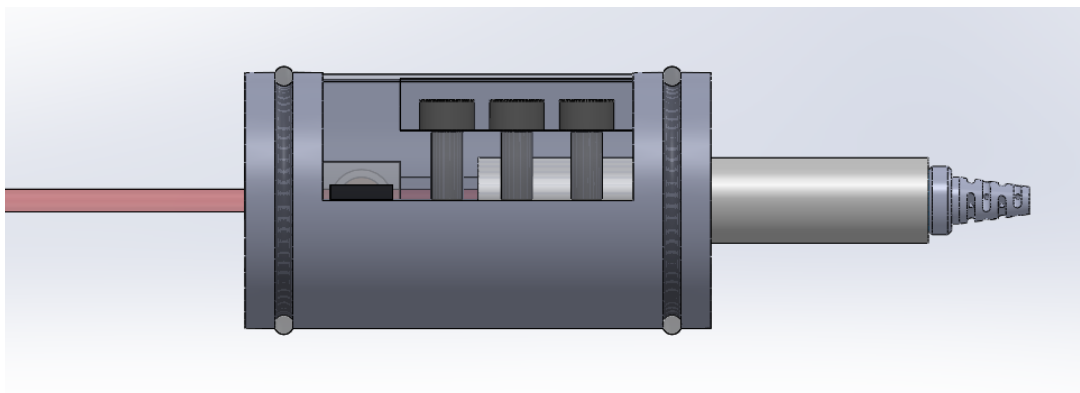


Figur D.13: Forslag 2

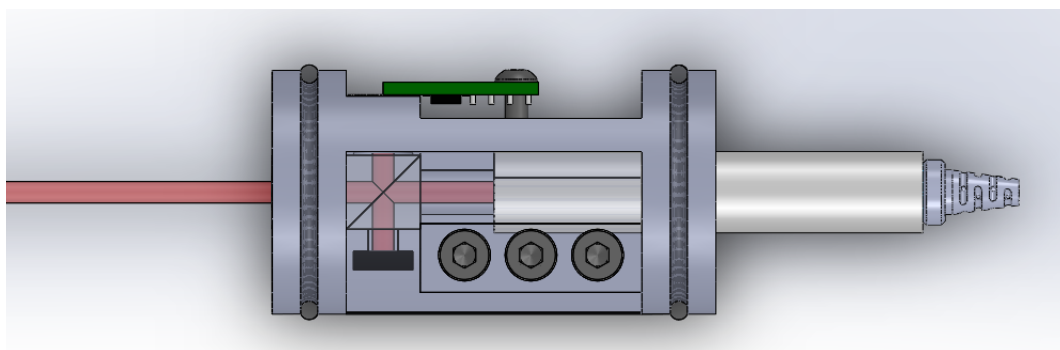
### Forslag 3



Figur D.14: Forslag 3, sett fra høyre



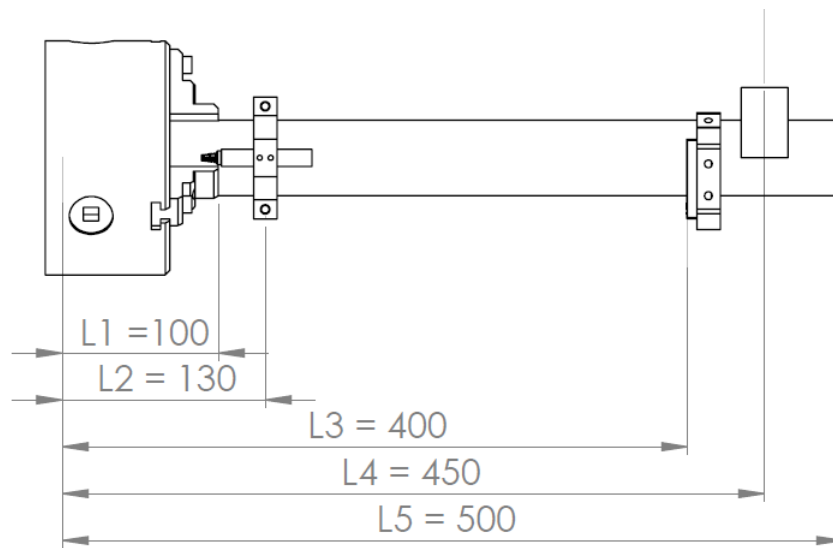
Figur D.15: Forslag 3, sett fra venstre



Figur D.16: Forslag 3, sett ovenfra

# Tillegg E

## Mathcad, Utbøyning av borstang



Figur E.1

## Overlagsberegninger, nedbøyning av borstang

$$E := 210000 \text{ MPa}$$

$$L_1 := 500 \text{ mm}$$

$$D := 48.3 \text{ mm}$$

$$L_2 := 100 \text{ mm}$$

$$d := 41.8 \text{ mm}$$

$$L_3 := \frac{60}{2} \text{ mm} + L_2 = 130 \text{ mm}$$

$$v := 0.3$$

$$L_4 := 400 \text{ mm}$$

$$P := 900 \text{ N}$$

$$L_5 := 450 \text{ mm}$$

L1 = totallengde

L2 = oppspenningslengde

L3 = lengde fra ende av rør til laser

L4 = lengde fra ende av rør til målingspunkt

L5 = lengde fra ende av rør til lastpunkt

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + v)} = 80769 \text{ MPa}$$

$$I_x := \frac{D^4 - d^4}{64} \cdot \pi = 117296 \text{ mm}^4$$

### Nedbøyning av målepunkt sett opp mot enden av bakker (s52 TT)

$$L_p := L_5 - L_2 = 350 \text{ mm}$$

$$y_4 := \frac{P \cdot L_p^3}{3 \cdot E \cdot I_x} = 0.522 \text{ mm}$$

$$\theta := \frac{P \cdot L_p^2}{2 \cdot E \cdot I_x} = 0.002 \text{ rad}$$

$$\theta = 0.128 \text{ deg}$$

### Nedbøyning av laser sett opp mot enden av bakker (s52 TT)

$$L_l := L_3 - L_2 = 30 \text{ mm}$$

$$x := L_p - L_l = 320 \text{ mm}$$

$$y_3 := \frac{1}{6} \cdot \frac{P \cdot L_p^3}{E \cdot I_x} \cdot \left( 2 - 3 \cdot \frac{x}{L_p} + \frac{x^3}{L_p^3} \right) = 0.00559027 \text{ mm}$$

Siden det ikke står noen formel for vinkelendring på dette punktet, må man regne seg baklengs som om kraften er påsatt vel  $L_1$ . Bytter ut  $w$  med  $y$  i formelen, og får da ut  $P_{sim}$ , som er den simulerte kraften man må påføre en lengde  $L_1$  (30 mm) fra bakkene for å få samme nedbøyning for laseren. Bruker så dette for å beregne utgangsvinkelen til laseren.

$$P_{sim} := \frac{y_3 \cdot 3 \cdot E \cdot I_x}{L_1^3} = 15300 \text{ N}$$

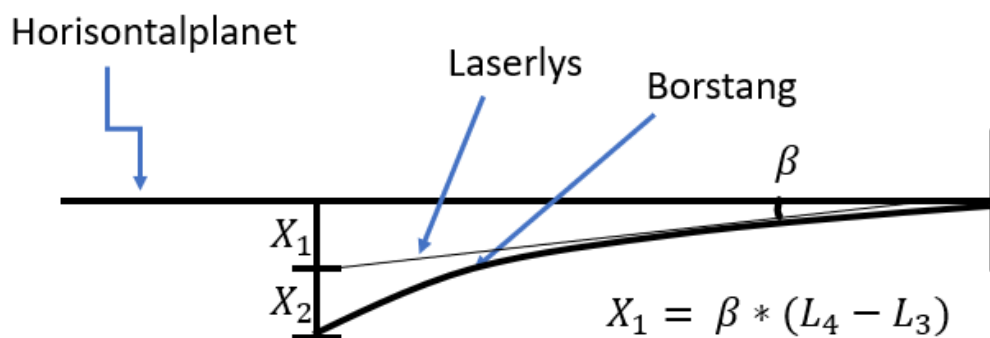
$$\beta_3 := \frac{P_{sim} \cdot L_1^2}{2 \cdot E \cdot I_x} = 0.00028 \text{ rad} \qquad \beta_3 = 0.016015 \text{ deg}$$

Ved hjelp av dette kan man beregne teoretisk høydeforskjell mellom hvor laserlyset treffer, og hvor quadrant-sensoren vil befinne seg. Høydeforskjellen på laserlysets treffpunkt, og horisontallinja kalles  $x_1$ . Høydeforskjellen på treffpunkt og sensorens teoretiske høyde kalles  $x_2$ .  $x_1 + x_2 = x_3$ , og vil være den teoretiske utbøyningen man beregner ved hjelp av formlene ovenfor.  $x_3$  er derfor lik  $y_4$ .

$$x_1 := \beta_3 \cdot (L_4 - L_3) = 0.075 \text{ mm}$$

$$x_2 := y_4 - x_1 = 0.44671597 \text{ mm}$$

Teoretisk sett skal da avlesningen fra sensoren tilsvare  $x_2$ , og ikke  $y_4$ .



# Tillegg F

## Risk Assessment

Det ble for arbeid ved verksted og laboratorium opparbeidet en Risk Assessment for å ivareta sikkerheten for tilstedeværende personell, lokaler og utstyr som ble benyttet ved arbeidet. Denne finnes på de påfølgende sidene og ble utarbeidet ved hjelp av NTNUs egne nettsider for nettopp dette.



<b>ID</b>	32255	<b>Status</b>	<b>Dato</b>
<b>Risikoområde</b>	Risikovurdering: Helse, miljø og sikkerhet (HMS)	Opprettet	25.02.2019
<b>Opprettet av</b>	Andreas Reberg	Vurdering startet	25.02.2019
<b>Ansvarlig</b>	Andreas Reberg	Tiltak besluttet	
		Avsluttet	25.02.2019

**Risikovurdering:****Statiske målinger i dreiebenk****Gyldig i perioden:**

2/25/2019 - 2/25/2022

**Sted:**

NTNU Gløshaugen

**Mål / hensikt**

Hensikten med denne rapporten er å kartlegge eventuelle farer og nødvendige tiltak i forbindelse med statiske målinger ved nedbøyning av en simulert borstang i dreiebenk.

**Bakgrunn**

Rapporten er en nødvendighet da undertegnede skal gjennomføre labforsøk i forbindelse med avvikling av masteroppgave.

**Beskrivelse og avgrensninger**

Tilstanden på ytre miljø på verksted kan ikke studenten råde over i det han ankommer for forsøk. Det er dog mulig å gjøre tiltak, eventuelt avlyse forsøkene, for å ta vare på HMS'en.

**Forutsetninger, antakelser og forenklinger**

- Det antas at det ikke er;
- Røt ved arbeidsstedet i det studenten ankommer
  - Farlige gasser i omløp i verkstedet, da det normalt sett ikke er det
  - Lavt støynivå i området hvor testene foregår, da det ikke er noen maskiner der som lager nevneverdig med støy

**Vedlegg**

[Ingen registreringer]

**Referanser**

[Ingen registreringer]



## Oppsummering, resultat og endelig vurdering

I oppsummeringen presenteres en oversikt over farer og uønskede hendelser, samt resultat for det enkelte konsekvensområdet.

### Farekilde: Vekter

---

#### Uønsket hendelse: Knuste føtter

Skal ikke analyseres.

#### Uønsket hendelse: Slå bakhodet i gulv

**Konsekvensområde:** Helse  
Omdømme

Risiko før tiltak:  Risiko etter tiltak:   
Risiko før tiltak:  Risiko etter tiltak: 

#### Uønsket hendelse: Dreiebenkens sleider

Skal ikke analyseres.

### Farekilde: Laserlys

---

#### Uønsket hendelse: Laserlys i øynene

Skal ikke analyseres.

## Endelig vurdering

Dersom man er bevisst over farene ved arbeidet, er det liten eller ingen risiko for at noe alvorlig inntreffer.



## Involverte enheter og personer

En risikovurdering kan gjelde for en, eller flere enheter i organisasjonen. Denne oversikten presenterer involverte enheter og personell for gjeldende risikovurdering.

### Enhet /-er risikovurderingen omfatter

- NTNU

### Deltakere

Knut Sørby

### Lesere

[Ingen registreringer]

### Andre involverte/interessenter

[Ingen registreringer]

## Følgende akseptkriterier er besluttet for risikoområdet Risikovurdering: Helse, miljø og sikkerhet (HMS):

### Helse



### Materielle verdier



### Omdømme



### Ytre miljø



## Oversikt over eksisterende, relevante tiltak som er hensyntatt i risikovurderingen

I tabellen under presenteres eksisterende tiltak som er hensyntatt ved vurdering av sannsynlighet og konsekvens for aktuelle uønskede hendelser.

Farekilde	Uønsket hendelse	Tiltak hensyntatt ved vurdering
Vekter	Slå bakhodet i gulv	Påkrevd verneutstyr utenfor gul sone

### Eksisterende og relevante tiltak med beskrivelse:

#### Påkrevd verneutstyr utenfor gul sone

For å gå utenfor de gule oppmerkede linjene på verkstedet er det krav om bruk av både vernebriller og vernesko. Vernebriller vil ikke være nødvendig ved denne typen forsøk, men vernesko er høyst aktuelt.

#### Ryddighet

Det er få folk som benytter seg av verkstedet, relativt sett. Det er også enkelte personer som har verkstedet som fast arbeidssted. Undertegnede har en oppfatning av at disse er meget opptatt av ryddighet på verksted. Derfor er det satt som et eksisterende tiltak at gulvareal ved og rundt dreiebenken er rene og ryddige i det vi ankommer for tester.

Det er også antatt at det verken er vann, kjølevæske eller annet oljesøl på gulvet.



## Risikoanalyse med vurdering av sannsynlighet og konsekvens

I denne delen av rapporten presenteres detaljer dokumentasjon av de farer, uønskede hendelser og årsaker som er vurdert. Innledningsvis oppsummeres farer med tilhørende uønskede hendelser som er tatt med i vurderingen.

**Følgende farer og uønskede hendelser er vurdert i denne risikovurderingen:**

- **Vekter**
  - Slå bakhodet i gulv

## Detaljert oversikt over farekilder og uønskede hendelser:

**Farekilde: Vekter**

Ved forsøket for å simulere utbøyning av borstang er det to enkle metoder for å få ønsket utbøyning. Den ene er å tvinge røret ned ved hjelp av skruing. Den andre metoden er å benytte seg av vekter. Det er anslått en kraft på ca 900N, noe som tilsvarer ca 92 kg. Dersom man mister ned vekter kan sleidene på dreiebenken bli ødelagte, og man kan i verste fall få de utover seg selv og ødelegge føtter. Er man riktig uheldig kan man falle bakover som en følge av tunge vekter og slå hodet i gulvet.

**Uønsket hendelse: Knuste føtter**

Dersom man får vekter fallende på føttene, kan disse i verste fall knuses og man får flere bein med brudd. Dette unngår man ved bruk av vernesko, som er en forutsetning for å kunne bevege seg utenfor gul sone.

Sannsynlighet for hendelsen (felles for alle konsekvensområder): **(0)**

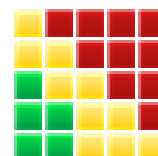
Kommentar:

[Ingen registreringer]

**Konsekvensområde: Helse**

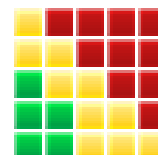
Vurdert konsekvens: **( )**

Kommentar: [Ingen registreringer]

**Risiko:****Konsekvensområde: Omdømme**

Vurdert konsekvens: **( )**

Kommentar: [Ingen registreringer]

**Risiko:**

**Uønsket hendelse: Slå bakhodet i gulv**

---

Dersom man får vekter med en stor masse over seg, kan man i verste fall falle bakover. Da er det igjen mulig å slå bakhodet i gulvet, som kan få store konsekvenser.

Sannsynlighet for hendelsen (felles for alle konsekvensområder):

**Svært lite sannsynlig (1)**

*Kommentar:*

Dette er nok veldig usannsynlig, da man uansett ikke klarer å legge på mer enn 20 kg av gangen. Dette er i utgangspunktet ikke nok til å velte en voksen mann.

**Konsekvensområde: Helse**

Vurdert konsekvens: **Middels (2)**

*Kommentar:* [Ingen registreringer]

**Risiko:**

**Konsekvensområde: Omdømme**

Vurdert konsekvens: **Middels (2)**

*Kommentar:* [Ingen registreringer]

**Risiko:**





## Oversikt over besluttede risikoreducerende tiltak:

Under presenteres en oversikt over risikoreducerende tiltak som skal bidra til å reduseres sannsynlighet og/eller konsekvens for uønskede hendelser.

## Detaljert oversikt over besluttede risikoreducerende tiltak med beskrivelse:



---

**Detaljert oversikt over vurdert risiko for hver farekilde/uønsket hendelse før og etter besluttede tiltak**